



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Ana Carolina Dias Barboza

Avaliação do Sistema de Jardins Filtrantes do Parque Orla Piratininga diante de Cenários de Precipitações Intensas e Mudanças Climáticas

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

Junho de 2025

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também a concretização de uma meta que só foi possível graças ao apoio, amor e incentivo de muitas pessoas especiais que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada.

Agradeço, acima de tudo, a Deus, por ter guiado cada passo da minha trajetória, renovando minhas forças nos momentos de fraqueza e iluminando meu caminho mesmo diante das incertezas.

Aos meus pais, meu profundo agradecimento por todo o amor, apoio e dedicação incondicional ao longo da minha vida. Cada um, à sua maneira, foi essencial para que eu chegasse até aqui. Ao meu pai, Flavio, por ter me proporcionado o melhor ensino possível, dedicando-se arduamente para que eu tivesse acesso a uma educação de qualidade, por quem tenho profunda admiração e respeito, que me inspira diariamente e quem despertou em mim o interesse pela profissão. À minha mãe, Hercília, que esteve presente em todas as fases da minha vida, segurou a barra nos momentos mais difíceis e, com sua luz e sabedoria, sempre me fez enxergar o lado bom das coisas, não permitindo que eu desistisse e sendo de extrema importância em todo esse processo.

Aos meus avós Ana e Zé, cuja presença constante, incentivo e amparo desde a infância, tornou minha caminhada mais leve e feliz. À minha avó Hercília e ao meu avô Fernando, que me acolheram em sua casa durante todo o período da faculdade, permitindo que eu tivesse uma melhor qualidade de vida.

Ao meu irmão Angelo Junior, que esteve ao meu lado em todos os momentos e sempre foi um ponto de conforto e alegria em meio à rotina intensa, e às minhas irmãs Cecília e Maitê, que tornam minha vida mais completa e divertida.

Ao meu padrasto Angelo, que desde a infância me incentivou nas tarefas escolares e me ajudou a ter as primeiras noções de matemática e raciocínio lógico, despertando em mim o gosto pela área de exatas.

A minha madrastra Maria Carolina, que por toda minha trajetória, acadêmica e de vida, foi uma grande amiga e incentivadora.

Ao meu tio Leandro, que me acompanhou em rotinas de trabalho e sempre me apoiou e motivou em cada passo profissional, para além da convivência familiar.

A todos os demais familiares que, mesmo não citados individualmente, acompanharam minha trajetória e contribuíram de forma significativa para que eu chegasse até aqui.

Ao meu namorado João, que nos últimos dois anos acompanhou de perto cada angústia, cada ansiedade, e me apoiou incondicionalmente em cada passo, me fazendo lembrar da minha essência e da minha força, por quem sou imensamente grata por compartilhar a vida comigo, de forma leve e feliz. Sua presença tem sido meu porto seguro e meu alívio, em todos os momentos.

Às minhas amigas da escola, que acompanharam cada conquista minha desde o jardim de infância até os dias de hoje, me incentivaram em todas minhas escolhas e estiveram ao meu lado em todos os momentos, bons e ruins. De forma especial, agradeço à Giovana Devisate, Marina Diuana e Laís Felgueiras, que estiveram ainda mais próximas nos últimos anos, e acompanharam de perto os meus desafios, incertezas e decisões relacionadas à faculdade, sendo presença constante e fonte de força ao longo do meu percurso acadêmico.

Às minhas amigas do Crossfit, que viraram amigas da vida, e foram um verdadeiro respiro em meio à intensidade da rotina. Em particular, à Beatriz Garcia e à Marina Moreira, por estarem sempre por perto, e por me ouvirem com atenção e afeto em cada desabafo diário. A convivência com vocês nesse período foi, ao mesmo tempo, refúgio e força: companhias leves, mas extremamente significativas, que fizeram toda diferença nos últimos tempos.

Ao professor Antonio Krishnamurti, orientador deste trabalho, agradeço por aceitar conduzir esta etapa final da graduação, oferecendo motivação, direcionamento e apoio em todo o processo de desenvolvimento deste estudo.



Agradeço, especialmente, à minha filha de quatro patas, Laika, que, apesar de um ser irracional, é a minha maior companheira de estudos em noites não dormidas, minha melhor amiga e quem torna meus dias melhores.

Por fim, agradeço à PUC-Rio pelo acolhimento e pelo suporte oferecido durante toda minha trajetória universitária, que foram fundamentais para que eu pudesse crescer, aprender e evoluir como pessoa e como futura engenheira civil.

RESUMO

A drenagem urbana convencional considera o conjunto de estruturas que possuem como função principal o escoamento de água pluvial de forma eficiente e rápida. A falência das soluções técnicas adotadas para os projetos de drenagem urbana demandou uma nova abordagem sobre o tema, o manejo de águas pluviais, com o objetivo de focar o problema das cheias urbanas incorporando a dinâmica social e o planejamento do sistema multissetorial na busca de soluções. Soma-se a esta falência a contribuição irregular de esgoto sanitário que aporta ao sistema de drenagem e, sem tratamento, contamina os corpos hídricos receptores. Os jardins filtrantes são uma das soluções baseadas na natureza (SbN) dentre os sistemas de manejo de águas pluviais, que se tornaram destaque por sua capacidade de reter e tratar as águas pluviais (incluindo possíveis contribuições de esgoto), além de promover a infiltração no solo, contribuindo para a redução de alagamentos e a melhoria da qualidade da água. O local de estudo trata-se do Parque Orla Piratininga, localizado na lagoa de Piratininga, em Niterói, no estado do Rio de Janeiro, onde foi adotado o sistema de jardins filtrantes visando a recuperação do ecossistema local e a promoção do desenvolvimento socioambiental da região, com base em critérios de preservação e proteção do meio ambiente. O funcionamento hidráulico desta solução foi pouco explorado, principalmente sob o ponto de vista de eventos extremos e sob a possível ação de mudanças climáticas. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo uma avaliação do funcionamento do sistema de jardins filtrantes no Parque Orla Piratininga diante de cenários de precipitação intensos, levando em consideração também o impacto das mudanças climáticas, que considerem o aumento da intensidade das precipitações e o nível médio do mar. Nessa circunstância, a metodologia utiliza simulação hidrológica e hidrodinâmica para avaliar o regime de chuvas locais, as mudanças climáticas e o comportamento do nível de água da lagoa de Piratininga, sendo possível simular cenários futuros de funcionamento do sistema. O estudo permitiu corroborar com a resiliência dos jardins filtrantes em diferentes condições hidrológicas, considerando a capacidade de funcionamento diante de cenários que estressam o funcionamento do sistema.

Palavras-chave: Sistema de Manejo de Águas Pluviais; Soluções Baseadas na Natureza; Jardins Filtrantes; Mudanças Climáticas; Lagoa de Piratininga.

TITLE: “ASSESSMENT OF THE CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM AT PARQUE ORLA PIRATININGA UNDER SCENARIOS OF INTENSE PRECIPITATION AND CLIMATE CHANGE”

ABSTRACT

Conventional urban drainage considers the set of infrastructures whose primary function is the efficient and rapid conveyance of stormwater. The failure of the technical solutions traditionally adopted in urban drainage projects has required a new approach to the subject, namely stormwater management, with the aim of addressing urban flooding by incorporating social dynamics and the planning of a multisectoral system in the search for effective solutions. Compounding this failure is the irregular discharge of untreated domestic sewage into the drainage system. Among the stormwater management systems, constructed wetlands are one of the nature-based solutions (NbS) that have gained prominence due to their ability to retain and treat stormwater, as well as to promote soil infiltration. The study area is the Parque Orla Piratininga, located at the Piratininga Lagoon, in the municipality of Niterói, in the state of Rio de Janeiro, where the constructed wetlands system was implemented with the goal of restoring the local ecosystem and promoting the region’s socio-environmental development. The hydraulic performance of this solution has been little explored, particularly in the context of extreme events and the potential impacts of climate change. Accordingly, the present study aims to evaluate the performance of the constructed wetlands system in Parque Orla Piratininga under scenarios of intense precipitation, while also considering the impacts of climate change, particularly the projected increase in rainfall intensity and mean sea level. In this context, the methodology involves hydrological and hydrodynamic simulation to assess the local rainfall regime, climate change effects, and the behavior of the water level in the Piratininga Lagoon, making it possible to simulate future operating scenarios for the system. The study validated the efficiency of the constructed wetlands under different hydrological conditions, considering their performance under scenarios that stress the operational capacity of the system.

Keywords: Stormwater Management System; Nature-Based Solutions; Constructed Wetlands; Climate change; Piratininga Lagoon.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	8
1.2	Objetivo.....	9
1.2.1	Objetivo geral	9
1.2.2	Objetivos específicos	9
1.3	Metodologia geral.....	10
1.4	Escopo do trabalho.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	Manejo de águas pluviais	12
2.2	Soluções baseadas na natureza (SbN)	17
2.3	Jardins Filtrantes	19
2.4	Mudanças Climáticas e seus efeitos sobre o manejo de águas pluviais.....	22
3	ESTUDO DE CASO.....	27
3.1	Localização.....	27
3.2	Geologia e geomorfologia	28
3.3	Clima	29
3.4	Vegetação	31
3.5	Histórico de ocupação	31
3.6	Saneamento Básico.....	34
3.7	Parque Orla Piratininga.....	36

3.7.1	Etapas especificadas dos Jardins Filtrantes:	42
4	METODOLOGIA	50
4.1	Estudo hidrológico e de contribuições de esgotamento sanitário	50
4.1.1	Caracterização da Bacia Hidrográfica	50
4.1.2	Método Racional	55
4.1.3	Avaliação do Esgotamento Sanitário da Bacia Hidrográfica	58
4.2	Estudo hidráulico para a simulação do funcionamento do sistema	60
4.3	Simulação de cenários.....	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	Cenário 1	72
5.2	Cenário 2	74
5.3	Cenário 3	77
5.4	Cenário 4	79
5.5	Comparação dos cenários.....	82
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Alteração da frequência e intensidade da precipitação para diversos cenários de aumento da temperatura global devido a mudanças climáticas. Fonte: IPCC (2021), IBGE (2023), adaptado.....	23
Figura 2.2 Evolução da Temperatura Média Global (1960–2100). Fonte: Riahi et al. (2016).	24
Figura 3.1 Mapas de localização de Niterói. Fonte: Prefeitura de Niterói	27
Figura 3.2 Mapa geomorfológico de Niterói. Fonte: SIGEO, Prefeitura de Niterói	28
Figura 3.3 Histórico de Temperatura em Niterói em 2024. Fonte: Weather Spark	30
Figura 3.4 Histórico de Precipitação em Niterói em 2024. Fonte: Defesa Civil de Niterói, adaptado.	30
Figura 3.5 Divisão dos bairros de Niterói. Fonte: SIGEO, Prefeitura de Niterói.....	33
Figura 3.6 Evolução da População Total de Niterói. Fonte: IBGE	34
Figura 3.7 Localização da Lagoa de Piratininga no município de Niterói. Fonte: Prefeitura de Niterói	36
Figura 3.8 Representação dos Rios e suas Microbacias Hidrográficas que drenam para a Lagoa de Piratininga. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga	37
Figura 3.9 Representação da localização de cada uma das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024).....	38
Figura 3.10 Antes e depois das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024).....	39
Figura 3.11 Antes e depois das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024).....	40

Figura 3.12 Antes e depois das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024).....	41
Figura 3.13 Sistema esquematizado dos Jardins Filtrantes da Lagoa de Piratininga. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024).....	42
Figura 3.14 Construção do Vertedouro e da bacia de recepção. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga	43
Figura 3.15 Vertedouro construído e bacia de recepção em funcionamento. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga.....	43
Figura 3.16 Vertedouro e bacia de recepção construídos e em funcionamento. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga.....	44
Figura 3.17 Planta vertedouro e bacia de recepção. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga, adaptado.	44
Figura 3.18 Bacia de Sedimentação D. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga.....	45
Figura 3.19 Bacia de Sedimentação D. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga.....	46
Figura 3.20 Jardim Filtrante D1. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga.....	47
Figura 3.21 Jardim Filtrante D2. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga.....	48
Figura 3.22 Jardim Filtrante D3. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga.....	48
Figura 3.23 Sequência de Funcionamento dos Jardins Filtrantes através de imagem via satélite. Fonte: Google Earth adaptada	49
Figura 4.1 Reconhecimento da Bacia do Rio Cafubá. Fonte: SIGEO (Prefeitura de Niterói)	51
Figura 4.2 Delimitações das bacias de Niterói via satélite. Fonte: Prefeitura de Niterói	52
Figura 4.3 Análise da Cobertura Vegetal (Verde representa a área de cobertura vegetal e cinza a área urbana). Fonte: Própria	53

Figura 4.4 População estimada da cidade de Niterói. Fonte: IBGE (2024)	54
Figura 4.5 Imagens via satélite do bairro do Cafubá, 2004. Fonte: Google Earth	54
Figura 4.6 Imagens via satélite do bairro do Cafubá, 2024. Fonte: Google Earth	55
Figura 4.7 Definição do tempo de concentração.	56
Figura 4.8 - Representação das células no MODCEL. Fonte: Própria.....	62
Figura 5.1 Hietograma referente ao cenário atual. Fonte: INMET e Defesa Civil de Niterói, adaptado.	68
Figura 5.2 Hidrograma referente ao cenário atual. Fonte: Própria.....	68
Figura 5.3 Hietograma considerando aumento da precipitação. Fonte: Própria.	69
Figura 5.4 Hidrograma considerando aumento da precipitação. Fonte: Própria.	69
Figura 5.5 Esquema de funcionamento da bacia de recepção. Fonte: Própria.	70
Figura 5.6 Variação de Nível de Água para o Cenário 1. Fonte: Própria.....	72
Figura 5.7 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 1. Fonte: Própria	73
Figura 5.8 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 1. Fonte: Própria	74
Figura 5.9 Variação de Nível de Água para o Cenário 2. Fonte: Própria.....	75
Figura 5.10 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 2. Fonte: Própria	76
Figura 5.11 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 2. Fonte: Própria	76
Figura 5.12 Variação de Nível de Água para o Cenário 3. Fonte: Própria.....	77

Figura 5.13 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 3. Fonte: Própria	78
Figura 5.14 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 3. Fonte: Própria	78
Figura 5.15 Variação de Nível de Água para o Cenário 4. Fonte: Própria.....	79
Figura 5.16 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 4. Fonte: Própria	80
Figura 5.17 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 4. Fonte: Própria	81
Figura 5.18 Variação de Nível de Água na Bacia de Recepção de todos os cenários. Fonte: Própria.	82
Figura 5.19 Variação de Vazão na Bacia de Sedimentação de todos os cenários. Fonte: Própria.	83
Figura 5.20 Variação de Vazão no Jardim Filtrante D1 de todos os cenários. Fonte: Própria.	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Impactos das Mudanças Climáticas no Manejo de Águas Pluviais. Fonte: Silva (2015); Perez et al. (2020), adaptado.....	26
Tabela 2 Coeficiente de Escoamento. Fonte: Prefeitura de Niterói	58
Tabela 3 Dados do Estudo Hidrológico. Fonte: Própria.....	66
Tabela 4. Análise das vazões de contribuição para a Bacia de Sedimentação. Fonte: Própria	85
Tabela 5 Análise das vazões de contribuição para os Jardins Filtrantes. Fonte: Própria	85

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização tem se intensificado globalmente desde o século XX, impulsionado pelo crescimento populacional, pela industrialização e pelas migrações do campo para as cidades. Esse fenômeno, embora associado a oportunidades econômicas e sociais, também tem gerado sérios desafios no planejamento e na gestão urbana, especialmente nos países periféricos. Um dos aspectos mais críticos dessa expansão urbana é a ausência ou precariedade dos serviços de saneamento básico, que engloba o abastecimento de água potável, a coleta e o tratamento de esgoto, a drenagem urbana e o manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2020).

A ausência de saneamento básico nas cidades representa uma das mais graves deficiências em infraestrutura urbana no mundo atualmente. Segundo o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) e a Organização Mundial da Saúde (WHO), cerca de 3,6 bilhões de pessoas ainda não possuem acesso a serviços de saneamento seguros, o que corresponde a quase metade da população global (UNICEF; WHO, 2021). Essa problemática afeta principalmente países periféricos devido ao crescimento urbano ter superado a capacidade dos governos em prover serviços essenciais de forma equitativa. Nos centros urbanos periféricos, a situação tende a ser ainda mais crítica por conta da alta densidade populacional, da expansão desordenada e da precariedade das infraestruturas, dificultando a implementação de sistemas de coleta e tratamento de esgoto.

É importante destacar que a ausência de saneamento básico nas cidades não é apenas uma falha técnica, mas sobretudo uma expressão das desigualdades estruturais que marcam o processo de urbanização em países periféricos. Investir em saneamento significa promover saúde, dignidade e inclusão, além de prevenir doenças e reduzir custos com internações hospitalares. Estudos demonstram que cada dólar investido em saneamento gera um retorno de até cinco dólares em saúde, produtividade e qualidade ambiental (HUTTON; VARUGHESE, 2016).

Os impactos da falta de saneamento são extensos e multifacetados. Em termos de saúde pública, a inexistência de sistemas adequados de coleta e tratamento de esgoto contribui para a proliferação de doenças de veiculação hídrica (WHO, 2017). Além disso, a exposição constante a ambientes insalubres compromete o desempenho escolar, a

produtividade e a qualidade de vida da população, gerando ciclos de pobreza e exclusão social (HUTTON; VARUGHESE, 2016).

Do ponto de vista ambiental, uma das consequências mais visíveis da ausência de saneamento é a degradação dos corpos hídricos urbanos. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), mais de 80% dos esgotos produzidos em países periféricos são descartados no meio ambiente sem tratamento (WWAP, 2023). Esse descarte inadequado promove a eutrofização das águas, a perda da biodiversidade aquática e a contaminação de recursos hídricos utilizados para consumo humano.

A poluição contínua dos corpos hídricos compromete não apenas o equilíbrio ecológico, mas também os diversos usos da água, como abastecimento público, irrigação, recreação e pesca. Em áreas densamente povoadas, a degradação da qualidade da água resulta em altos custos para o tratamento do recurso, além de tornar inviável sua utilização segura, ampliando a escassez hídrica (ANA, 2021). Rios urbanos poluídos apresentam baixos níveis de oxigênio dissolvido, alta turbidez e concentração de metais pesados, comprometendo a fauna aquática e afetando toda a cadeia trófica (BRASIL, 2020). Além disso, a sedimentação associada à erosão e ao despejo de resíduos sólidos urbanos acarreta o assoreamento dos cursos d'água, reduzindo sua capacidade de vazão e aumentando o risco de inundações nas áreas adjacentes (TSUTIYA, 1997).

Frente a esse cenário, soluções vêm sendo adotadas para mitigar os impactos da ausência de saneamento. As soluções convencionais, centradas em infraestrutura cinza, consistem em galerias e canalizações que aceleram os escoamentos e tendem a transferir alagamentos e inundações para jusante da intervenção. Para o componente de esgotamento sanitário as soluções convencionais correspondem a sistemas centralizados de coleta e tratamento de esgoto, por meio de redes subterrâneas e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), baseadas em processos físico-químicos e biológicos (TSUTIYA, 1997). Embora eficientes em larga escala, essas soluções demandam altos custos de implantação, operação e manutenção, e muitas vezes não são adaptáveis a territórios ocupados de forma informal ou ambientalmente frágeis. Adicionalmente, esta abordagem setorial não prevê possíveis conexões irregulares entre estes dois componentes do

saneamento, dificultando sua gestão conjunta e a proposição de alternativas para problemas reais de interação entre os sistemas (Oliveira *et al.*, 2024).

Como alternativa ou complemento às abordagens convencionais, surgem as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), que consistem na aplicação de processos ecológicos naturais ou semi-naturais para prover serviços sanitários, como o tratamento de esgoto doméstico, a infiltração e reutilização de águas cinzas, e o controle da poluição difusa, ou até a contribuição irregular entre os componentes de drenagem urbana e esgotamento sanitário. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, SbN são intervenções inspiradas e sustentadas por processos naturais, que têm como objetivo oferecer benefícios ambientais, sociais e econômicos de maneira eficaz e resiliente (UNEP, 2020), fortalecendo a biodiversidade. A adoção de SbN no planejamento do saneamento exige uma mudança de paradigma na forma como os serviços são concebidos. Ao invés de depender exclusivamente de sistemas centralizados e mecanizados, passa-se a considerar infraestruturas híbridas que integrem tecnologias verdes com sistemas convencionais.

Além da capacidade de tratamento, as SbN oferecem cobenefícios que superam as funcionalidades dos sistemas convencionais de saneamento. Entre eles destacam-se a promoção da biodiversidade urbana, a criação de microclimas mais amenos, a melhoria da paisagem, a valorização imobiliária e a oferta de espaços de lazer e educação ambiental (BRASIL, 2020). Estudos recentes demonstram que essas soluções são eficazes para o atendimento de pequenas comunidades, zonas periurbanas e assentamentos informais, onde os sistemas convencionais seriam financeiramente inviáveis ou tecnicamente impraticáveis (UNEP, 2020). A implementação de SbN também contribui para a resiliência climática das cidades, promovendo áreas permeáveis e reduzindo o risco de inundações urbanas.

Em relação ao saneamento básico dentro do contexto brasileiro, é possível identificá-lo como um dos maiores desafios para a consolidação de políticas públicas voltadas à saúde, ao meio ambiente e à justiça social. Apesar dos avanços legais e institucionais, como a difusão do Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020), o país ainda enfrenta significativos déficits nos serviços de coleta e tratamento de esgoto, o que

compromete a qualidade de vida da população e a preservação dos recursos hídricos. A universalização do saneamento básico, prevista para ser alcançada até 2033 pelo novo marco legal, ainda depende de investimentos em grande escala, cooperação federativa e soluções técnicas compatíveis com as diversidades territoriais.

Conforme o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico – SINISA, o Brasil coletou esgoto de apenas 59,7% da população em 2023, sendo que apenas 49,4% do esgoto gerado foi efetivamente tratado. Isso significa que cerca de 100 milhões de brasileiros vivem sem acesso à rede de esgotamento sanitário, e uma parcela ainda maior está exposta a ambientes insalubres, com despejo de efluentes em corpos hídricos sem qualquer tratamento. Ainda é possível identificar disparidades regionais, enquanto o Sudeste alcança mais de 80% de cobertura de coleta, estados das regiões Norte e Nordeste não atingem sequer 30% (TRATA BRASIL, 2023).

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) têm se consolidado como alternativas estratégicas para enfrentar os desafios socioambientais urbanos no Brasil, especialmente no que se refere à gestão das águas, ao saneamento e à resiliência climática. O Brasil, por suas características geográficas, climáticas e sociais, apresenta grande potencial para a aplicação de SbN. Em regiões urbanas altamente impermeabilizadas, onde a expansão desordenada e a ausência de infraestrutura básica agravam problemas como enchentes, poluição hídrica e ilhas de calor, as SbN surgem como alternativas viáveis e adaptáveis. Exemplos incluem jardins de chuva, valas de infiltração, telhados verdes, bacias de retenção e, especialmente, os sistemas de wetlands construídos (jardins filtrantes), que têm sido amplamente utilizados em projetos de tratamento descentralizado de esgoto (BRASIL, 2020).

Além do setor de saneamento, as SbN vêm sendo incorporadas em iniciativas voltadas à adaptação às mudanças climáticas, como estratégias de drenagem urbana sustentável (SUDS), reflorestamento de margens fluviais, recuperação de nascentes e implantação de áreas verdes multifuncionais em centros urbanos. A inclusão dessas abordagens em programas como o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima e os Cadernos de Infraestrutura Verde Urbana do Ministério do Desenvolvimento Regional demonstra o

reconhecimento institucional da importância das SbN para a política ambiental brasileira (BRASIL, 2020).

Apesar dos avanços, a ampliação do uso de SbN no Brasil ainda enfrenta desafios relacionados à falta de conhecimento técnico entre gestores públicos, ausência de normativas específicas, resistência cultural à inovação e limitação de recursos financeiros. Superar esses entraves requer investimentos em capacitação, promoção de experiências demonstrativas, apoio institucional e integração das SbN aos marcos legais e regulatórios de planejamento urbano e saneamento básico (UN-HABITAT, 2020).

No estado do Rio de Janeiro, os desafios são similares, embora haja avanços notáveis. Segundo o SINISA 2024 (ano-base 2023), aproximadamente 59,8% da população fluminense é atendida por serviços de coleta de esgoto, enquanto 49% do esgoto gerado é tratado. Entretanto, há disparidades regionais significativas dentro do estado. Enquanto municípios como Niterói apresentam índices de tratamento de esgoto próximos a 97,7%, outras localidades, especialmente na Baixada Fluminense, enfrentam cobertura inferior a 20%.

Nesse contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) têm ganhado destaque como alternativas sustentáveis e eficazes para melhorar a infraestrutura de saneamento. Um exemplo emblemático é o projeto piloto lançado pelo governo do estado durante a COP-16, que visa implementar SbN na gestão da Baía de Guanabara. Com um investimento de R\$ 3,1 milhões, a iniciativa beneficiará 17 municípios da região hidrográfica da Baía, promovendo a integração de políticas públicas e capacitação técnica para a adoção dessas soluções.¹ Além disso, a cidade do Rio de Janeiro tem investido em projetos de drenagem urbana sustentável. A Fundação Rio-Águas, por exemplo, implementou jardins de chuva e canteiros drenantes em bairros como Leblon, São Conrado e Jacarepaguá. Essas estruturas aumentam a permeabilidade do solo, reduzindo o risco de alagamentos e

¹ RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade. *Em território fluminense, será desenvolvido um projeto...* Disponível em: <https://www.rj.gov.br/seas/node/1080#:~:text=Em%20territ%C3%B3rio%20fluminense%2C%20ser%C3%A1%20desenvolvido%20um%20projeto,da%20urg%C3%Aancia%20em%20agir%20de%20forma%20preventiva.>

melhorando a qualidade das águas pluviais. Outro destaque é o Programa Mutirão Reflorestamento, iniciado em 1987, que já recuperou mais de 3.460 hectares de áreas degradadas na cidade do Rio de Janeiro. Além de contribuir para a conservação da biodiversidade, o programa auxilia na proteção de mananciais e na prevenção de deslizamentos em encostas.

Após a contextualização do cenário nacional e fluminense, é possível destacar a cidade de Niterói como uma das referências em gestão do saneamento básico no Brasil. Localizada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Niterói apresenta índices elevados de cobertura de abastecimento e esgotamento sanitário, além de ser reconhecida por adotar estratégias inovadoras baseadas na integração entre infraestrutura urbana, proteção ambiental e soluções sustentáveis.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), Niterói conta com 100% de cobertura de abastecimento de água, 95,5% de cobertura de coleta de esgoto, e 100% de tratamento do esgoto coletado (BRASIL, 2023). Esses resultados colocam a cidade entre os destaques nacionais em saneamento, figurando como a melhor do estado do Rio de Janeiro e a sexta no ranking nacional do Instituto Trata Brasil (TRATA BRASIL, 2024). Os avanços são atribuídos a investimentos iniciados a partir de 2013, com a modernização de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e obras estruturantes em bairros como Sapê, Caramujo e Jurujuba, além do programa Enseada Limpa, voltado à recuperação ambiental das águas da Baía de Guanabara (NITERÓI, 2025).

No campo das Soluções Baseadas na Natureza (SbN), Niterói tem se projetado como um exemplo inovador de integração entre urbanismo e ecologia. Um dos marcos dessa abordagem é o Projeto ProSustentável, uma iniciativa municipal voltada à promoção da resiliência urbana, sustentabilidade ambiental e requalificação de ecossistemas costeiros e lagunares. Dentro do escopo do ProSustentável, destaca-se o Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis (POP), considerado o maior projeto de SbN do Brasil, com área de 680 mil metros quadrados (CAF, 2023).

O parque foi concebido para tratar as águas pluviais e melhorar a qualidade da água da Lagoa de Piratininga por meio de jardins filtrantes. Diferente de sistemas convencionais,

os jardins filtrantes operam sem o uso de produtos químicos e se integram à paisagem urbana, contribuindo também para educação ambiental, lazer e biodiversidade (BRIX, 1997; NITERÓI, 2025).

Nesse cenário, foi desenvolvido o estudo de caso desse presente trabalho, que tem como objetivo uma avaliação do funcionamento do sistema de jardins filtrantes no Parque Orla Piratininga diante de cenários precipitação intensa, levando em consideração o impacto das mudanças climáticas.

1.1 Motivação

A escolha do tema parte de uma preocupação crescente com os impactos das mudanças climáticas nas áreas urbanas e da busca por soluções sustentáveis que conciliem engenharia, sustentabilidade e planejamento urbano. Optou-se por estudar o sistema de jardins filtrantes implantado no Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis (POP) por sua relevância no contexto nacional como o maior projeto de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) do Brasil e por seu potencial de replicabilidade em outras regiões.

A urbanização acelerada nas últimas décadas resultou em uma profunda impermeabilização do solo, agravando os efeitos das chuvas intensas, como alagamentos, enxurradas e poluição difusa. Diante deste cenário, torna-se indispensável o estudo de estratégias que integrem infraestrutura verde à gestão hídrica, de forma a mitigar os efeitos das mudanças climáticas e promover a resiliência urbana. As Soluções Baseadas na Natureza surgem como alternativas eficazes, sustentáveis e economicamente viáveis, utilizando processos ecológicos para responder a desafios urbanos, como a gestão das águas pluviais, a melhoria da qualidade da água e a adaptação às mudanças climáticas.

O Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis, localizado no município de Niterói, representa uma referência nesse sentido. O projeto transformou uma área ambientalmente degradada em um parque ecológico multifuncional, que combina recuperação ambiental, infraestrutura verde e inclusão social.

A magnitude e inovação do projeto levaram o POP a receber importantes premiações, como o Prêmio Nacional de Inovação em Saneamento da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), na categoria Saneamento Sustentável, e o reconhecimento internacional na Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas (COP27) como um exemplo de infraestrutura verde aplicada à adaptação climática em ambientes urbanos.

Além dos pontos supracitados, existe uma motivação pessoal da autora, moradora da Região Oceânica de Niterói, onde localiza-se a lagoa de Piratininga e pela sua participação no planejamento e desenvolvimento do Parque Orla Piratininga, projeto realizado pela empresa em que trabalha.

1.2 Objetivo

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

1.2.1 Objetivo geral

O estudo tem como objetivo uma avaliação do funcionamento hidráulico do sistema de jardins filtrantes no Parque Orla Piratininga, em períodos de estiagem e cheia, levando em conta os últimos anos hidrológicos registrados em Niterói que incluem eventos de chuva intensos ocorrido em 2020, bem como a consideração do impacto das mudanças climáticas, considerando o aumento da intensidade de eventos meteorológicos extremos e do nível do mar.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elaboração de um referencial teórico que contribua para o desenvolvimento do presente trabalho, tornando possível o entendimento dos principais conceitos abordados no decorrer do texto, aumentando o potencial de difusão deste trabalho final de curso;
- Avaliação do regime de chuvas locais de Piratininga, e as mudanças climáticas que consideram o aumento da intensidade das chuvas e o aumento do nível de água da lagoa de Piratininga;
- Simulação hidrodinâmica diante de cenários citados, considerando o impacto de mudanças climáticas.

1.3 Metodologia geral

Com o objetivo de alcançar os resultados esperados, foi necessário realizar um estudo hidrológico da região a ser analisada, como primeiro passo. Para o estudo se tornar viável, criou-se um modelo hidrológico de forma que fosse encontrado a vazão média ao longo dos anos no local avaliado.

Tendo esse modelo hidrológico produzido e compreendido, é exequível recolher os seus dados em conjunto com dados previamente fornecidos sobre o local de estudo, para que estes sejam trabalhados no modelo hidrodinâmico, pelo software MODCEL.

A partir dos modelos hidrológico-hidrodinâmico avalia-se o funcionamento dos jardins filtrantes no Parque Orla Piratininga, localizado na lagoa de Piratininga, levando em consideração a ocorrência das mudanças climáticas.

1.4 Estrutura 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 um referencial teórico baseado nos temas abordados no presente trabalho: diferença entre drenagem urbana e manejo de águas pluviais, sistema de manejo de águas pluviais – soluções baseadas na natureza, e mudanças climáticas e seus efeitos no manejo de águas pluviais.

O capítulo 3 expõe o estudo de caso do sistema de jardins filtrantes da Lagoa de Piratininga, apresentando suas principais características: localização, geomorfologia, clima, histórico de ocupação e eventos pluviométricos extremos.

O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada no estudo: a adaptação de um modelo hidrológico e hidrodinâmico e a simulação de diferentes cenários de alterações do sistema de jardins filtrantes do Parque Orla Piratininga.

O capítulo 5 exhibe os resultados encontrados ao longo do estudo.

O capítulo 6 sintetiza as considerações finais sobre o tema abordado.

Por fim, o capítulo 7 finaliza o trabalho final demonstrando as referências bibliográficas utilizadas para a sua produção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica dos temas relacionados ao manejo de águas pluviais e sistema de drenagem urbana, soluções baseadas na natureza, funcionamento de jardins filtrantes e os efeitos das mudanças climáticas no manejo de águas pluviais.

2.1 Manejo de águas pluviais

O crescimento acelerado das cidades, associada à impermeabilização do solo e à ocupação desordenada, tem contribuído significativamente para o agravamento dos problemas relacionados ao escoamento superficial das águas pluviais. Nesse contexto, os conceitos de drenagem urbana e manejo de águas pluviais têm sido cada vez mais discutidos no planejamento urbano e ambiental. Apesar de relacionados, esses termos apresentam diferenças significativas em seus enfoques, objetivos e métodos.

A drenagem urbana é tradicionalmente entendida como o conjunto de infraestruturas e instalações operacionais destinadas à coleta, transporte e disposição das águas pluviais, com o objetivo principal de prevenir alagamentos e inundações. Esse conceito está historicamente associado a obras de engenharia que visam remover rapidamente a água das vias públicas, por meio de sistemas compostos por sarjetas, bocas de lobo, galerias subterrâneas e canais de macrodrenagem (Miguez et al., 2016). A ênfase desse modelo reside na mitigação de alagamentos e inundações urbanas, sem considerar necessariamente os impactos ambientais ou a qualidade da água escoada.

Por outro lado, o manejo de águas pluviais propõe uma abordagem mais ampla e sustentável, ao reconhecer o ciclo hidrológico como um processo integrado ao ambiente urbano. Essa abordagem incorpora práticas de retenção, infiltração e reaproveitamento das águas de chuva, visando minimizar os impactos ambientais e sociais do escoamento urbano, melhorar a qualidade da água e reduzir os volumes direcionados aos corpos hídricos (MEIO AMBIENTE MG, 2023). Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, o manejo eficiente das águas pluviais deve incluir estratégias como pavimentos permeáveis, telhados verdes, jardins de chuva, bacias de retenção e recuperação de áreas verdes (CETESB, 2011).

Dessa forma, a principal diferença entre os dois conceitos está no escopo e na abordagem adotada. Enquanto a drenagem urbana está centrada na remoção rápida da água, o manejo de águas pluviais busca reintegrar a água da chuva ao ambiente urbano de forma controlada e sustentável. Este último conceito alinha-se aos princípios de infraestrutura verde e cidades resilientes, que são fundamentais para lidar com os efeitos das mudanças climáticas e da expansão urbana (TUCCI, 2008). Em Burian et al. (1999) é destacado a mudança ocorrida no panorama público sobre a drenagem urbana, passando de uma reflexão tardia negligenciada para um sistema de obras públicas vital e como um elemento de um sistema urbano sustentável, o que demonstra uma evolução conceitual sobre o tópico.

Além disso, o manejo das águas pluviais enfatiza a participação intersetorial, envolvendo não apenas engenheiros, mas também urbanistas, biólogos, gestores públicos e a população, em uma visão mais integrada e ecológica da gestão hídrica urbana (CEPAL, 2015).

As soluções convencionais de manejo de águas pluviais são estruturadas com o objetivo de coletar, transportar e lançar rapidamente as águas das chuvas em corpos receptores, como rios, canais ou o mar. Esta abordagem visa essencialmente evitar alagamentos e inundações, com foco na eficiência hidráulica e no escoamento superficial rápido Miguez et al., 2016).

Entre as principais soluções convencionais de drenagem urbana, destacam-se:

- Sarjetas e meios-fios, responsáveis por conduzir a água superficial das vias até os pontos de coleta;
- Bocas de lobo, que funcionam como estruturas de captação, permitindo a entrada da água nas redes subterrâneas;
- Poços de visita, que possibilitam o acesso para inspeção e manutenção das tubulações;
- Galerias de águas pluviais, formadas por sistemas de tubulações enterradas que conduzem o escoamento até os pontos de descarte;
- Canalizações e retificações de cursos d'água, utilizadas para aumentar a capacidade de escoamento e reduzir o tempo de concentração das águas;

- Canais de macrodrenagem abertos, especialmente em áreas de maior volume de escoamento, como rios urbanos retificados (Tucci, 2008; Miguez et al., 2016).

Apesar da sua eficácia em determinadas condições, as soluções convencionais apresentam limitações relevantes. As estruturas convencionais não consideram a infiltração, retenção ou tratamento da água, contribuindo, portanto, para o aumento do volume de escoamento, a erosão de margens e a poluição dos corpos receptores. Para Canholi (2005), a drenagem urbana configura-se como um problema vinculado à gestão dos espaços urbanos. Nesse sentido, a ocupação de áreas naturalmente sujeitas a alagamentos implica no deslocamento das águas pluviais para outras regiões da cidade, o que pode provocar inundações em locais que, anteriormente, não apresentavam risco. Ademais, por serem baseadas em obras subterrâneas e impermeabilizantes, essas soluções possuem altos custos de implementação e manutenção, além de reduzida flexibilidade adaptativa em relação aos eventos climáticos extremos, cuja frequência tem aumentado nas últimas décadas (Fletcher et al., 2015). Em síntese, os projetos de drenagem urbana e de controle de enchentes tendem a ser concebidos de forma reativa, por meio de intervenções emergenciais e localizadas, usualmente definidas somente após a ocorrência de eventos desastrosos (POMPÊO, 2000).

A abordagem ecossistêmica, conforme proposto por Ontario (1993), surge como uma alternativa inovadora aos modelos convencionais de Plano Diretor de Drenagem, ao substituir a lógica reativa por uma perspectiva orientada à prevenção e à integração ambiental. Essa abordagem propõe uma forma de gestão que reconhece e trata o ambiente natural e o ambiente construído como componentes interdependentes e integrados de um mesmo sistema. A publicação do Ministério do Ambiente e Energia e dos Recursos Naturais de Ontário destaca, também, a necessidade de se equacionarem, de maneira simultânea e equilibrada, objetivos ecológicos, econômicos e sociais, baseando-se no conceito de Desenvolvimento Sustentável, definido no Relatório Brundtland (1986).

Surgem, então, as soluções sustentáveis de drenagem urbana, que propõem a integração entre infraestrutura e meio ambiente, promovendo a retenção, infiltração, evapotranspiração e reuso das águas pluviais dentro do próprio meio urbano. Estas soluções, frequentemente reunidas sob o conceito de Soluções Baseadas na Natureza

(SbN), inspiram-se no funcionamento dos ecossistemas naturais para oferecer serviços ambientais e urbanos, aliando proteção ambiental à eficiência hidráulica (WWAP, 2018).

Os principais componentes do sistema de drenagem urbana sustentável são descritos pelo “Manual de Sistema de Drenagem Urbana Sustentável”, publicado pela CIRIA, sendo eles:

- Faixas de filtração (Filter strips): áreas planas, vegetadas e levemente inclinadas, reduzem a velocidade da água, permitem a sedimentação de sólidos e promovem a filtragem de poluentes;
- Valas de infiltração (Swales): canais rasos e vegetados que transportam, infiltram e tratam a água ao longo de seu trajeto;
- Bacias de infiltração (Infiltration basins): armazenam temporariamente o escoamento superficial da água da chuva, permitindo que essa água infiltre gradualmente no subsolo, não possui saída superficial;
- Bacias de retenção (Wet ponds): mantêm permanentemente um corpo d’água, com capacidade adicional para armazenamento de cheias;
- Bacias de detenção (Extended detention basins): armazenam temporariamente a água da chuva e liberam gradualmente para o sistema receptor;
- Charcos artificiais ou Banhados construídos (Constructed wetlands): também conhecidos como jardins filtrantes, áreas alagadas artificiais com vegetação aquática, que combinam retenção, tratamento e habitat ecológico;
- Trincheiras de filtração (Filter drains): funcionam como reservatórios subterrâneos temporários, armazenando a água entre os vazios do agregado e promovendo sua infiltração gradual, reduzindo o escoamento e auxiliando na recarga do lençol freático;
- Dispositivos de infiltração (Infiltration devices): promovem a entrada controlada da água da chuva no solo, com o objetivo de reduzir o volume de escoamento superficial;
- Pavimentos permeáveis (Pervious surfaces): permitem que a água infiltre diretamente no solo, reduzindo o escoamento superficial;
- Telhados verdes (Green roofs): absorvem a água de chuva, reduzem o volume de escoamento e melhoram o microclima urbano.

Como destacam Miguez et al. (2016), a incorporação de estratégias sustentáveis no planejamento urbano exige uma mudança de paradigma: da lógica do “escoamento rápido” para a valorização do ciclo natural da água dentro da cidade. Esse novo enfoque busca restaurar parte da capacidade do solo de absorver e filtrar a água, mitigando os impactos da impermeabilização e das ilhas de calor, e promovendo uma ocupação urbana mais equilibrada. Em síntese, as soluções sustentáveis representam um avanço frente às limitações das abordagens convencionais, constituindo instrumentos essenciais para o enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, crescimento urbano desordenado e degradação ambiental. Sua adoção não implica a substituição imediata das infraestruturas tradicionais, e sim sua complementação em um sistema urbano mais eficiente, integrado e resiliente.

A partir dessa perspectiva, torna-se imprescindível considerar o papel do Marco Legal do Saneamento Básico, instituído pela Lei nº 11.445/2007 e atualizado pela Lei nº 14.026/2020, como instrumento fundamental na organização, regulação e planejamento dos serviços públicos de saneamento, incluindo a drenagem urbana. O referido marco legal estabelece diretrizes nacionais para o abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais, integrando-os a um modelo de gestão mais eficiente, sustentável e orientado à universalização dos serviços. Sua atualização introduziu metas ambiciosas de cobertura até 2033, fortalecendo a regulação setorial e promovendo a regionalização dos serviços. Quanto à drenagem urbana e ao manejo de águas pluviais, o marco legal destaca a importância de soluções baseadas na natureza e da gestão integrada do território, reforçando a necessidade de articular as políticas de saneamento com as estratégias de desenvolvimento urbano e de adaptação às mudanças climáticas.

Vale destacar que esta nova perspectiva se torna ainda mais relevante quando é identificada no sistema de drenagem a contribuição irregular de esgoto sanitário. Nas principais cidades brasileiras, é recorrente a presença de ligações irregulares de esgoto nas galerias pluviais (Câmara Metropolitana do Rio de Janeiro, 2017). Ações no sistema de manejo de águas pluviais que considerem a necessidade de tratar estes efluentes combinados melhoram a qualidade de vida e do meio ambiente (Oliveira, 2022).

Diante da diversidade de soluções existentes para o manejo das águas pluviais, este estudo concentrará sua análise nas Soluções Baseadas na Natureza (SbN), por sua capacidade de integrar benefícios ecológicos, sociais e hidrológicos de forma sinérgica. O foco da pesquisa será o funcionamento de um sistema de jardins filtrantes, uma tipologia de SbN que utiliza macrófitas e substratos filtrantes para remover poluentes da água de forma natural e eficiente.

2.2 Soluções baseadas na natureza (SbN)

Novos termos e conceitos surgem periodicamente, refletindo a evolução do debate sobre sustentabilidade. Desde a concepção do "ecodesenvolvimento" até o lançamento do Relatório Brundtland, que apresentou o conceito de "desenvolvimento sustentável", presenciamos uma grande diversidade de interpretações sobre o tema. Existem variadas definições, algumas com foco na dimensão ambiental, outras que abordam a interação entre economia e meio ambiente, e ainda aquelas que direcionam à equidade social (NASCIMENTO, 2012). Esses conceitos têm o objetivo de criar um modelo de desenvolvimento que equilibre a preservação da natureza com uma qualidade de vida minimamente digna para a população (NASCIMENTO, 2012). Esse entendimento baseia-se na necessidade de garantir a continuidade da humanidade, especialmente diante do risco de ultrapassarmos os limites ambientais globais (ROCKSTROM, 2009).

O conceito de "Soluções Baseadas na Natureza" (SbN), conhecido em inglês como "Nature-Based Solutions", surge como uma abordagem abrangente, que engloba diversas estratégias consolidadas nos domínios dos serviços ecossistêmicos e do capital natural. Em outras palavras, as SbN fornecem simultaneamente benefícios ambientais, sociais e econômicos, além de contribuírem para o fortalecimento da resiliência. Essas soluções promovem a incorporação de uma maior quantidade e diversidade de elementos e processos naturais nos espaços urbanos, paisagens e ambientes costeiros, por meio de intervenções sistêmicas, adaptadas às condições locais e eficientes no uso de recursos (Comissão Europeia, 2024).

As ameaças ao espaço operacional seguro para a humanidade (ROCKSTROM, 2009) sempre existiram, considerando a presença constante de danos físicos e materiais resultantes de eventos climáticos, poluição, deslizamentos de terra, áreas contaminadas e

insegurança alimentar. O conceito de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) emerge como uma resposta aos crescentes desafios ambientais.

Kabisch et al. (2016) destaca que as SbN são apenas uma entre várias abordagens destinadas a promover a conservação, melhoria e restauração da biodiversidade e dos ecossistemas, com o objetivo de abordar diversas questões de forma simultânea. Por outro lado, Maes e Jacobs (2015) adotam uma perspectiva mais prática, definindo as SbN como estratégias que utilizam os serviços ecossistêmicos para reduzir o uso de energias não renováveis e aumentar o investimento em processos renováveis.

Indo contra as abordagens focadas em soluções tecnológicas para os desafios ambientais, Eggermont et al. (2015) enxergam as Soluções Baseadas na Natureza como parte de uma perspectiva alternativa que reconhece a complexidade do sistema socioecológico e a necessidade de sua gestão para garantir os serviços ecossistêmicos à humanidade. Dessa forma, as Soluções Baseadas na Natureza, referem-se ao uso da natureza para resolver problemas socioambientais de longo prazo.

Enquanto os serviços ecossistêmicos buscam benefícios imediatos para o bem-estar social e econômico, as SbN transcendem esse cenário, redirecionando o debate sobre a interação entre natureza e sociedade para alcançar objetivos como bem-estar social, redução da pobreza, desenvolvimento socioeconômico e governança participativa (EGGERMONT et al., 2015). Há um consenso sobre a necessidade de uma definição mais precisa do conceito de SbN (KABISCH et al., 2016), e Maes e Jacobs (2015) destacam a importância de uma definição mais refinada para orientar a pesquisa e a inovação no contexto dos serviços ecossistêmicos.

Cohen-Shacham et al. (2016) propõem que o termo SbN funcione como um conceito abrangente que engloba diversas abordagens relacionadas aos serviços ecossistêmicos. Os autores identificam cinco principais categorias de abordagens ecossistêmicas que podem ser vinculadas ao conceito de SbN: restauradoras (restauração ecológica, restauração da paisagem florestal e engenharia ecológica); por objetivo (adaptação e mitigação baseada no ecossistema; redução de risco de desastres com base no ecossistema; serviços de adaptação climática); infraestrutura (infraestrutura natural e infraestrutura verde); gerenciamento (gerenciamento integrado de zonas costeiras e

gestão de recursos hídricos); e proteção (abordagens para gerenciamento de áreas de conservação ou outras medidas de conservação por imobilização de área).

2.3 Jardins Filtrantes

Conhecidos como wetlands, são tecnologias baseadas na natureza para tratamento primário e secundário de efluentes domésticos, agrícolas e industriais, incluindo drenagem de minas, lixiviados de aterros e resíduos da indústria alimentícia e têxtil (DAVIS et al., 1995; VYMAZAL; KRÖPFELOVÁ, 2008) e se destaca das demais por utilizar a vegetação como um dos elementos do sistema. Trata-se de uma tecnologia de baixo custo, eficiente e sustentável, especialmente quando bem dimensionada e mantida (MELBOURNE WATER, 2005). Inspirados no funcionamento de zonas úmidas naturais, esses sistemas são projetados artificialmente para promover a filtragem, absorção e degradação de poluentes presentes na água, a partir da interação entre substratos, microrganismos e vegetação aquática (VYMAZAL, 1998; KADEC & WALLACE, 2009).

O princípio básico dos jardins filtrantes consiste na condução da água contaminada através de um leito filtrante composto por camadas de materiais como areia, brita e solo, vegetado com espécies adaptadas a ambientes úmidos, tais como *Typha domingensis* (taboa), *Canna indica* (cana-do-brejo) e *Cyperus papyrus* (papiro) (Sezerino et al., 2012). A vegetação desempenha papel fundamental na remoção de nutrientes, na oxigenação do sistema e no suporte ao desenvolvimento da microbiota responsável pela degradação da matéria orgânica (Brix, 1997).

Neste sistema as plantas “macrófitas” realizam a função de absorção de toda matéria orgânica, para sua alimentação (raízes), e realização dos processos fisiológicos a evapotranspiração (folhas), além de criar um ambiente dentro dos próprios jardins para o desenvolvimento de bactérias que realizam a quebra de partículas poluentes. As macrófitas aquáticas são fundamentais, pois aumentam a área superficial para crescimento microbiano, favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação (BRIX, 1994). Entre as principais características das macrófitas aquáticas destacam-se a capacidade de armazenar e promover o ciclo de nutrientes de forma mais rápida. (Caines,

1965). Neste sistema não há aplicação de agentes químicos artificiais ou microrganismos exógenos, além da recomposição vegetal da mata ciliar.

Segundo Vymazal (1998), os sistemas alagados construídos podem ser classificados em três tipologias principais, conforme o tipo predominante de plantas aquáticas predominantes: flutuantes, submersas e emergentes.

Na primeira tipologia, referente às plantas flutuantes, estas podem apresentar raízes fixadas no sedimento, com folhas que permanecem na superfície da lâmina d'água, ou podem ser plantas livres, sem fixação no substrato. A segunda tipologia abrange as plantas submersas, que geralmente possuem raízes fixas no fundo do sistema e permanecem totalmente submersas, embora também existam espécies livres e flutuantes submersas.

A terceira tipologia corresponde às plantas emergentes, caracterizadas por raízes fixadas no sedimento e folhas que se desenvolvem acima do nível da água. Essa última categoria pode ser subdividida em dois tipos distintos de fluxo: (1) fluxo superficial, no qual a água escoar sobre a superfície do substrato, e (2) fluxo subsuperficial, que pode ser do tipo horizontal, vertical ou híbrido, dependendo da direção e distribuição do escoamento dentro do sistema.

Do ponto de vista ambiental, os jardins filtrantes representam uma solução sustentável e resiliente, promovendo o reúso da água, a mitigação de enchentes e o controle da poluição difusa. Esses sistemas têm sido recomendados por políticas públicas de saneamento e drenagem urbana sustentável, especialmente no contexto de cidades que buscam alinhar infraestrutura verde com adaptação às mudanças climáticas (Brasil, 2019; UN-Habitat, 2020).

O projeto dos Jardins Filtrantes estudado, se trata de um conjunto de Wetlands, que tem como objetivo a revitalização da Lagoa de Piratininga, atuando nos rios Cafubá, Jacaré e Arrozal. O projeto originou-se no desenvolvimento do Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis, um parque público localizado na margem da Lagoa de Piratininga de Niterói, projetado para aproximar os visitantes do meio natural em um contexto urbano, por meio de soluções baseadas na natureza.

A implantação desses sistemas tem sido objeto de estudo e esforços de especialistas, com o intuito de compreender sua eficácia e aplicabilidade em contextos urbanos. Por meio desta pesquisa, visa-se investigar e analisar a eficiência do sistema de Jardins Filtrantes no ponto de desague do Rio Cafubá, afluente da Lagoa de Piratininga, em um contexto precipitação intensa e mudanças climáticas.

2.4 Mudanças Climáticas e seus efeitos sobre o manejo de águas pluviais

As mudanças climáticas dizem respeito a alterações nos padrões do clima ao longo do tempo, principalmente nas variações habituais de temperatura da Terra. Segundo as Nações Unidas do Brasil [s.d.], essas mudanças podem ocorrer por causas naturais, como variações no ciclo solar, períodos de glaciação, erupções vulcânicas e outros fenômenos geológicos. No entanto, como destaca Silva (2015), também podem ser causadas por ações humanas, especialmente aquelas ligadas ao uso intensivo de recursos naturais e à emissão de gases de efeito estufa.

As mudanças climáticas, quando relacionadas às ações humanas, representam uma das principais ameaças globais do século XXI, afetando de forma transversal os sistemas naturais e humanos. A era da tecnologia faz com que o homem modifique continuamente e de forma acelerada a paisagem e induz alterações ambientais inéditas na natureza (SILVA, 2015). O crescimento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, decorrente de atividades como o desmatamento, a queima de combustíveis fósseis e a intensificação das atividades industriais, promovidos pelo homem, tem provocado alterações significativas nos padrões climáticos ao redor do mundo. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) aponta que a temperatura média global já aumentou cerca de 1,1°C em relação aos níveis pré-industriais, com projeções de aumento ainda mais acentuado até o final do século, caso não haja mitigação efetiva.

Em relação à quantificação dos efeitos das mudanças climáticas em termos de aumento das precipitações, o IPCC traz como evidência um relatório apresentando estimativas relacionadas às alterações no regime de chuvas sob diferentes cenários de aumento da temperatura global associados às mudanças climáticas, como demonstrado na Figura 2.1, elaborada por Vallejos et al. (2022), adaptada da publicação original, que indica um aumento na intensidade das precipitações de 10,5% a 30,2% para chuvas com tempo de retorno de 10 anos.

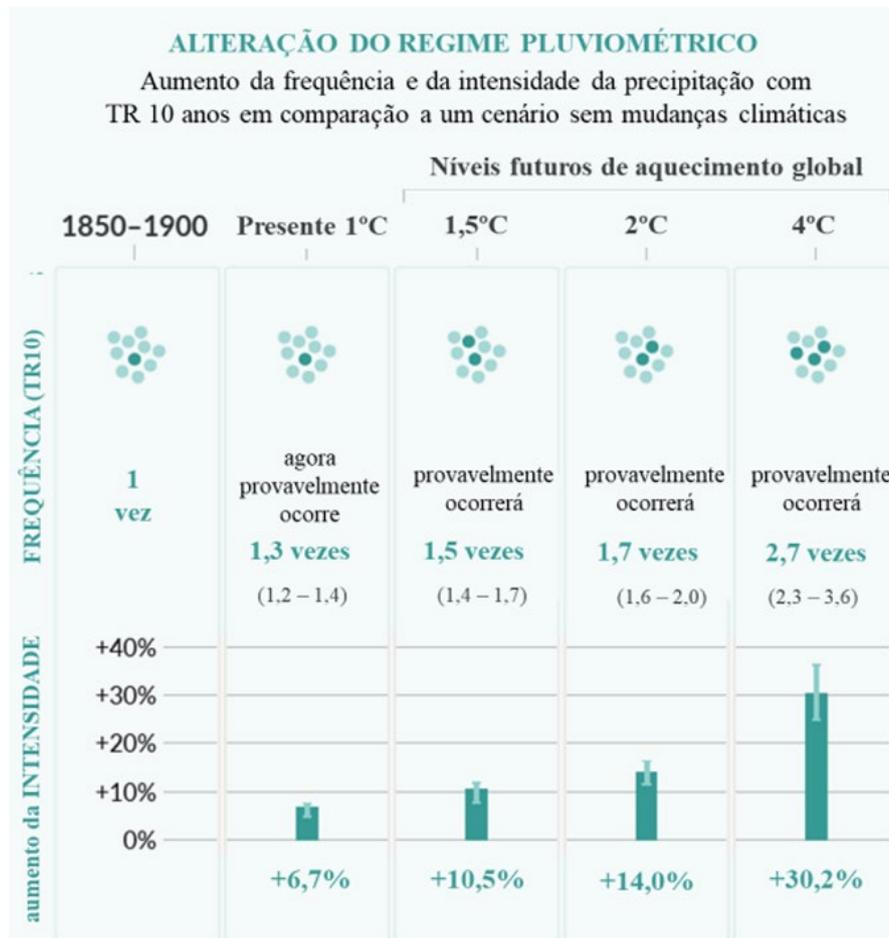


Figura 2.1 Alteração da frequência e intensidade da precipitação para diversos cenários de aumento da temperatura global devido a mudanças climáticas. Fonte: IPCC (2021), IBGE (2023), adaptado.

Ainda de acordo com projeções do IPCC (2021) e IBGE (2023) o nível médio do mar pode apresentar uma elevação entre 0,30 e 1 metro até o final deste século, variando conforme os cenários de emissões futuras de gases de efeito estufa.

Em relação a variação de temperatura global, utiliza-se como referência a figura 2.2, que apresenta as trajetórias de mudança da temperatura média global da superfície terrestre em graus Celsius acima do nível pré-industrial, no período de 1960 a 2100, considerando diversos cenários socioeconômicos (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) que traduzem diferentes níveis de emissões de gases de efeito estufa e políticas de mitigação.

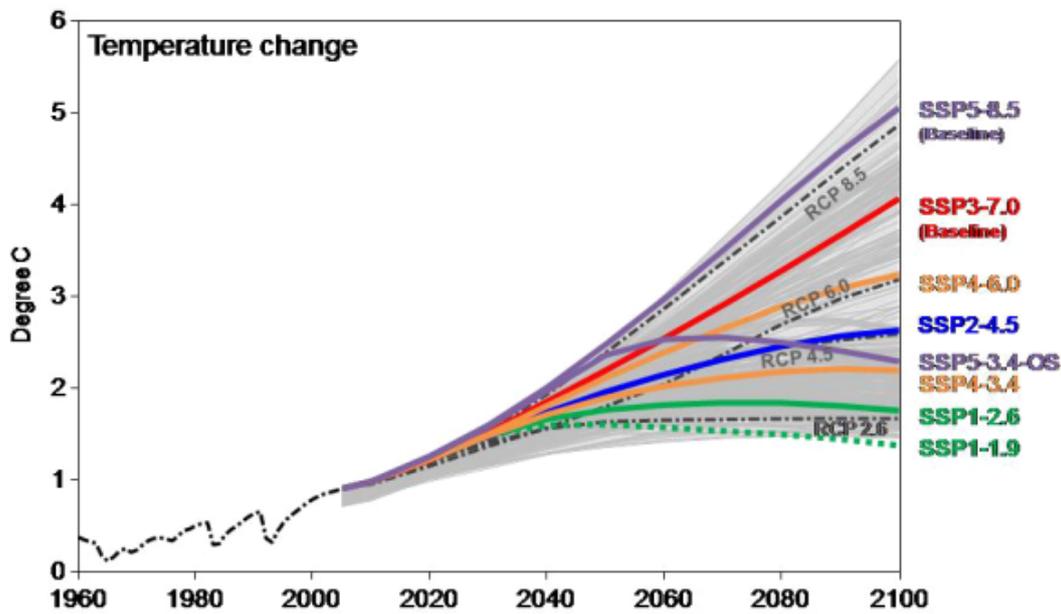


Figura 2.2 Evolução da Temperatura Média Global (1960–2100). Fonte: Riahi et al. (2016).

A dispersão das curvas (áreas sombreadas) reflete a incerteza inerente à transição entre dados observados e projeções modeladas e ressalta o intervalo provável de cada trajetória. De modo geral, quanto maior o compromisso com redução de emissões (cenários “1.9” e “2.6”), mais achatada e tardia é a curva de aquecimento, enquanto os cenários de alta emissão resultam em crescimento quase exponencial da temperatura, podendo resultar em um aquecimento de 4,5-5°C até 2100.

Esse panorama tem provocado intensificação de eventos extremos, como secas prolongadas, ondas de calor, ciclones e chuvas intensas, impactando diretamente a segurança hídrica, alimentar e energética dos países. No contexto brasileiro, as mudanças climáticas assumem particularidades relacionadas à sua grande extensão territorial, diversidade climática e desigualdades socioeconômicas. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) evidenciam que os principais biomas brasileiros vêm sendo afetados de forma desigual: enquanto o semiárido nordestino enfrenta maior escassez hídrica, a Amazônia sofre com o aumento de queimadas e a alteração do regime de chuvas. A intensificação do processo de urbanização, com expansão desordenada e impermeabilização crescente do solo, agrava ainda mais esses efeitos.

A análise de séries históricas de temperatura no Brasil, conforme evidenciado por Perez et al. (2020), indica um aumento contínuo da média anual, elevando a evapotranspiração e alterando o regime hidrológico das bacias. Com isso, a ocorrência de precipitações concentradas em curtos períodos tornou-se mais comum, o que representa um desafio significativo para o manejo das águas pluviais. Os sistemas convencionais de drenagem urbana, concebidos para escoar rapidamente o excedente hídrico, tornam-se insuficientes diante da intensidade e imprevisibilidade dos eventos atuais. Silva (2015) destaca que a incapacidade dos sistemas tradicionais em lidar com volumes crescentes de água tem resultado em alagamentos, erosões, assoreamentos e contaminações, especialmente nas regiões metropolitanas. A sobrecarga dos sistemas de drenagem, aliada à deficiência no planejamento urbano, intensifica os impactos sociais, sobretudo em comunidades mais vulneráveis, que muitas vezes ocupam áreas de risco ou sem infraestrutura adequada. Adicionalmente, ao provocarem possíveis aumentos nos volumes de precipitação, podem exceder a capacidade hidráulica das redes e intensificar os extravasamentos e contribuições irregulares entre as redes de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário (Oliveira, 2022). Por outro lado o esperado aumento do nível do mar ocasionado pelas mudanças climáticas intensifica o efeito de remanso nas redes, limitando a sua capacidade hidráulica, principalmente em regiões costeiras. Além dos efeitos físicos, as mudanças climáticas afetam também a gestão institucional das águas. A complexidade crescente dos fenômenos meteorológicos exige estratégias integradas de planejamento, monitoramento e adaptação. As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) emergem como alternativa sustentável e eficaz nesse cenário. De acordo com a Nações Unidas do Brasil (2022), estruturas como jardins de chuva, bacias de retenção, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis contribuem não apenas para o controle do escoamento superficial, mas também para a recarga do lençol freático, a melhoria da qualidade da água e a redução das ilhas de calor urbanas.

No Brasil é urgente a reavaliação dos paradigmas de urbanização e gestão hídrica, como investimentos em infraestrutura verde, educação ambiental e políticas públicas intersetoriais, que precisam ser tratadas como prioridade. Conforme apontado por Silva (2015) e Perez et al. (2020), adaptar as cidades às novas condições climáticas é essencial para garantir resiliência urbana, proteção ambiental e justiça socioespacial. A Tabela 1

resume os principais impactos das mudanças climáticas sobre o manejo de águas pluviais, por Perez et al. (2020).

Tabela 1 Impactos das Mudanças Climáticas no Manejo de Águas Pluviais. Fonte: Silva (2015); Perez et al. (2020), adaptado.

IMPACTO	DESCRIÇÃO
AUMENTO DA FREQUÊNCIA DE CHUVAS INTENSAS	Elevação da probabilidade de enchentes urbanas
ALTERAÇÕES NA SAZONALIDADE	Dificuldade de previsão e planejamento da infraestrutura
EROSÃO E ASSOREAMENTO	Degradação de canais, rios e reservatórios urbanos
SOBRECARGA DE SISTEMAS CONVENCIONAIS	Incapacidade dos sistemas tradicionais de drenagem
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS	Mistura com esgotos e águas residuais, principalmente em áreas vulneráveis

O enfrentamento das mudanças climáticas requer uma abordagem coordenada entre ciência, gestão pública e engajamento social. No Brasil, país que abriga uma das maiores reservas hídricas do planeta, torna-se imperativo transformar o modo como se planeja e executa a gestão das águas urbanas, considerando os cenários climáticos futuros e as desigualdades existentes. O manejo das águas pluviais deve ser tratado como eixo central das estratégias de adaptação climática, contribuindo para cidades mais seguras, sustentáveis e inclusivas.

3 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo será apresentada a caracterização da Lagoa de Piratininga, situada no município de Niterói/RJ, considerando seus aspectos geomorfológicos e climáticos, o uso e ocupação do solo da região e os eventos pluviométricos extremos antecedentes na área de estudo, bem como o evento pluviométrico que foi estudado no modelo hidrodinâmico, como evento de validação das simulações. Inicialmente, será realizada a caracterização geral do município de Niterói, a fim de contextualizar sua inserção territorial, social e ambiental. Em seguida, será detalhada a região da Lagoa de Piratininga e o Parque Orla Piratininga, que constitui o objeto de estudo deste trabalho.

3.1 Localização

A cidade de Niterói está situada na margem leste da Baía de Guanabara entre o mar e as encostas ocidentais do maciço litorâneo fluminense, dentro da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro, na região Sudeste do país. Faz divisa ao norte com o município de São Gonçalo, ao sul com o Oceano Atlântico, à leste com o município de Maricá e à oeste com a Baía de Guanabara.

Mapa de localização de Niterói

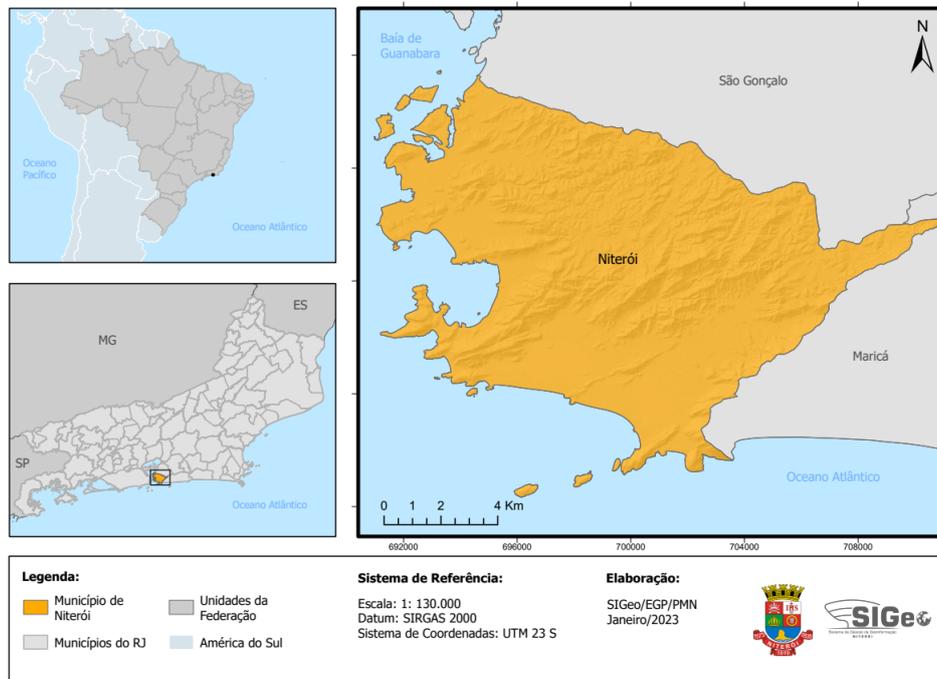


Figura 3.1 Mapas de localização de Niterói. Fonte: Prefeitura de Niterói

3.2 Geologia e geomorfologia

Niterói possui um relevo escarpado, com maciços predominando na porção sudeste do município (Serras da Tiririca, do Malheiro e do Calaboca) e uma planície costeira pouco pronunciada, acompanhando os limites com a baía da Guanabara e o oceano Atlântico. O relevo é fator preponderante na ocupação urbana, constituindo uma barreira natural à presença humana. Deste modo, a planície costeira é a área mais densamente povoada do município, apresentando centenas de prédios residenciais e comerciais.

No que se refere à declividade, a distribuição de frequência das declividades mostra que 66% das declividades correspondem a declividades entre 0 e 20°. Estas baixas declividades correspondem as presentes nas áreas de planície e a superfícies aplainadas no topo dos morros.

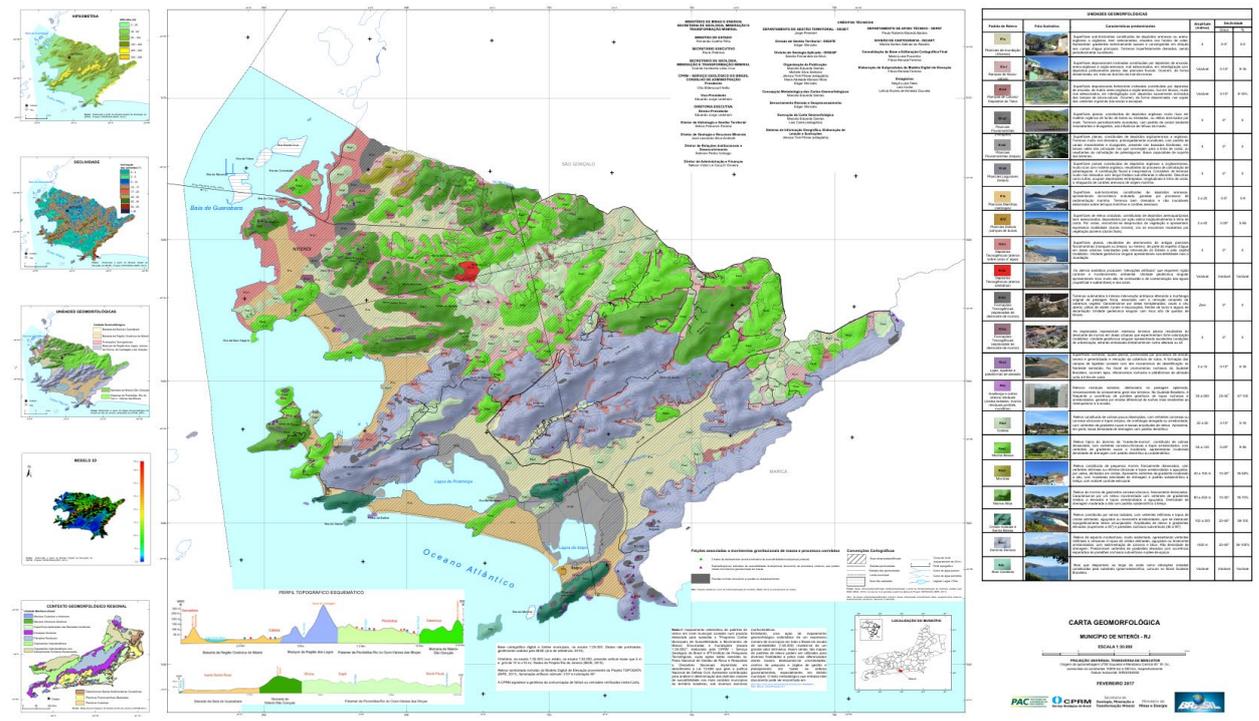


Figura 3.2 Mapa geomorfológico de Niterói. Fonte: SIGEO, Prefeitura de Niterói

3.3 Clima

A caracterização do clima no município de Niterói (Rio de Janeiro), é marcada por um clima tropical com forte influência oceânica, caracterizado por temperaturas amenas ao longo do ano e pela ocorrência de chuvas frequentes, especialmente durante os meses de verão. Essas condições climáticas impactam profundamente os recursos hídricos locais, desempenhando um papel crucial na determinação da disponibilidade e qualidade da água. Os elementos climáticos, como a quantidade e intensidade das precipitações e as variações de temperatura, não apenas influenciam as características físicas e químicas da água, mas também desempenham um papel preponderante na dinâmica dos poluentes presentes no ambiente.

No inverno, a presença de frentes frias oriundas do avanço de massas polares ocasiona quedas bruscas de temperatura, amenizadas pela maritimidade. Neste período a estiagem é bastante comum, podendo ficar semanas sem chover devido a essa presença de massas secas de origem polar e seus centros de alta pressão atmosférica que, por sua vez, divergem os ventos e dificultam a formação de nuvens de chuva.

No verão, a influência de massas equatoriais e dos ventos provenientes da Amazônia formam um canal de umidade entre o Norte e o Sudeste, determinando o clima quente e úmido desta época do ano com suas típicas tempestades vespertinas. As manhãs costumam ser calorosas e abafadas, durante a tarde costuma-se ter formação de tempestades com ventos fortes e pela noite o tempo volta a abrir. Há picos comuns de trinta graus centígrados e, devido à alta umidade, sensações térmicas superiores.

O outono é marcado por dias limpos de céu azul e temperaturas frescas, principalmente pela manhã. As massas polares começam a atingir a região com significância e as temperaturas caem progressivamente.

A primavera é chuvosa, pois ainda são sentidas frentes frias tardias deixadas pelo inverno, a temperatura não sobe muito, até se aproximar o mês de dezembro (verão). As massas úmidas equatoriais oriundas da Amazônia também começam a agir, causando uma forte instabilidade atmosférica, sendo o tempo modificado várias vezes em um mesmo dia.

O gráfico apresentado na Figura 3.3 demonstra o intervalo diário de temperaturas registradas ao decorrer do ano de 2024 (barras cinza), bem como máximas (traços vermelhos) e mínimas (traços azuis), posicionadas acima da máxima (linha vermelha esmaecida) e mínima (linha azul esmaecida) diária média, com faixas do percentil 25 e do 75 e do 10 ao 90.

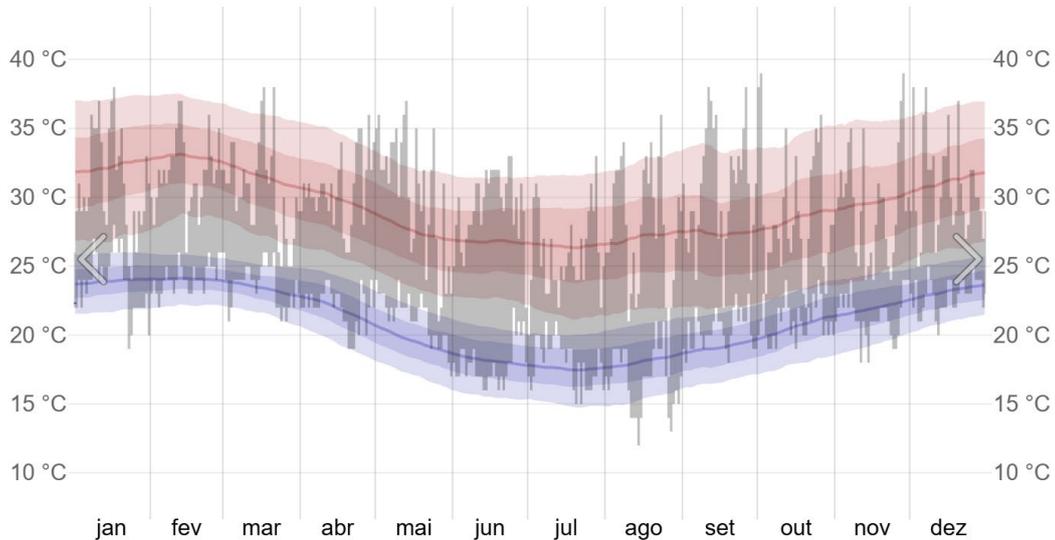


Figura 3.3 Histórico de Temperatura em Niterói em 2024. Fonte: Weather Spark

Na Figura 3.4 é apresentada a estimativa de precipitação mensal para a cidade durante o ano de 2024, onde os dados foram disponibilizados pela Defesa Civil de Niterói.

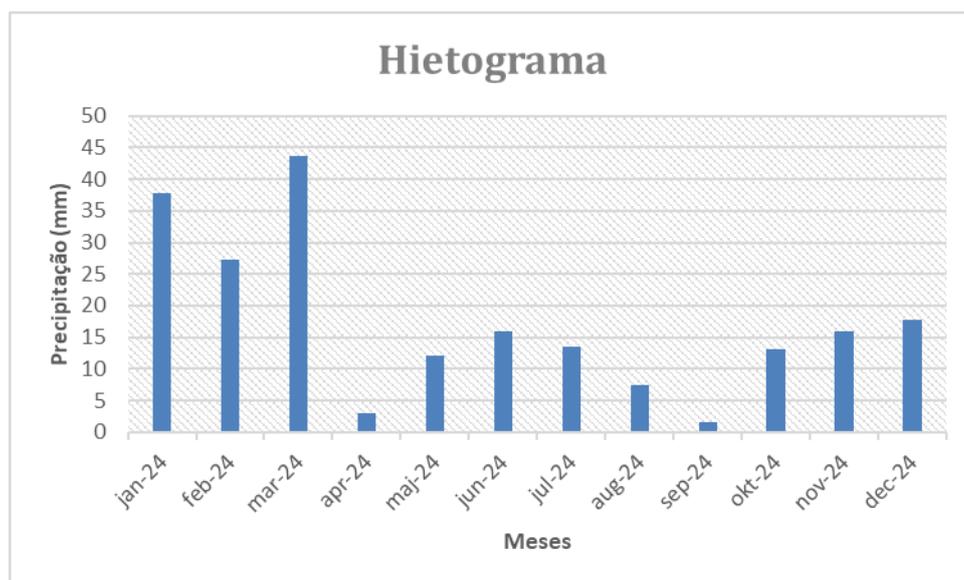


Figura 3.4 Histórico de Precipitação em Niterói em 2024. Fonte: Defesa Civil de Niterói, adaptado.

3.4 Vegetação

Originalmente, o território do município de Niterói era caracterizado por uma grande diversidade de formações vegetais, predominando ecossistemas como a Mata Atlântica, campos inundáveis, vegetação de restinga e manguezais. A cobertura florestal nativa estendia-se por áreas de relevo variado, desde as colinas e maciços costeiros até as planícies litorâneas, abrangendo altitudes desde o nível do mar até os pontos mais elevados do município.

Atualmente, as áreas remanescentes de floresta encontram-se associadas a regiões de relevo em áreas elevadas e de difícil acesso, como o Parque Estadual da Serra da Tiririca, as Serras Grande e do Malheiro, e os Morros do Cantagalo e do Jacaré, além dos Morros da Viração e do Santo Inácio, onde estão situados, respectivamente, o Parque da Cidade e o Parque Ecológico Darcy Ribeiro.

A vegetação de restinga, antes mais extensa, está atualmente restrita a áreas pontuais como a Praia de Itacoatiara, a Duna Grande, a Praia de Cambinhas, a margem oeste da Laguna de Itaipu, a prainha de Piratininga e a Praia do Forte Imbuhy. Quanto aos manguezais, estes foram amplamente eliminados, restando apenas pequenos brejos, áreas alagadiças ou pantanosas, nas regiões adjacentes às Lagunas de Piratininga e Itaipu.

Em termos de cobertura vegetal atual, dados da Prefeitura de Niterói indicam que as matas densas representam aproximadamente 9,6% do território municipal, enquanto as capoeiras, formações secundárias resultantes da regeneração da vegetação, correspondem a cerca de 18,5% da área total.

3.5 Histórico de ocupação

O município de Niterói, na região Metropolitana do Rio de Janeiro foi fundado em 1573, sendo uma das mais importantes cidades fluminenses. Nos séculos XVII e XVIII, com o nome de Vila da Praia Grande, teve destacada importância na produção sucroalcooleira e pesca. Historicamente, o primeiro núcleo de povoação deu-se na região de São Lourenço, expandindo-se na direção das freguesias de Praia Grande, Icaraí, São Gonçalo e Jurujuba. No século XIX a cidade ganhou maior importância, especialmente após a transferência da capital da província do Rio de Janeiro para Niterói, em 1834. A condição de capital da

província fez com que Niterói se desenvolvesse e recebesse investimentos e planos urbanísticos. A cidade modernizou-se e tornou-se uma das primeiras cidades brasileiras com iluminação pública, abastecimento de água e bondes elétricos, entre outras inovações. Permaneceu como capital do estado até a fusão dos estados da Guanabara e do Rio de Janeiro. Por ter ocupado o posto de antiga capital do estado, Niterói abriu diversas rotas de acesso para lugares até então com menos relevância no cenário estadual.

A criação da ponte Rio-Niterói, em 1974, fortaleceu economicamente o Leste Fluminense e, conseqüentemente, a Região dos Lagos, dada a facilidade do acesso ofertado pela construção da ponte. No século XX, com a industrialização e a urbanização acelerada da região metropolitana do Rio de Janeiro, Niterói passou a atrair um número crescente de moradores, transformando-se em uma cidade dormitório para muitos que trabalhavam na capital fluminense. Ao mesmo tempo, consolidou-se como um importante centro educacional, cultural e de serviços.

Atualmente, Niterói é o quinto município mais populoso do Estado, contando com 481.749 habitantes (IBGE, 2022) e densidade demográfica de 3601,67 hab/km². Possui 52 bairros, avistados na Figura 3.5, em cinco regiões administrativas: Praias da Baía, Norte, Pendotiba, Oceânica e Leste (NITERÓI, 2008). No período de 1991- 2000, a população de Niterói teve uma taxa média de crescimento anual de 0,60%, passando de 436.155 em 1991 para 459.451 em 2000. Em 2000, a população do município representava 3,19% da população do Estado, e 0,27% da população do país (PNUD, 2008). Apesar de possuir o melhor Índice de Desenvolvimento Humano do Estado do Rio de Janeiro (Tabela 1), 34% do total de domicílios niteroienses localiza-se em comunidades (PNUD, 2008). O crescimento demográfico nos últimos 30 anos foi de 41,70%, tornando o município densamente povoado e propenso a ocupações irregulares em áreas de vegetação e de conservação ambiental.

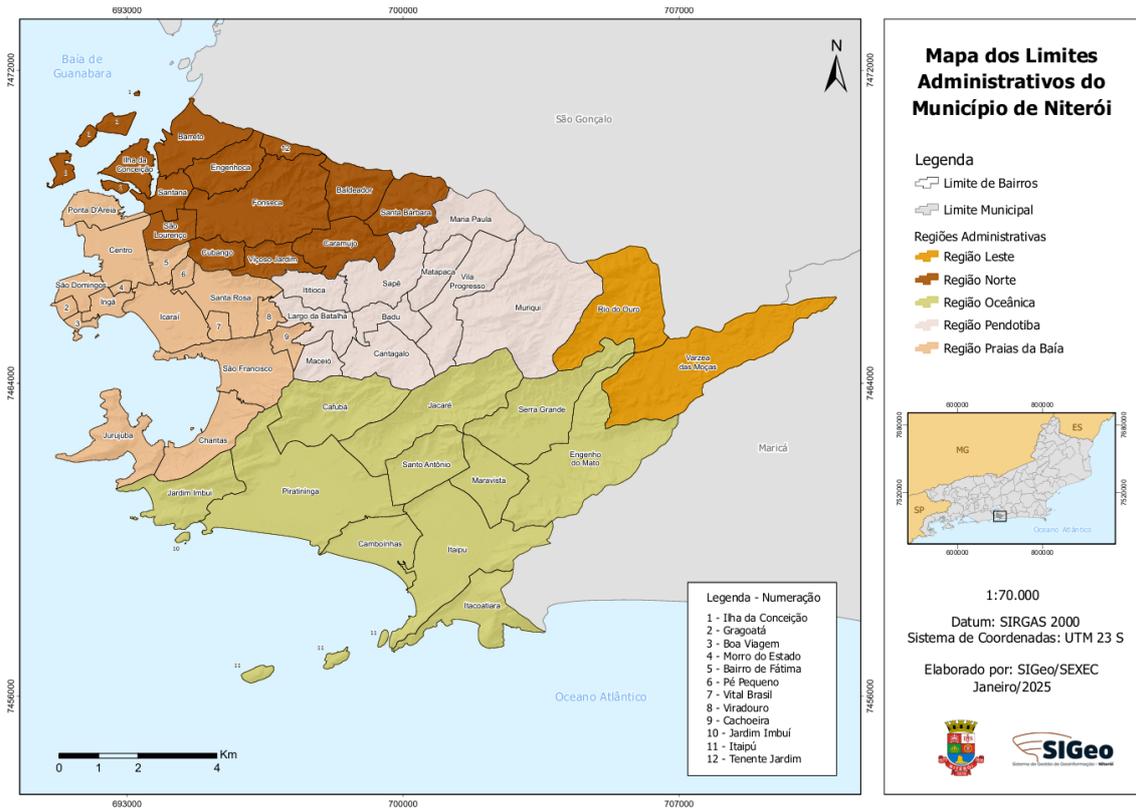


Figura 3.5 Divisão dos bairros de Niterói. Fonte: SIGEO, Prefeitura de Niterói

Na Figura 3.6 visualiza-se a evolução da população total de Niterói, de 1970 a 2022.

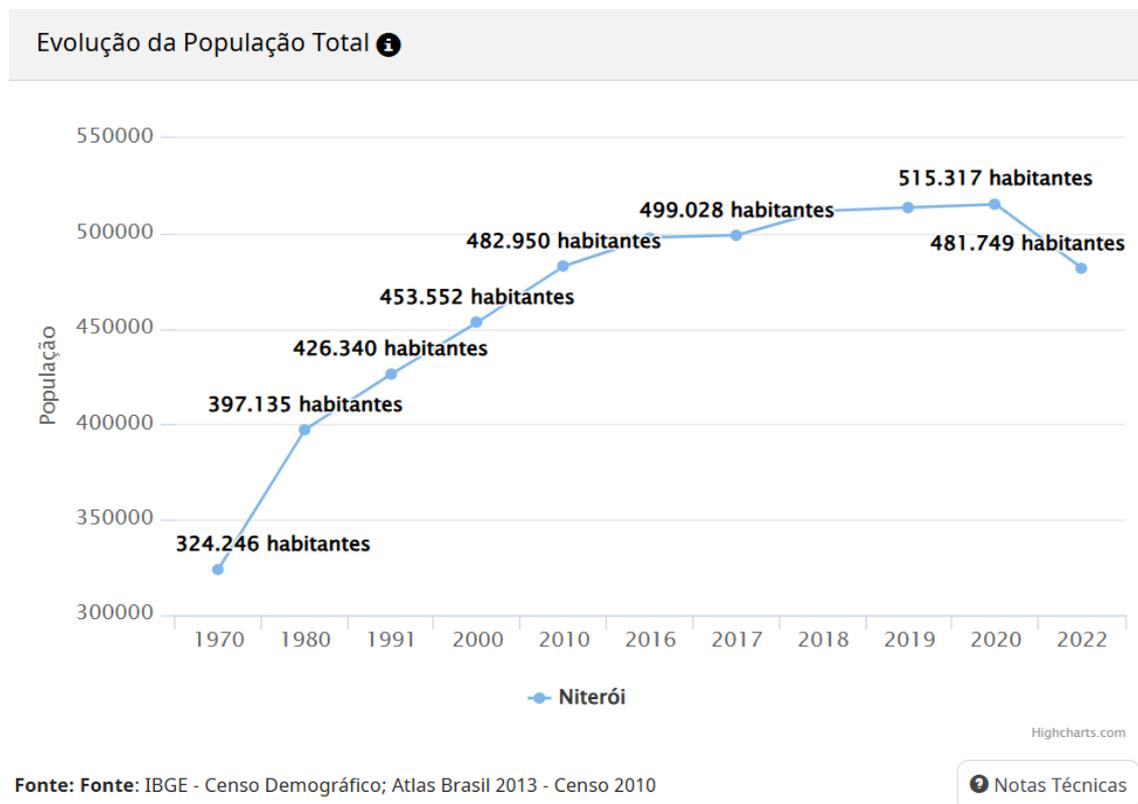


Figura 3.6 Evolução da População Total de Niterói. Fonte: IBGE

3.6 Saneamento Básico

No início do século XX, Niterói enfrentava desafios comuns às cidades em processo de urbanização, como a falta de infraestrutura adequada para o abastecimento de água e o esgotamento sanitário. Durante a gestão do prefeito Feliciano Sodré (1911-1914), foram implementadas obras significativas de saneamento, incluindo a implantação de redes de esgoto em bairros como São Lourenço, Fonseca e Ponta d'Areia.

Em 1999, a cidade deu um passo importante ao firmar uma Parceria Público-Privada (PPP) com a concessionária Águas de Niterói, responsável pelos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Na época, apenas 72% da população tinha

acesso à água tratada, e 35% contavam com coleta de esgoto. A partir dessa parceria, foram realizados investimentos significativos, resultando na ampliação da cobertura dos serviços e na melhoria da qualidade do saneamento na cidade.

Atualmente, Niterói é reconhecida como uma das cidades com melhor desempenho em saneamento básico no Brasil. De acordo com dados do Instituto Trata Brasil, a cidade ocupa a 6ª posição no ranking nacional de saneamento, sendo a primeira colocada no estado do Rio de Janeiro.

Os indicadores refletem os avanços alcançados: 100% da população é atendida com abastecimento de água tratada, 95,5% possuem acesso à coleta de esgoto, e 100% do esgoto coletado é devidamente tratado. Além disso, a cidade apresenta um índice de perdas na distribuição de água de 24,76%, inferior à média nacional de 37,8%.

Entre 2018 e 2022, foram investidos mais de R\$ 200 milhões em melhorias no setor, incluindo a ampliação de reservatórios de água, construção de novas adutoras e modernização de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) em bairros como Sapê, Caramujo e Jurujuba (PREFEITURA DE NITERÓI, 2024).

A trajetória de Niterói no setor de saneamento básico evidencia o impacto positivo de políticas públicas bem planejadas e parcerias eficazes entre o setor público e privado. Os investimentos contínuos e o compromisso com a universalização dos serviços colocam a cidade como referência nacional, contribuindo para a melhoria da saúde pública, preservação ambiental e qualidade de vida da população.

3.7 Parque Orla Piratininga

O Parque Orla Piratininga encontra-se na Lagoa de Piratininga, situada no município de Niterói-RJ. Constitui-se como uma lagoa costeira, encontrando-se separada do oceano por uma barreira e inserida em um contexto de áreas urbanizadas. É possível visualizar a localização exata da lagoa na Figura 3.7. O sistema Piratininga-Itaipu é ligado através do canal de Camboatá e apresenta conexão com o oceano em ambos os lados. Além disso, a lagoa recebe aporte de água doce proveniente de cinco rios/córregos, sendo eles: Viração, Cafubá, Arrozal, Jacaré e Santo Antônio, conforme Figura 3.8.

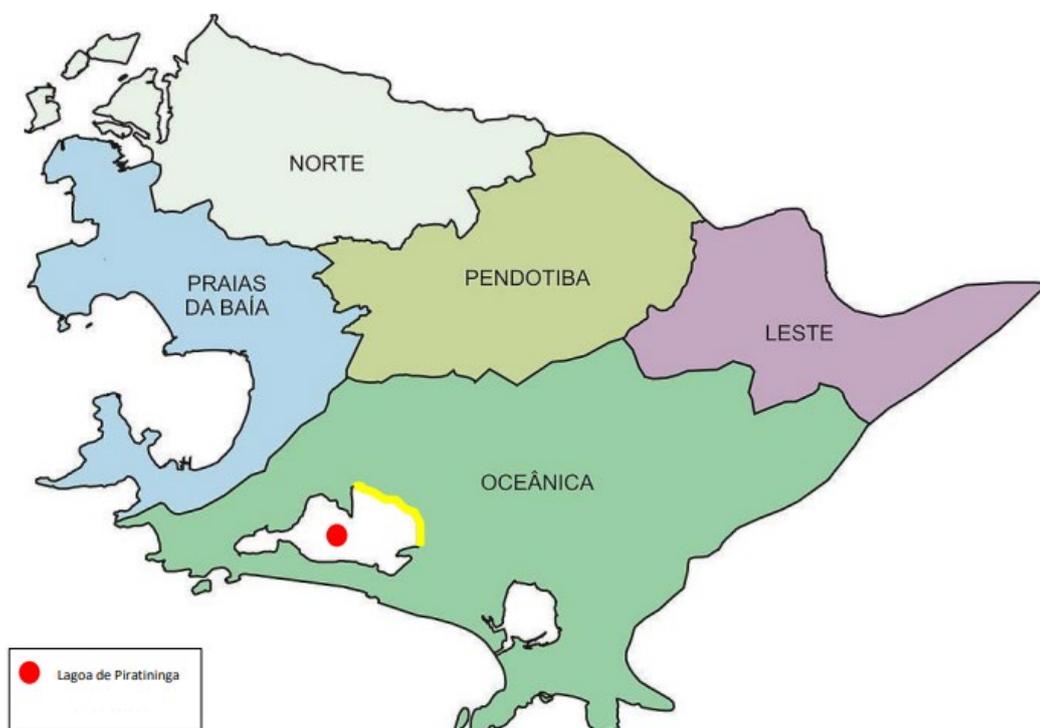


Figura 3.7 Localização da Lagoa de Piratininga no município de Niterói. Fonte: Prefeitura de Niteroi

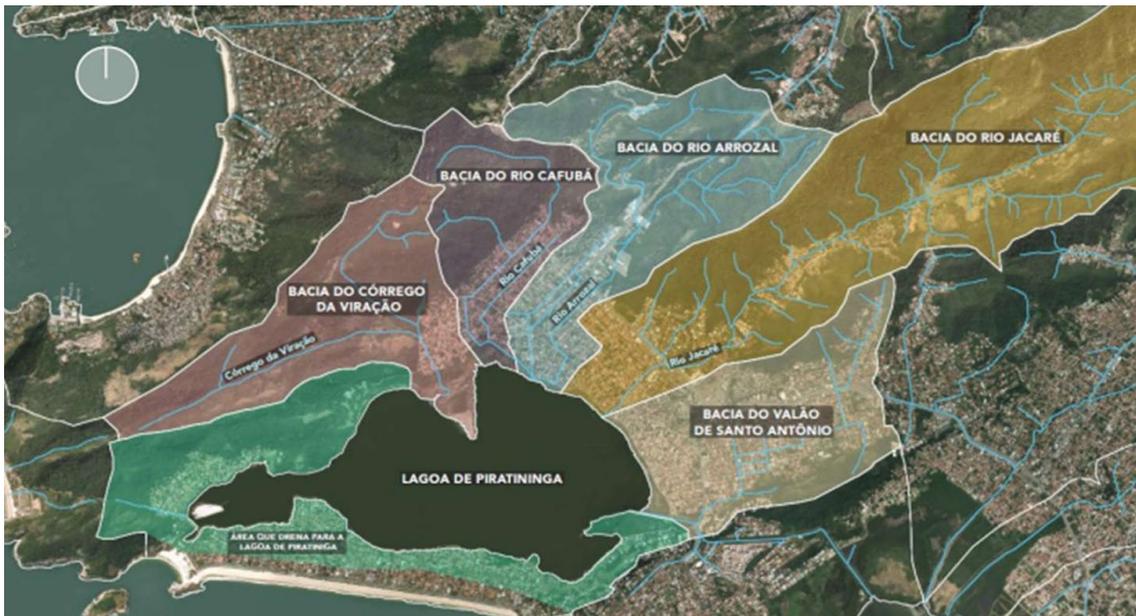


Figura 3.8 Representação dos Rios e suas Microbacias Hidrográficas que drenam para a Lagoa de Piratininga.
Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga

A saúde ecológica da Lagoa de Piratininga é definida pela presença de um conjunto de ambientes ecológicos existentes na interface entre a água e a terra. São áreas úmidas, importantes ecossistemas em termos de biodiversidade, com papel funcional de proteção das margens da Lagoa: brejos, matas ciliares, manguezais, entre outros. Por agregar características distintas de diversos ecossistemas diferentes, as áreas úmidas possuem grande relevância ambiental para a manutenção da biodiversidade, tanto de espécies endêmicas da região, como é o caso do lagarto de vidro (*Brasiliscincus agilis*), quanto de espécies terrestres. Além disso, têm papel importante no ciclo hidrológico, já que os locais de áreas úmidas podem ampliar a capacidade de retenção de água dos corpos hídricos, além de serem naturalmente, locais propícios para promover o múltiplo uso das águas pelos seres humanos (PREFEITURA DE NITERÓI, 2020).

O Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis (POP) é um parque público localizado na margem da Lagoa de Piratininga, projetado para aproximar os visitantes do meio natural em um contexto urbano, por meio de soluções baseadas na natureza. O projeto do Parque Orla Piratininga é reconhecido como o maior projeto de soluções baseadas na natureza (SbN) do Brasil. O parque possui 680 mil metros quadrados, conta com 10 píeres, 17

praças, 3 mirantes e um centro ecocultural voltado para educação ambiental (PRO SUSTENTÁVEL, PREFEITURA DE NITERÓI). Além da implementação dos jardins filtrantes, objeto de estudo do trabalho, promoveu a requalificação de algumas áreas, com obras de drenagem, pavimentação e saneamento.

O Parque Orla Piratininga (POP), localizado no município de Niterói, tem sido amplamente reconhecido por sua contribuição às práticas sustentáveis, tendo recebido premiações tanto em âmbito nacional quanto internacional. Para além da sua função ecológica, o POP promove a recuperação de uma área degradada, oferecendo novos espaços para cultura e esporte. Segundo informações da Prefeitura de Niterói, o projeto contribui ainda para a promoção da justiça ambiental, ao garantir acessibilidade a pessoas de diferentes classes sociais. Dessa forma, uma área antes inóspita foi transformada em um espaço inclusivo, de convivência e integração, reafirmando o potencial das infraestruturas verdes como instrumentos de requalificação ambiental e social dos territórios urbanos.



Figura 3.9 Representação da localização de cada uma das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024)

As intervenções realizadas ganham destaque quando visualizadas por imagens de drone, comparando o antes e depois de concluídas. Na Figura 3.10, observa-se a nova ciclovia promovida pelo projeto, além da pavimentação das ruas ao redor.



Figura 3.10 Antes e depois das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024)

Já com a Figura 3.11, é possível destacar as áreas de convívio, as quadras construídas para uso da população, e o prédio referente ao centro ecocultural.



Figura 3.11 Antes e depois das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024)

A Figura 3.12 retrata o destaque do Parque Orla Piratininga, o sistema de Jardins Filtrantes, estudado por esse presente trabalho.



Figura 3.12 Antes e depois das intervenções do projeto. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024)

O POP conta com 35.290m² de Jardins Filtrantes. O sistema atua nos rios Cafubá, Jacaré e Arrozal e a escolha desses 3 rios em relação aos disponíveis é justificada pela vazão mínima para a atuação do projeto e pela disponibilidade de área livre para sua implantação. O estudo de caso se concentra em analisar o funcionamento do sistema de Jardins Filtrantes aplicado especificamente no Rio Cafubá.

O sistema dos Jardins Filtrantes destinados ao Rio Cafubá é composto por três etapas principais e sequenciais: o Vertedouro, a Bacia de Sedimentação e os três Jardins Filtrantes, como observado na Figura 3.13.



Figura 3.13 Sistema esquematizado dos Jardins Filtrantes da Lagoa de Piratininga. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024)

3.7.1 Etapas especificadas dos Jardins Filtrantes:

3.7.1.1 Vertedouro

Os vertedouros, cuja estrutura hidráulica de acúmulo de água será chamada de bacia de recepção no presente trabalho, foram estruturados com gabiões argamassados, assentados sobre base de colchão Reno, sendo estes confeccionados com arames de alta resistência, revestidos com ligas metálicas especiais e adicionalmente protegidos com revestimento plástico, a fim de garantir maior durabilidade e resistência à corrosão em ambientes úmidos. Essas estruturas cumprem a função fundamental de desviar o fluxo das águas provenientes dos rios contribuintes, redirecionando-o adequadamente para os sistemas de tratamento implantados (Bacias de sedimentação e Jardins Filtrantes). Atuam, também, no controle do volume de água que adentra o sistema, regulando a vazão de forma a garantir o tempo de detenção hidráulica necessário para a eficiência do sistema.



Figura 3.14 Construção do Vertedouro e da bacia de recepção. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga



Figura 3.15 Vertedouro construído e bacia de recepção em funcionamento. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga



Figura 3.16 Vertedouro e bacia de recepção construídos e em funcionamento. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga

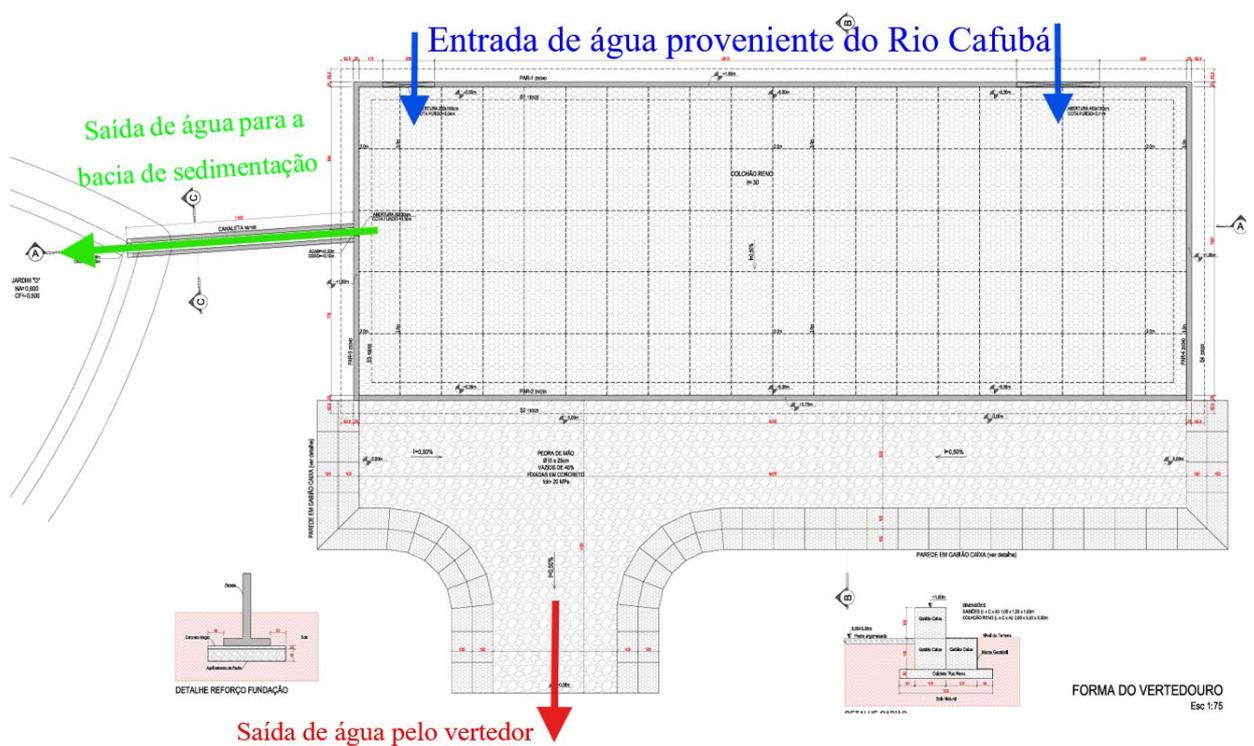


Figura 3.17 Planta vertedouro e bacia de recepção. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga, adaptado.

3.7.1.2 _Bacias de Sedimentação (chamada de “Bacia D”)

As bacias de sedimentação foram implantadas com objetivo de mitigar a poluição difusa que escoar para a lagoa, principalmente através dos rios contaminados. Os principais contaminantes presentes nos rios que desaguam na Lagoa de Piratininga são sólidos provenientes da lixiviação de pisos e da erosão das margens, aliados a alta carga orgânica proveniente do lançamento irregular de esgoto doméstico e o descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos. Essas estruturas desempenham papel fundamental na retenção e decantação dos sólidos suspensos, promovendo a remoção de materiais que contribuem diretamente para o assoreamento da lagoa. Atuam como unidades de pré-tratamento, preparando as águas para serem lançadas aos Jardins Filtrantes.



Figura 3.18 Bacia de Sedimentação D. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga



Figura 3.19 Bacia de Sedimentação D. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga

3.7.1.3 Jardins Filtrantes (“D1”, “D2”, “D3”)

Os jardins filtrantes constituem a etapa final do processo de tratamento das águas provenientes das bacias de sedimentação, utilizando a vegetação como principal elemento do sistema. Nesses jardins, as águas efluentes passam por um processo de depuração em que a matéria orgânica é absorvida pelas plantas aquáticas (macrófitas), ao mesmo tempo em que é promovido o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela degradação de partículas poluentes por meio de processos bioquímicos. Estruturalmente, os jardins filtrantes são compostos por uma base de manta geotêxtil permeável, sobre a qual são dispostos aproximadamente 60 cm de brita, servindo como meio suporte para a vegetação. A entrada e saída da água são realizadas por meio de tubulações de polietileno de alta densidade (PEAD), que garantem a adequada distribuição e drenagem do fluxo. O principal elemento ativo do sistema é o conjunto de macrófitas, que realizam a

fitorremediação, promovendo a remoção de impurezas e poluentes remanescentes e contribuindo, assim, para a melhoria significativa dos parâmetros físico-químicos e biológicos da água. Cada unidade de jardim filtrante desempenha papel essencial na etapa terciária do tratamento, reforçando o caráter sustentável e eficiente do sistema como um todo e proporcionando um ambiente funcionalmente integrado à paisagem urbana e ambiental.



Figura 3.20 Jardim Filtrante D1. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga



Figura 3.21 Jardim Filtrante D2. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga



Figura 3.22 Jardim Filtrante D3. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga

A disposição dos Jardins Filtrantes, com "D1" em primeiro lugar, conectado ao "D3" e "D2", foi cuidadosamente planejada para otimizar a eficiência do processo de filtração e garantir que a água tratada atinja os melhores padrões possíveis de qualidade para assim ser reintroduzida na Lagoa de Piratininga.



Figura 3.23 Sequência de Funcionamento dos Jardins Filtrantes através de imagem via satélite. Fonte: Google Earth adaptada

Em termos de capacidade hidráulica o relatório denominado “Estudo Hidrológico-Hidrodinâmico para Avaliação do Comportamento de um Sistema de Jardins Filtrantes – Piratininga, Niterói – RJ” (Aquafluxus, 2021), estimou o valor de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ como critério de falha do sistema. Esta verificação foi realizada por meio de simulações hidrodinâmicas, e identificou que descargas superiores a esse limiar resultam em falhas de operação e extravasamentos em toda a rede de distribuição.

4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho foi desenvolvida considerando a descrição do modelo hidrológico-hidrodinâmico utilizado para a avaliação do funcionamento dos jardins filtrantes no Parque Orla Piratininga, localizado na lagoa de Piratininga, e a descrição dos cenários analisados, levando em consideração a ocorrência das mudanças climáticas e de precipitações intensas. Vale destacar que a metodologia pode ser replicada para estudos de caso similares, porém, em termos de facilitar seu entendimento parte dos resultados de sua aplicação serão apresentados no decorrer deste capítulo.

4.1 Estudo hidrológico e de contribuições de esgotamento sanitário

A pesquisa tem como objetivo principal a determinação das vazões de contribuição para um sistema de jardins filtrantes (pluviais e de esgoto sanitário), visando viabilizar uma avaliação da sua eficiência hidráulica. Para isso, realiza-se um estudo hidrológico com base na caracterização da bacia hidrográfica a ser estudada e um estudo populacional para estimar a contribuição de esgoto sanitário.

4.1.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica

A presente etapa da metodologia será exemplificada por meio de um estudo de caso, sendo a bacia hidrográfica do Rio Cafubá, situada no município de Niterói, Rio de Janeiro, utilizada apenas como exemplo de aplicação. Ressalta-se que tal abordagem metodológica é passível de aplicação em qualquer outra bacia hidrográfica, a depender dos objetivos e do contexto do estudo.

A etapa inicial da caracterização da bacia consiste na delimitação e quantificação da extensão do seu curso de drenagem principal, sendo igualmente necessário o levantamento da área total da bacia hidrográfica, informação fundamental para as análises hidrológicas subsequentes.

Com base em dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Administração (SMA) de Niterói, o principal curso de drenagem do Rio Cafubá apresenta uma extensão de 1,489 km. Quanto à área da microbacia hidrográfica, verificou-se a existência de duas estimativas distintas: 1,719 km², segundo o Sistema de Gestão de Geoinformação

(SIGEO), e 2,112 km², conforme a licitação divulgada pela SMA. Optou-se por adotar a maior área, como medida de segurança nos cálculos.

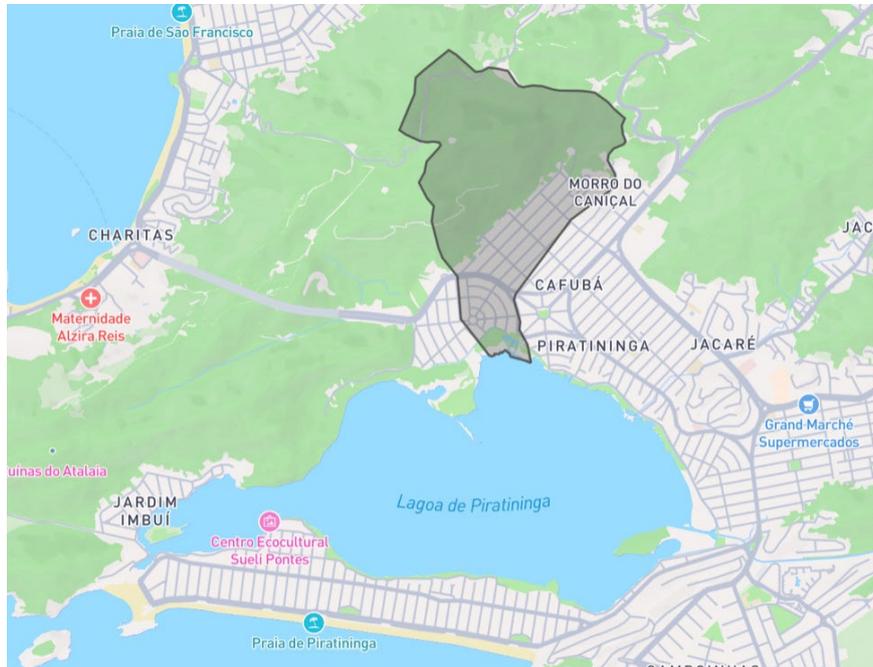


Figura 4.1 Reconhecimento da Bacia do Rio Cafubá. Fonte: SIGEO (Prefeitura de Niterói)

A etapa subsequente da metodologia corresponde à avaliação do uso e ocupação do solo na área da bacia hidrográfica. Para avaliar a cobertura vegetal do estudo de caso, foi utilizada uma imagem de satélite da área, representada na Figura 4.2.



Figura 4.2 Delimitações das bacias de Niterói via satélite. Fonte: Prefeitura de Niterói

A Figura 4.2 foi analisada por meio do software AutoCAD, que permitiu a delimitação entre áreas urbanizadas e vegetadas, resultando em uma estimativa de 67,97% de cobertura vegetal, demonstrado na Figura 4.3. Na Figura 4.3, as áreas verdes correspondem a cobertura vegetal, enquanto a área cinza corresponde a cobertura urbanizada.



Figura 4.3 Análise da Cobertura Vegetal (Verde representa a área de cobertura vegetal e cinza a área urbana).
Fonte: Própria

Por fim, torna-se necessário obter a estimativa populacional da área de estudo, a fim de subsidiar uma avaliação mais precisa da contribuição de esgoto sanitário na bacia hidrográfica.

Quanto a informação populacional da área da bacia estudada, foi retirada do Censo Demográfico de 2022 (IBGE), que a população estimada do Cafubá seria de 4.530 habitantes. O censo de 2022 foi o último senso que disponibilizou a população específica do bairro. No entanto, de forma a estimar com maior assertividade, foi necessário mensurar o crescimento populacional da cidade de Niterói entre 2022 e 2024, utilizando as informações do IBGE de referência, para que fosse possível prever a população estimada na região estudada. A população de Niterói em 2024 estimada pelo IBGE é vista na Figura 4.4.

POPULAÇÃO	
População no último censo [2022]	481.749 pessoas
População estimada [2024]	516.720 pessoas

Figura 4.4 População estimada da cidade de Niterói. Fonte: IBGE (2024)

Tendo a informação da população do censo de 2022 e a informação da população estimada de 2024, é possível calcular uma variável do crescimento populacional da cidade nesse período. O valor encontrado, quando aplicado a população estimada em 2022 do bairro em específico, estima-se cerca de 4.840 habitantes no bairro do Cafubá em 2024. Nas Figura 4.5 e 4.6, têm-se uma noção do crescimento urbanístico da região nos últimos 20 anos, por imagens via satélite.

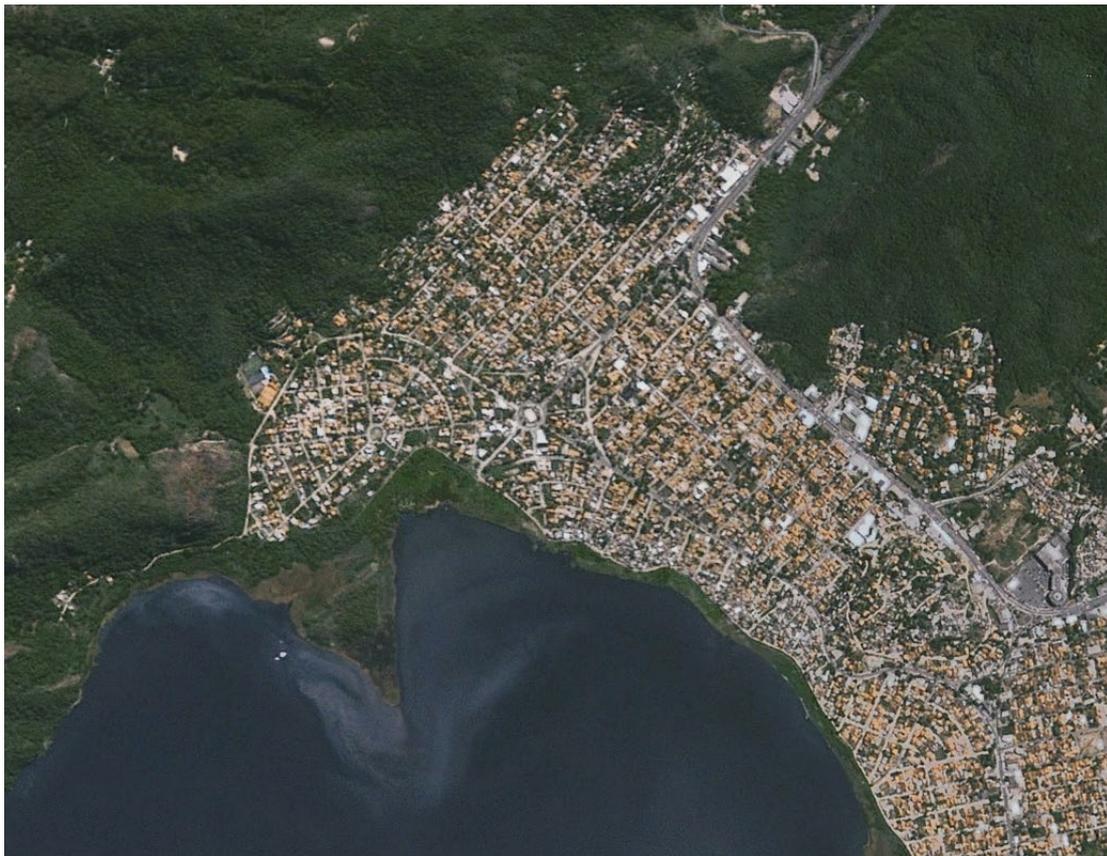


Figura 4.5 Imagens via satélite do bairro do Cafubá, 2004. Fonte: Google Earth



Figura 4.6 Imagens via satélite do bairro do Cafubá, 2024. Fonte: Google Earth

4.1.2 Método Racional

Tendo a bacia caracterizada, utiliza-se o método racional para obter os resultados de vazão pluvial da bacia hidrográfica estudada.

O método racional é amplamente reconhecido e utilizado na engenharia para a determinação da vazão de pico em pequenas bacias hidrográficas. Segundo Pinto et al. (1975), sua aplicação é recorrente no dimensionamento de galerias pluviais e bueiros, devido à sua simplicidade e confiabilidade, quando aplicadas corretamente suas hipóteses. Conforme Batista (2010), trata-se do método preferido entre os engenheiros, principalmente por fornecer valores de projeto conservadores, que garantem maior segurança quando analisados eventos extremos. O Método Racional foi proposto por Mulvany, por volta de 1850, de acordo com Almeida e Serra (2017).

O Método Racional foi proposto por Mulvany, por volta de 1850, de acordo com Almeida e Serra (2017). Foi inicialmente desenvolvido com o propósito de estimar o deflúvio máximo gerado por eventos de precipitação. Para a aplicação adequada deste método,

algumas premissas fundamentais são estabelecidas, entre as quais se destacam: a inexistência de escoamento de base, a constância do armazenamento superficial ao longo do tempo, bem como a uniformidade da intensidade de precipitação tanto no tempo quanto no espaço. Além disso, considera-se que o escoamento superficial ocorre segundo o modelo hortoniano, típico de áreas onde a taxa de infiltração é superada pela taxa de precipitação.

Essas hipóteses se mostram adequadas, sobretudo, em bacias hidrográficas de pequena dimensão, onde o tempo de concentração é reduzido. Nessas condições, é possível assumir que o regime de escoamento se estabelece de forma permanente no instante em que toda a área da bacia passa a contribuir para o fluxo superficial na seção de interesse.

O tempo de concentração, nesse contexto, é definido como o intervalo entre o início da precipitação e o momento em que o escoamento gerado pelo ponto mais distante da bacia atinge a seção considerada para análise. Esse conceito determina a duração da chuva crítica a ser utilizada no dimensionamento hidrológico, como ilustrado nas Figuras 4.7.

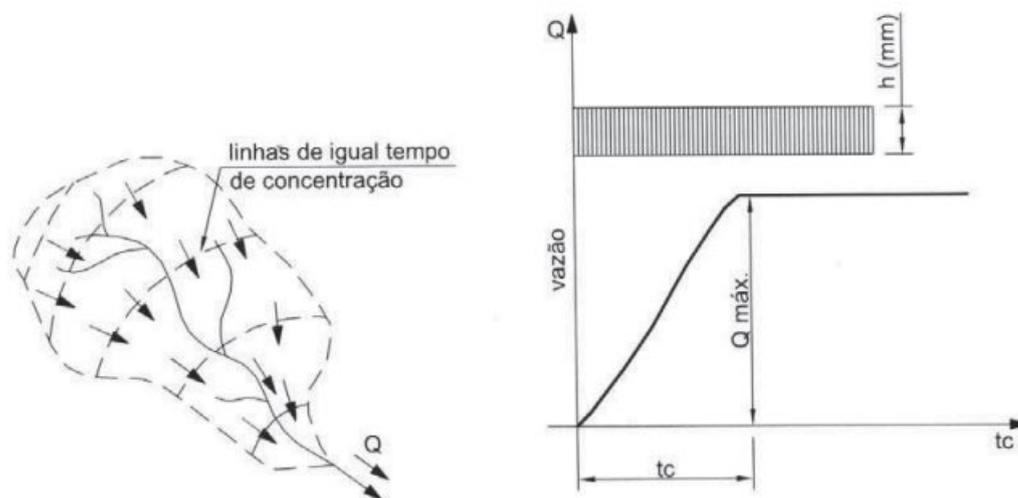


Figura 4.7 Definição do tempo de concentração.

O método racional parte do princípio de que a vazão de pico (Q_p), em uma determinada seção da bacia, pode ser estimada pela Equação 1:

$$Q_p = \frac{C \times I_m \times A}{3,6} \quad (\text{Equação 1})$$

Na qual:

$$Q_p = \text{vazão de pico} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

C = *coeficiente de escoamento superficial*

I_m = *intensidade máxima média de precipitação* $\left(\frac{mm}{h} \right)$

A = *área da bacia hidrográfica*

Embora o método racional tradicional seja indicado para áreas de até 50 hectares, Fritsch (2013) sugere que ele pode ser estendido para bacias de até 100 hectares, desde que se adote um coeficiente de retardo, o qual busca corrigir a superestimativa da vazão provocada por áreas maiores ou por irregularidades de escoamento.

Dessa forma, o cálculo da vazão segue a Equação 2.

$$Q_p = \frac{C \times I_m \times A}{3,6} \times \phi \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual:

ϕ = *coeficiente de retardamento*

O coeficiente de escoamento C reflete a capacidade da superfície da bacia em gerar escoamento superficial. É influenciado pelo tipo de cobertura do solo, grau de urbanização, uso e ocupação do solo. Para este trabalho, o valor de C foi calculado considerando os dados da Prefeitura de Niterói, conforme apresentado na Tabela 2, e a cobertura vegetal pré-estabelecida na Caracterização da Bacia.

Tabela 2 Coeficiente de Escoamento. Fonte: Prefeitura de Niterói

1,00	Áreas impermeabilizadas
0,80	Áreas centrais (densamente urbanizadas)
0,70	Áreas residenciais, lotes $\geq 360\text{m}^2$ e $< 600\text{m}^2$
0,60	Áreas residenciais urbanas (menor densidade) lotes $\geq 600\text{m}^2$
0,40	Áreas rurais
0,25	Reservas, parques e jardins
0,15	Mata densa

A intensidade máxima média da chuva (I_m) foi determinada a partir de dados de precipitação no intervalo de 2018 a 2024, com base em duas fontes: os dados históricos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) abrangendo o período de julho de 2018 a dezembro de 2023, considerando eventos com duração de 60 minutos, e os registros de um pluviômetro instalado no bairro do Cafubá no ano de 2024, que forneceu dados mais localizados e atualizados, para eventos de mesma duração.

Vale destacar que há em 2020 um evento pluviométrico significativo que possibilitou a verificação do sistema diante de chuvas intensas. No dia 8 de dezembro de 2020 a cidade de Niterói entrou em estado de alerta e diversas falhas nos sistemas de drenagem urbana foram verificadas (G1, 2020).

A área da bacia hidrográfica foi definida na caracterização da bacia, descrita no item 4.1.1.

O coeficiente de retardamento é um parâmetro que quantifica o atraso ou a “lentificação” de um fluxo em relação à sua velocidade advectiva potencial, seja em escoamento de água livre, seja no transporte de solutos em meios porosos. Para o estudo em questão, foi atribuído o valor unitário a esse coeficiente, assumindo um contingente conservativo, estimando-se uma estimativa superior da vazão.

4.1.3 Avaliação do Esgotamento Sanitário da Bacia Hidrográfica

O aporte de esgotamento sanitário corresponde à estimativa da carga líquida gerada pelas atividades humanas em determinada área, representando um parâmetro essencial para o dimensionamento de sistemas de coleta, tratamento e disposição final de esgotos. Para a obtenção desse valor, adota-se, comumente, a premissa de que a geração de esgoto

corresponde a uma fração do consumo de água potável, conforme estabelecido por autores técnicos e normativas setoriais.

Adota-se, nesta análise, a estimativa do cenário mais crítico de esgotamento sanitário, no qual se assume a ausência total de coleta e tratamento de esgoto, de modo a representar uma condição-limite que evidencia os impactos potenciais sobre a qualidade da água pluvial e os riscos associados ao lançamento de efluentes in natura no sistema de drenagem.

Inicialmente, deve-se levantar o consumo médio diário de água per capita (litros/habitante/dia), valor que pode ser obtido por meio de dados fornecidos por companhias de abastecimento, estudos técnicos regionais ou referências bibliográficas. Esse valor é, então, multiplicado pela estimativa populacional da área de estudo, considerando as características da ocupação urbana.

Posteriormente, aplica-se um coeficiente de retorno, que expressa a fração do volume de água consumido que efetivamente se transforma em esgoto doméstico. Esse coeficiente, geralmente fixado entre 0,7 e 0,9, conforme literatura especializada, considera perdas por evaporação, infiltração, uso não sanitário e demais consumos não esgotáveis (TSUTIYA, 1997). No estudo em questão, o coeficiente utilizado será de 0,8 (ou 80%), de acordo com a norma ABNT NBR 9649:1986.

$$Q_e = C \times P \times C_{retorno} \text{ (Equação 3)}$$

Na qual:

Q_e é o volume diário de esgoto gerado ($\frac{L}{dia}$) é

C é o consumo per capita de água ($\frac{L}{hab \times dia}$)

P é a população residente (hab)

$C_{retorno}$ é o coeficiente de retorno (adimensional)

Quanto a bacia hidrográfica a ser estudada, a plataforma Infosabas, que fornece dados e informações sobre saneamento básico nos municípios brasileiros, estima que o consumo de água na cidade de Niterói é de 193,8L/hab.dia. É importante destacar que o valor do consumo de água pode ser alterado dependendo das características sociais e ambientais locais. Tendo o consumo de água disponibilizado e o coeficiente de retorno, é possível encontrar a sua produção de esgoto.

4.2 Estudo hidráulico para a simulação do funcionamento do sistema

O modelo matemático adotado neste estudo foi desenvolvido por Marcelo Gomes Miguez em 2001, como parte de sua tese de doutorado em Engenharia Civil na COPPE/UFRJ, intitulada “Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas”. No entanto, foi difundida em maior escala em 2017, a partir da publicação do artigo “Urban Flood Simulation Using MODCEL—An Alternative Quasi-2D Conceptual Model” (MIGUEZ, 2017). O MODCEL (Modelo de Células de Escoamento) é um modelo hidrodinâmico que utiliza o conceito de células de escoamento para simular o comportamento hidrológico e hidráulico de bacias hidrográficas, especialmente em áreas urbanas.

De acordo com Oliveira et al. (2022), o Modcel é destacado como uma ferramenta importante para a simulação de áreas destinadas ao armazenamento de volumes de controle de inundações, desempenhando a função de paisagens multifuncionais em projetos de infraestrutura azul-verde integrados aos sistemas de drenagem. Dessa forma, o Modcel se mostra eficaz para representar o funcionamento complexo do sistema de jardins filtrantes, como o estudo de caso estudado.

Além disso, é importante ressaltar que a calibração e validação são etapas cruciais no processo de modelagem, que devem ser realizadas antes da aplicação do modelo. A utilização do MODCEL possibilita que essas etapas sejam realizadas de forma satisfatória, mesmo em situações com dados hidrológicos e hidráulicos limitados (OLIVEIRA et al., 2019). Porém, para o caso específico, devido à falta de dados, não será possível realizar o processo de calibração.

Para o presente estudo, utilizando o MODCEL, todo o arranjo físico dos jardins filtrantes e da lagoa de Piratininga é traduzido para um sistema de “células” interligadas, de modo a reproduzir a dinâmica de acumulação e escoamento de cada compartimento. Assim, a bacia de recepção (vertedouro) é representada pela célula 1, que recebe o fluxo de entrada do rio urbano e, ao atingir sua cota de transbordamento, distribui parte desse volume diretamente para a lagoa (via conector V) e parte para a célula da bacia de sedimentação (conector G3). Na célula 2, correspondente à sedimentadora, a água fica em detenção controlada, permitindo a decantação de sólidos, antes de escoar para o primeiro jardim filtrante (célula 4) através de ligações laterais (conectores G2).

A sequência de tratamento prossegue em cada jardim filtrante: a célula do filtro recebe o fluxo tratado da etapa anterior, acumula e libera o escoamento para o filtro seguinte (células 5 e 6), sempre pelo mesmo tipo de conector, até que o último módulo encaminhe o volume para a lagoa de Piratininga (célula 7). Cada célula em MODCEL carrega a informação de sua curva de armazenamento (relação entre nível de lâmina e volume) e de sua área de contato com o ar, de modo que, a cada passo de tempo da simulação, o programa calcula as novas cotas de lâmina a partir dos balanços de entrada e saída. Os conectores, por sua vez, são parametrizados com a elevação de adoção (cota de crista ou fundo) e características geométricas (largura do vertedor ou área de passagem) correspondentes às estruturas reais, garantindo que o modelo represente fielmente o retardo e o controle de vazão proporcionados pelos vertedores, orifícios e canais laterais. Esse sistema é representado na Figura 4.8.

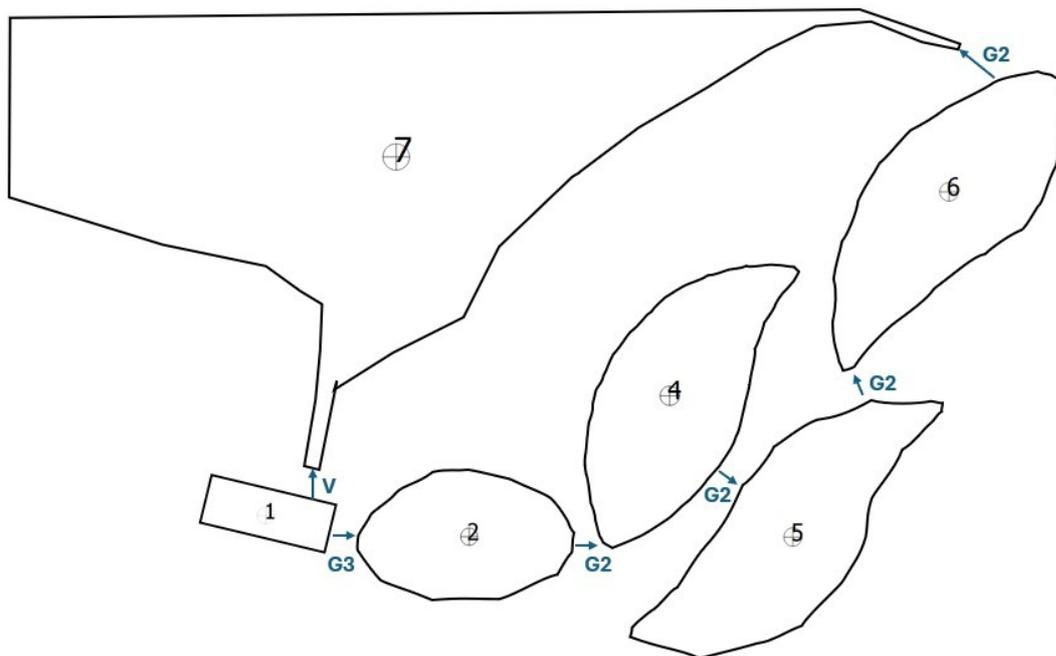


Figura 4.8 - Representação das células no MODCEL. Fonte: Própria

A célula 1 representa a caixa de recepção do vertedouro, na qual chega o fluxo bruto do rio urbano antes de qualquer tratamento. Com área de 6 m^2 e cota de fundo em $-3,40 \text{ m}$, essa célula possui, na condição inicial de repouso, uma lâmina de água de $0,30 \text{ m}$ acima do fundo.

A célula 2 representa a etapa de decantação, em que a água proveniente da caixa de recepção (célula 1) fica em detenção para permitir a deposição dos sólidos suspensos. Com área de $1 585 \text{ m}^2$ e cota de fundo em $-5,00 \text{ m}$, inicia a simulação com nível d'água igual a $0,00 \text{ m}$ (volume inicial zero). Ao longo do evento, essa célula recebe todo o escoamento que transborda da célula 1 e o coeficiente de run-off igual a $1,0$ garante que esse volume seja encaminhado para sedimentação, sem perdas superficiais adicionais.

As três células de jardins filtrantes formam um único trecho de tratamento em série, cada uma recebendo o efluente da etapa anterior e liberando-o para a seguinte até a lagoa. A célula 4 dispõe de 2990 m^2 , a célula 5 de 3120 m^2 e a célula 6 de 3225 m^2 , todas com cota de fundo em 0 m , nível inicial 0 m e coeficiente de run-off igual a $1,0$.

A célula 7 representa a lagoa de Piratininga como condição de contorno a jusante, com nível d'água fixo em $0,00 \text{ m}$ na situação atual e em $0,50 \text{ m}$ no cenário de mudanças

climáticas. Ela recebe, por um lado, o escoamento de derivação (conector V) diretamente da caixa de recepção e, por outro, o efluente final dos jardins filtrantes (conector G2 da célula 6).

A conexão entre a célula 1 (bacia de recepção) e a célula 2 (bacia de sedimentação) é realizada por uma galeria de seção retangular com 0,30 m de altura, 0,30 m de largura e 1,10 m de extensão. O escoamento nessa galeria é governado pela gravidade, de forma que, assim que o nível na caixa de recepção chega na cota do vertedor, a água ingressa neste canal e é conduzida à bacia de sedimentação. O coeficiente de Manning $n = 0,015$ reflete a rugosidade interna típica de uma galeria revestida em concreto, modulando a velocidade do fluxo para que a transferência de volume ocorra de forma controlada e representativa das condições reais do sistema.

Todas as conexões do tipo G2 (entre célula 2→4, 4→5, 5→6 e 6→7) são realizadas por galerias circulares idênticas, que reproduzem o escoamento por gravidade de um módulo de tratamento ao seguinte. Cada uma dessas galerias apresenta:

- Diâmetro: 0,50 m
- Extensão: 10,0 m
- Coeficiente de Manning: 0,015

Na prática, esses tubos conduzem a água de forma controlada, respeitando a rugosidade típica de um canal revestido em concreto ou PVC rígido. O diâmetro assegura capacidade suficiente para a vazão esperada, a extensão define a perda de carga ao longo do percurso e o coeficiente de Manning ($n = 0,015$) modera a velocidade, garantindo que o modelo reflita com precisão o retardo e o amortecimento entre cada estágio de filtragem.

Já a conexão entre a célula 1 (bacia de recepção) e a célula 7 (lagoa de Piratininga) é feita por um vertedor retangular com largura de 4 m, cota de crista em 0,75 m e coeficiente de descarga 0,50. Sempre que o nível na caixa de recepção ultrapassa 0,75 m, a lâmina excedente transborda por esse vertedor, gerando um escoamento imediatamente direcionado à lagoa. O coeficiente de 0,50 representa as perdas de energia e reduz o fluxo efetivo para metade do valor teórico, assegurando uma descarga controlada. Em eventos

de alta vazão, esse dispositivo atua como alívio, protegendo o sistema de tratamento (bacia de sedimentação e jardins filtrantes) contra sobrecarga, mas também impondo que parte da água chegue ao corpo receptor sem passar pelos estágios anteriores de tratamento.

Ao se rodar a simulação para o evento de chuva estudado, o MODCEL converte automaticamente esses dados geométricos e de conexões em séries temporais de níveis e fluxos em cada célula, permitindo avaliar: (a) o tempo de detenção e o atenuamento de pico na bacia de recepção; (b) a contribuição de vazões na bacia de sedimentação e nos jardins filtrantes. Dessa forma, o modelo célula-a-célula reproduz o funcionamento hidráulico do sistema de jardins filtrantes do Parque Orla Piratininga, possibilitando estudar diferentes cenários operacionais.

4.3 Simulação de cenários

Para a análise do funcionamento dos Jardins Filtrantes, presente na Lagoa de Piratininga, 4 cenários foram considerados, com suas respectivas adequações realizadas no modelo hidrodinâmico, quando necessário.

O primeiro cenário corresponde a situação atual, utilizando dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Defesa Civil de Niterói, para gerar resultados de julho de 2018 a dezembro de 2024. O intuito desse primeiro cenário é entender o funcionamento do sistema e sua eficiência nesse período. É importante destacar que os Jardins Filtrantes da Lagoa de Piratininga foram inaugurados apenas no segundo semestre de 2023. O objetivo dessa simulação é entender seu possível funcionamento e sua eficácia, anteriormente e posteriormente à data de inauguração.

O segundo cenário analisa a influência das mudanças climáticas, considerando apenas o aumento da precipitação, com as condições do cenário anterior, isto é, levando em conta, ainda, as configurações anteriores no modelo hidrodinâmico. Para a adaptação da ocorrência das mudanças climáticas, a chuva de projeto sofreu um incremento de 30% na sua intensidade, prevista pelo IPCC e conforme sugerido no trabalho de Oliveira et al. (2023).

O terceiro cenário proposto tem por finalidade analisar os efeitos das mudanças climáticas sobre o sistema hídrico da Lagoa de Piratininga, considerando exclusivamente a elevação do nível médio do mar. Para tal, adota-se como referência o estudo intitulado “Cenário Otimista de elevação do nível médio do mar de 0,50 m e Possíveis Impactos Ambientais, Resultantes de Variações de Marés, na Cidade de Niterói”, realizado por pesquisadores da Universidade Federal Fluminense (UFF). Este cenário parte da premissa de que, ainda que a precipitação se mantenha constante, a elevação do nível do mar pode alterar significativamente os fluxos hidrodinâmicos da lagoa e impactar a eficiência dos Jardins Filtrantes, especialmente nas condições de maré alta e intrusão salina, podendo comprometer o escoamento gravitacional e o funcionamento das estruturas de drenagem.

Por fim, sugere-se um quarto cenário, integrando os efeitos analisados nos cenários dois e três, de forma a representar uma projeção mais abrangente e realista dos impactos das mudanças climáticas sobre a bacia hidrográfica. Neste cenário combinado, considera-se simultaneamente o incremento de 30% na intensidade das chuvas, conforme indicado pelo IPCC e Oliveira et al. (2023), e a elevação do nível médio do mar em 0,50 m, conforme estudo da UFF. Tal abordagem visa avaliar de maneira integrada o comportamento do sistema frente a eventos extremos de precipitação associados à elevação do nível do mar, permitindo identificar possíveis sobrecargas hidráulicas, riscos de transbordamento e comprometimentos na eficiência dos Jardins Filtrantes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como escopo detalhar os resultados obtidos na avaliação do sistema de jardins filtrantes do Parque Orla Piratininga, estruturados a partir das simulações hidrodinâmicas conduzidas para os cenários propostos, descritos no item 4.3.

Visando viabilizar as simulações hidrodinâmicas, conduziu-se um estudo hidrológico, com o objetivo de determinar as vazões de contribuição para o sistema de jardins filtrantes, fundamentado na caracterização da bacia hidrográfica em análise, conforme descrito no item 4.1. Os dados da bacia hidrográfica utilizados nesse levantamento encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Dados do Estudo Hidrológico. Fonte: Própria

DESCRIÇÃO	VALOR	UNIDADE
ÁREA	2,122	km ²
POPULAÇÃO	4.840	hab
COEFICIENTE DE ESCOAMENTO	0,39	adimensional
CONSUMO DE ÁGUA POR HABITANTE	193,8	L/hab.dia
PRODUÇÃO DE ESGOTO POR HABITANTE	155,04	L/hab.dia
PRODUÇÃO DE ESGOTO NO BAIRRO DO CAFUBÁ	0,008685111	m ³ /s

É importante ressaltar que, para fins desta avaliação, adota-se o pior cenário possível de esgotamento sanitário, no qual não há coleta nem tratamento dos esgotos gerados na área urbana. Parte-se da hipótese de que toda a carga de esgoto doméstico produzida no bairro é lançada diretamente no corpo hídrico receptor, o qual, por sua vez, alimenta o sistema de jardins filtrantes. Essa suposição visa representar uma condição-limite.

Os registros pluviométricos adotados neste estudo referem-se a dois conjuntos de dados complementares. Os dados relativos ao período de julho de 2018 a dezembro de 2023 foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão oficial de monitoramento meteorológico que disponibiliza integralmente os registros pluviométricos para o município de Niterói. Já os dados de 2024 foram fornecidos pela Defesa Civil de Niterói, a qual implantou no próprio ano de 2024 uma rede de pluviômetros distribuídos pela cidade. Dessa forma, passou a existir uma estação localizada exatamente na área de estudo, conferindo maior precisão espacial a esses registros. Apesar de procedentes de fontes distintas, optou-se pela consolidação das duas séries de dados a fim de viabilizar uma avaliação contínua e integrada do funcionamento do sistema de jardins filtrantes no intervalo de julho de 2018 a dezembro de 2024.

A partir do estudo hidrológico, foram obtidos dois resultados fundamentais para a caracterização do comportamento da bacia: o hietograma, que representa graficamente a variação temporal da precipitação, considerando o intervalo de uma hora entre cada uma delas, e o hidrograma, que ilustra graficamente a resposta da vazão superficial aos aportes pluviométricos. Nas figuras 5.1 e 5.2 são representados os hietograma e hidrograma, respectivamente, considerando o contexto atual, sem o aumento da precipitação, que foram utilizados para realizar as simulações hidrodinâmicas dos cenários 1 e 3, conforme descritos no item 4.3.

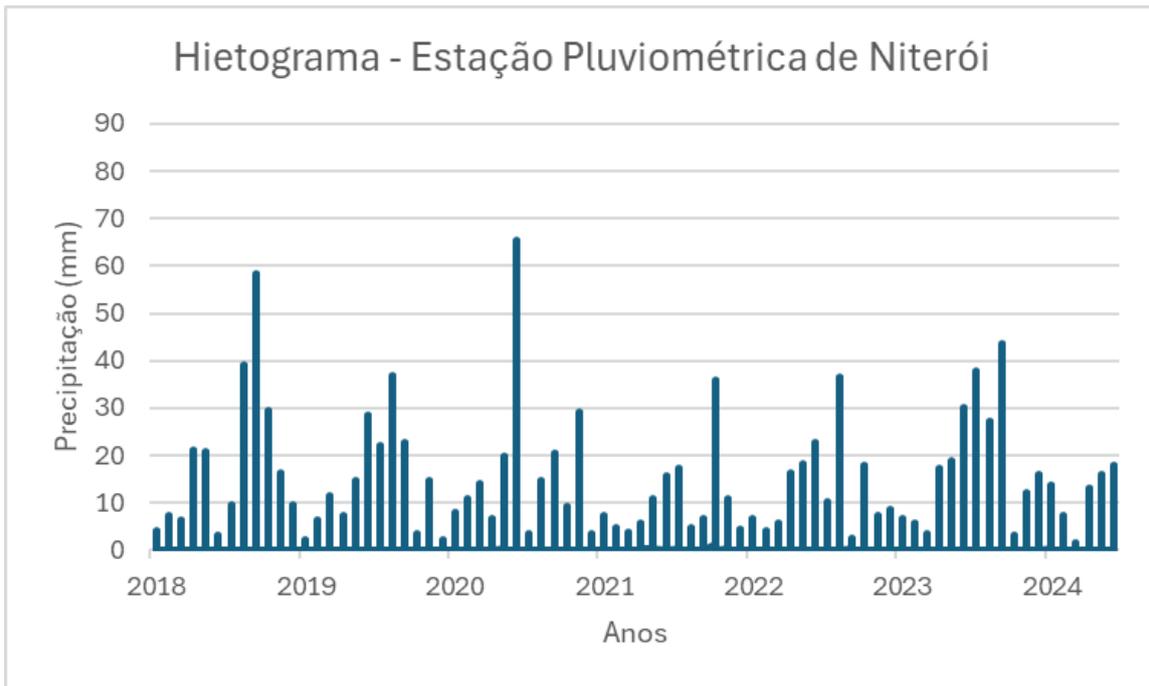


Figura 5.1 Hietograma referente ao cenário atual. Fonte: INMET e Defesa Civil de Niterói, adaptado.

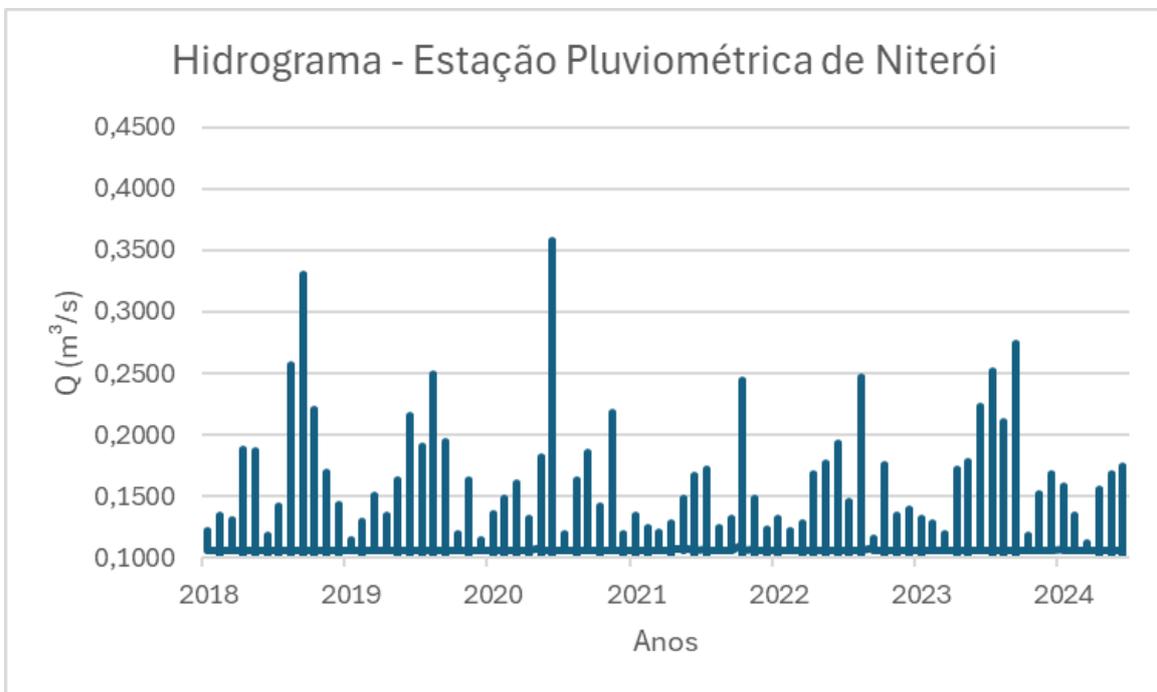


Figura 5.2 Hidrograma referente ao cenário atual. Fonte: Própria.

Com o objetivo de realizar as simulações hidrodinâmicas dos cenários 2 e 4, foi necessário considerar um acréscimo de 30% na intensidade das chuvas, gerando um segundo conjunto de hietograma e hidrograma, demonstrados nas Figuras 5.3 e 5.4.

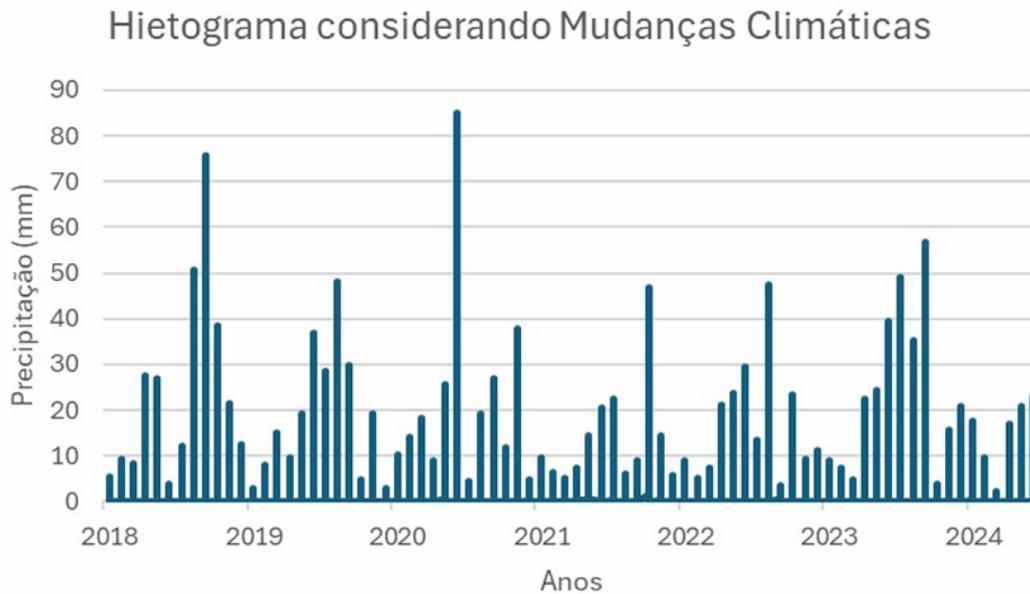


Figura 5.3 Hietograma considerando aumento da precipitação. Fonte: Própria.

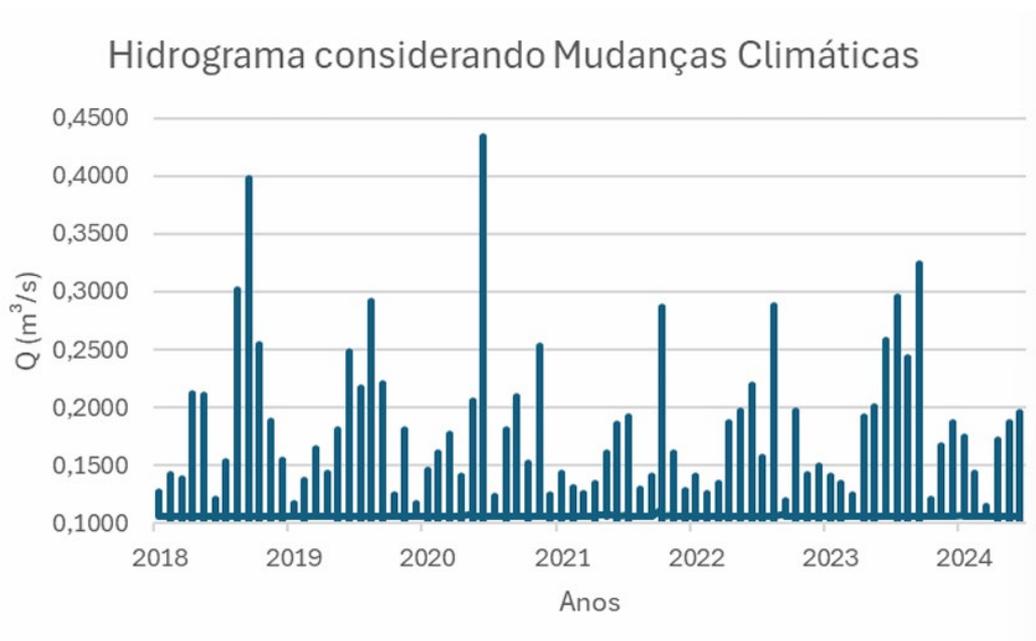


Figura 5.4 Hidrograma considerando aumento da precipitação. Fonte: Própria.

Em síntese, o estudo hidrológico permitiu a geração de hietogramas e hidrogramas representativos tanto das condições pluviométricas atuais quanto do cenário de incremento de 30 % na intensidade das precipitações e forneceu as condições de contorno de vazão ao modelo hidrodinâmico, garantindo a realização das simulações hidrodinâmicas.

O modelo hidrodinâmico desenvolvido focou no funcionamento da bacia de recepção, bem como nas suas possíveis saídas, seja pela conexão com a bacia de sedimentação ou pelo vertimento direto à Lagoa de Piratininga. A simulação da Bacia de Sedimentação e os três Jardins Filtrantes foi realizada de maneira simplificada, uma vez que se o aporte da bacia de recepção ao sistema de tratamento superasse os 0,2 m³/s seria considerada a falha do sistema. A Figura 5.5 apresenta de forma esquemática a bacia de recepção simulada bem como as possíveis saídas.

Esquema de Representação da Bacia de Recepção

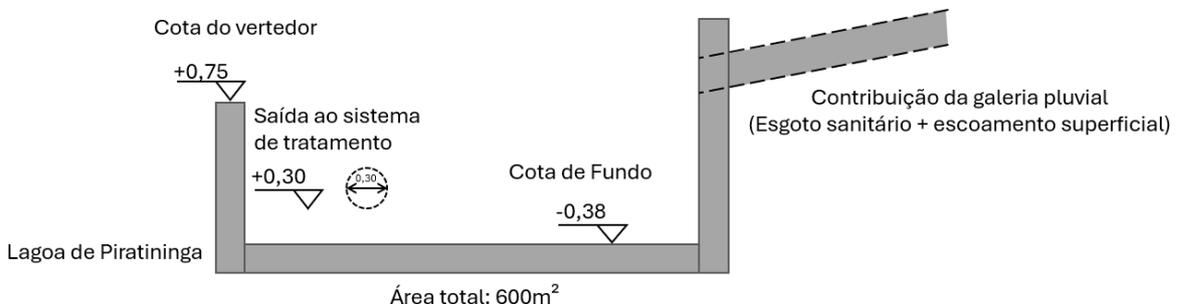


Figura 5.5 Esquema de funcionamento da bacia de recepção. Fonte: Própria.

O modelo também incorporou uma condição de contorno a jusante para representar o nível médio da Lagoa de Piratininga. No cenário sem mudanças climáticas, o nível foi fixado na cota zero; já no cenário com mudanças climáticas, adotou-se a cota 0,50. Devido ao fato da média de variação do nível da lagoa ser 0,08 metros, optou-se por essa abordagem simplificada. Embora desconsidere efeitos de marés de sizígia e quadratura, bem como as variações entre preamar e baixa-mar, a representação adotada permite avaliar, de forma média, o impacto da elevação do nível da lagoa (ocasionado pelas

mudanças climáticas) sobre o desempenho hidráulico do Jardim de Chuva, com ênfase nos níveis da bacia de recepção.

Como resultado das simulações, foi obtido, para cada configuração proposta, a variação de nível de água na bacia de recepção, a contribuição de vazões para a bacia de sedimentação e a contribuição de vazões para o jardim filtrante mais crítico. Para cada variável de saída do modelo hidrodinâmico foram definidos critérios de falha específicos.

No resultado da variação de nível na bacia de recepção, adota-se como critério de falha a cota de extravasamento da bacia, definida como a cota de fundo do vertedouro, conforme indicado na documentação técnica de projeto. Esse critério representa o limite máximo de armazenamento do sistema, sendo que, a partir desse ponto — 0,75 metros — qualquer volume adicional de água excede a capacidade da bacia e é diretamente direcionado para a lagoa, sem passar pelo processo de tratamento nos jardins filtrantes. Dessa forma, o critério de falha corresponde ao nível mínimo tolerável antes do início do transbordamento e perda da função de tratamento do sistema.

Para a contribuição de vazões, determinou-se o valor de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ como critério de falha, de acordo com o estudo realizado pela empresa Aquafluxus, denominado “Estudo Hidrológico-Hidrodinâmico para Avaliação do Comportamento de um Sistema de Jardins Filtrantes – Piratininga, Niterói – RJ”, no qual, por meio de simulações, identificou-se que descargas superiores a esse limiar resultam em falhas de operação e extravasamentos em toda a rede de distribuição. Foi considerado o valor de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ tanto para a bacia de sedimentação quanto para os jardins filtrantes, tendo em vista que esse limiar também indica a capacidade máxima de infiltração do meio filtrante antes de ocorrer escoamento preferencial e perda de eficiência. A falha dos jardins filtrantes em relação à lâmina não foi avaliada.

Ao relacionar diretamente os resultados hidrodinâmicos (níveis, vazões e hidrogramas) com critérios de falha pré-estabelecidos, torna-se possível avaliar de forma objetiva a performance dos jardins filtrantes. Nos subcapítulos subsequentes, serão apresentados de forma segmentada os resultados das simulações frente à cada cenário.

5.1 Cenário 1

No primeiro cenário, considera-se a condição atual, sem analisar o efeito das mudanças climáticas, gerando resultados de julho de 2018 a dezembro de 2024. Essa abordagem tem o intuito de entender o comportamento do sistema e sua eficiência ao longo desse período. No entanto, ressalta-se que o Parque Orla Piratininga foi inaugurado somente no segundo semestre de 2023 e, conseqüentemente, as simulações referentes ao intervalo anterior à inauguração configuram-se como representações hipotéticas do desempenho do sistema.

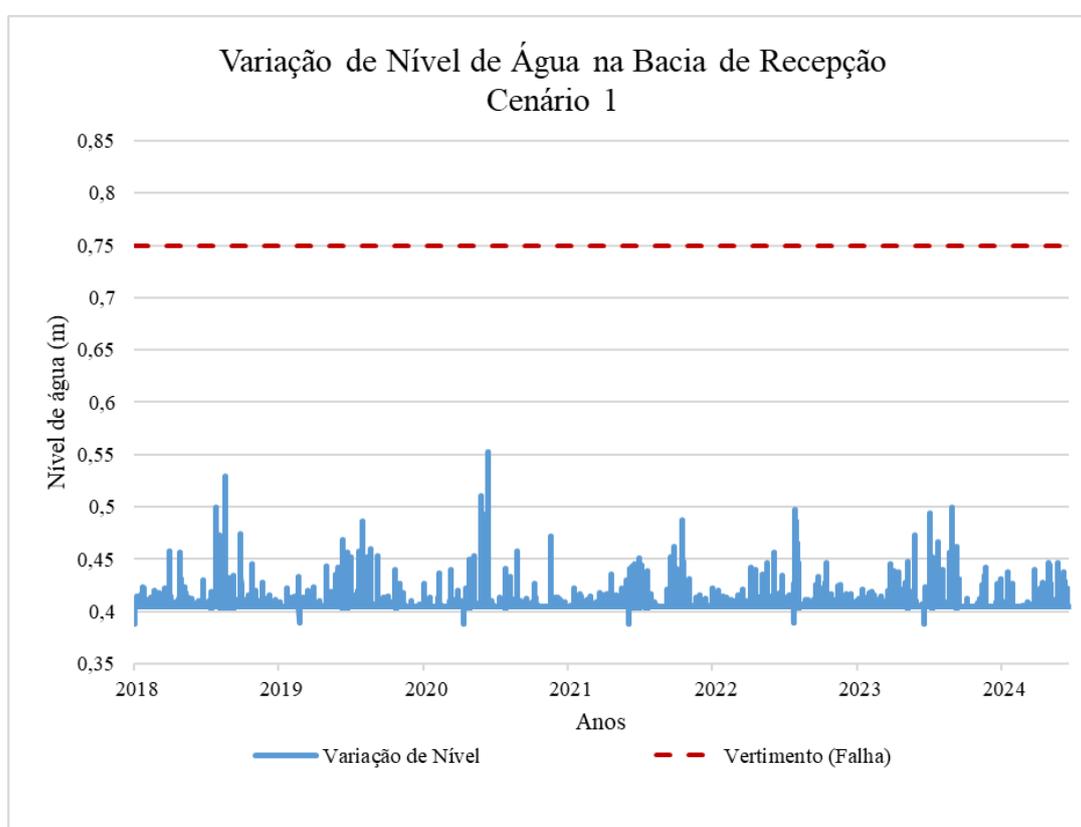


Figura 5.6 Variação de Nível de Água para o Cenário 1. Fonte: Própria

Conforme ilustrado no hietograma de nível, os picos máximos atingem aproximadamente 0,55 m no primeiro cenário, permanecendo constantemente abaixo da cota de extravasamento de 0,75 m. Essa margem de cerca de 0,20m evidencia uma folga operacional significativa na primeira etapa de retenção, garantindo que o volume incidente seja atenuado antes de prosseguir ao sistema subseqüente.

A discrepância entre os níveis reais de operação (até 0,55 m) e a cota de falha (0,75 m) indica que a bacia de recepção foi projetada com capacidade bastante superior ao necessário para o regime pluviométrico atual. Embora esse superdimensionamento proporcione uma margem de segurança contra inundações e minimize a frequência de transbordamentos, ele pode representar subutilização de área, maior custo de escavação e de revestimentos, bem como um desenho menos eficiente do ponto de vista econômico e de ocupação do espaço urbano.

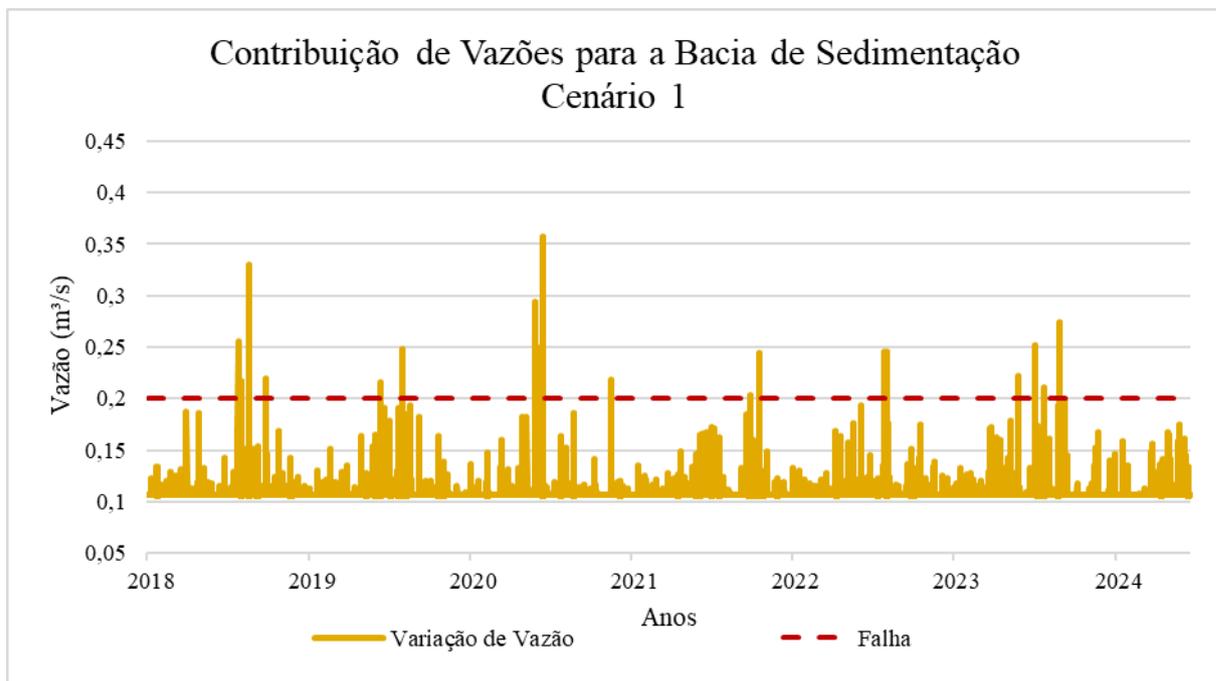


Figura 5.7 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 1. Fonte: Própria

A vazão de pico direcionada à bacia de sedimentação ultrapassa pontualmente o limiar crítico de 0,20m³/s, mas tais excedências ocorrem sem que haja ocorrência de transbordamento na bacia de recepção. A média entre as vazões resultantes da simulação é de 0,107m³/s, sendo quase a metade do critério de falha, garantindo a afirmação de que a bacia de sedimentação teria seu funcionamento efetivo na grande maioria do tempo. O percentual de falha em relação a todos os eventos é de 0,037%. O cálculo desse percentual foi feito considerando a quantidade de resultados que ultrapassam desse limiar, dividida pela quantidade total de resultados.

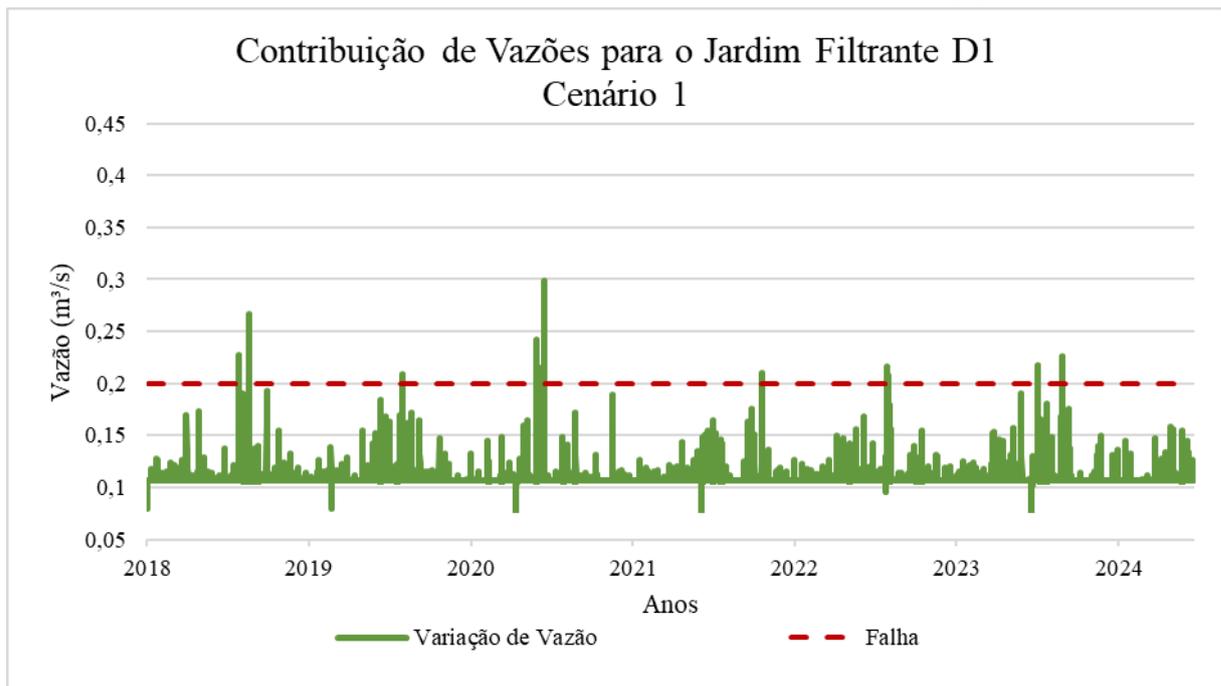


Figura 5.8 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 1. Fonte: Própria

Para análise da contribuição de vazões nos jardins filtrantes, analisa-se o jardim que obteve os maiores resultados, como margem de segurança. Foi determinado, através da análise de resultados, que o jardim a ser avaliado, considerando esse quesito, seria o Jardim Filtrante denominado “D1”.

5.2 Cenário 2

O segundo cenário é dedicado a avaliar a influência das mudanças climáticas, considerando apenas um acréscimo de 30% na intensidade pluviométrica projetada, percentual estabelecido pelo IPCC e conforme sugerido no trabalho de Oliveira et al. (2023), mantendo-se inalteradas as demais configurações do modelo hidrodinâmico adotadas no cenário base.

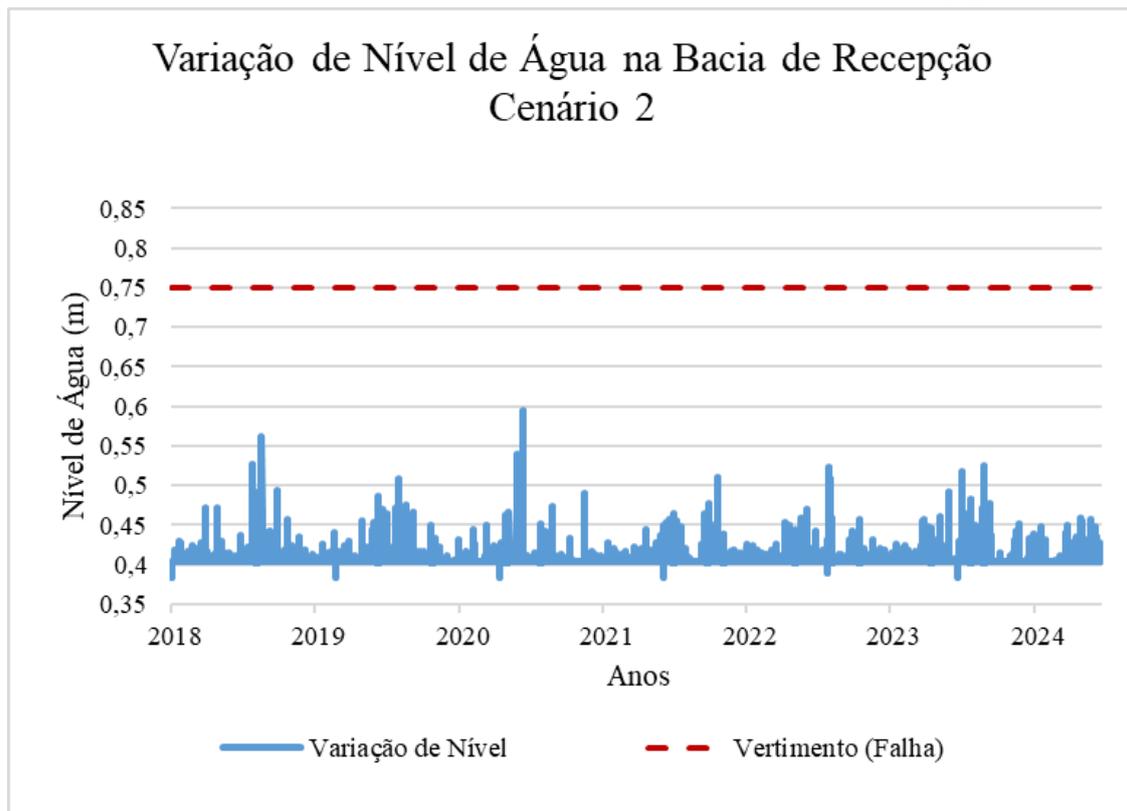


Figura 5.9 Variação de Nível de Água para o Cenário 2. Fonte: Própria

No segundo cenário, a bacia de recepção apresenta picos de nível próximos a 0,60m, ainda inferiores ao vertimento, de 0,75m. Contudo, a margem operacional reduz-se de cerca de 0,20 m (cenário atual) para aproximadamente 0,15m, indicando que o acréscimo de chuva aproxima o sistema de sua capacidade máxima de retenção.

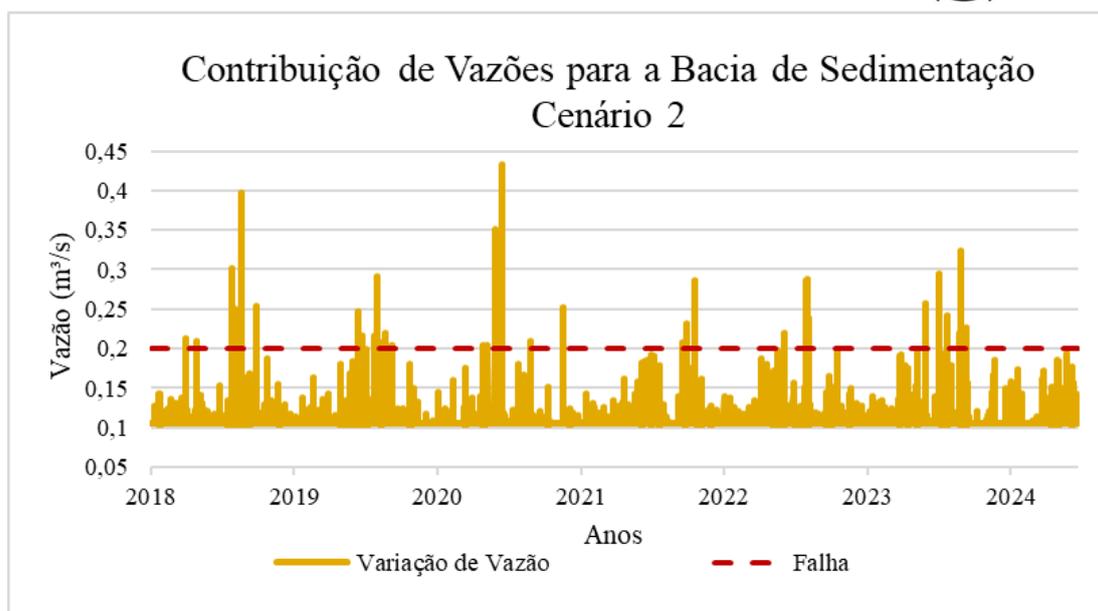


Figura 5.10 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 2. Fonte: Própria

As vazões de pico dirigidas à bacia de sedimentação ultrapassam com maior frequência o limiar crítico de $0,20\text{m}^3/\text{s}$, chegando próximo a $0,45\text{m}^3/\text{s}$. Esses eventos, embora ainda isolados, tornam-se mais recorrentes do que no cenário atual, onde não há o acréscimo de 30% na intensidade da chuva.

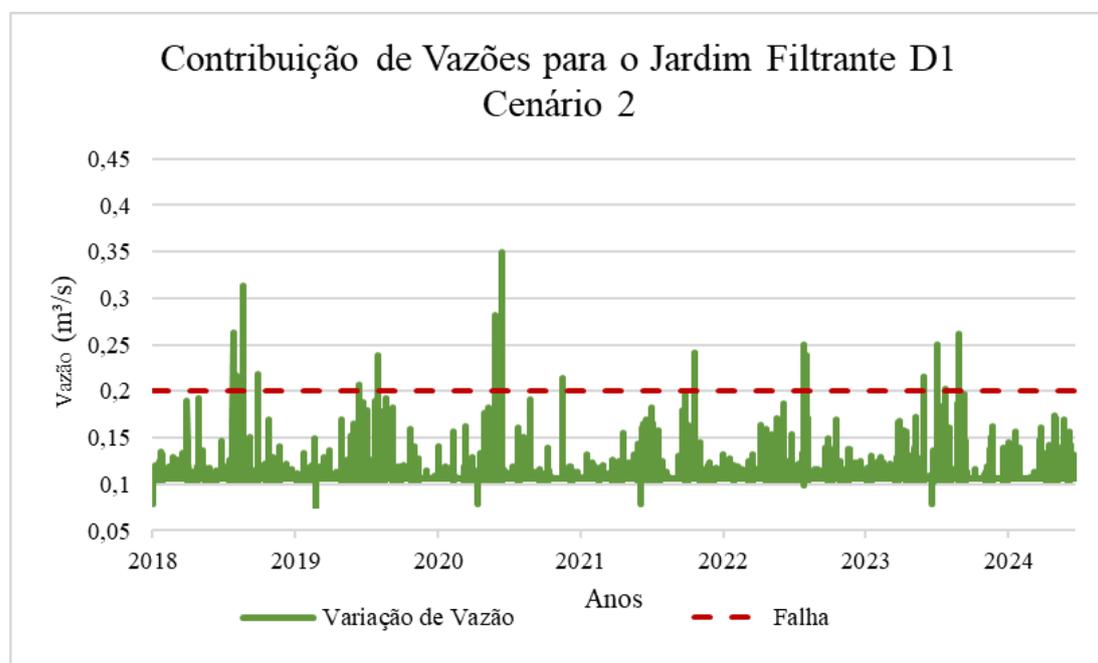


Figura 5.11 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 2. Fonte: Própria

O mesmo acontece com as vazões dirigidas ao jardim filtrante “D1”, que ultrapassam na mesma frequência o critério de falha, no entanto, em menor escala, chegando a $0,35\text{m}^3/\text{s}$.

5.3 Cenário 3

O terceiro cenário proposto tem por finalidade analisar os efeitos das mudanças climáticas, considerando exclusivamente a elevação do nível médio do mar. Para tal, adota-se como referência a elevação de $0,50\text{m}$ do nível do mar, valor obtido por meio de estudo realizado por pesquisadores da Universidade Federal Fluminense (UFF).

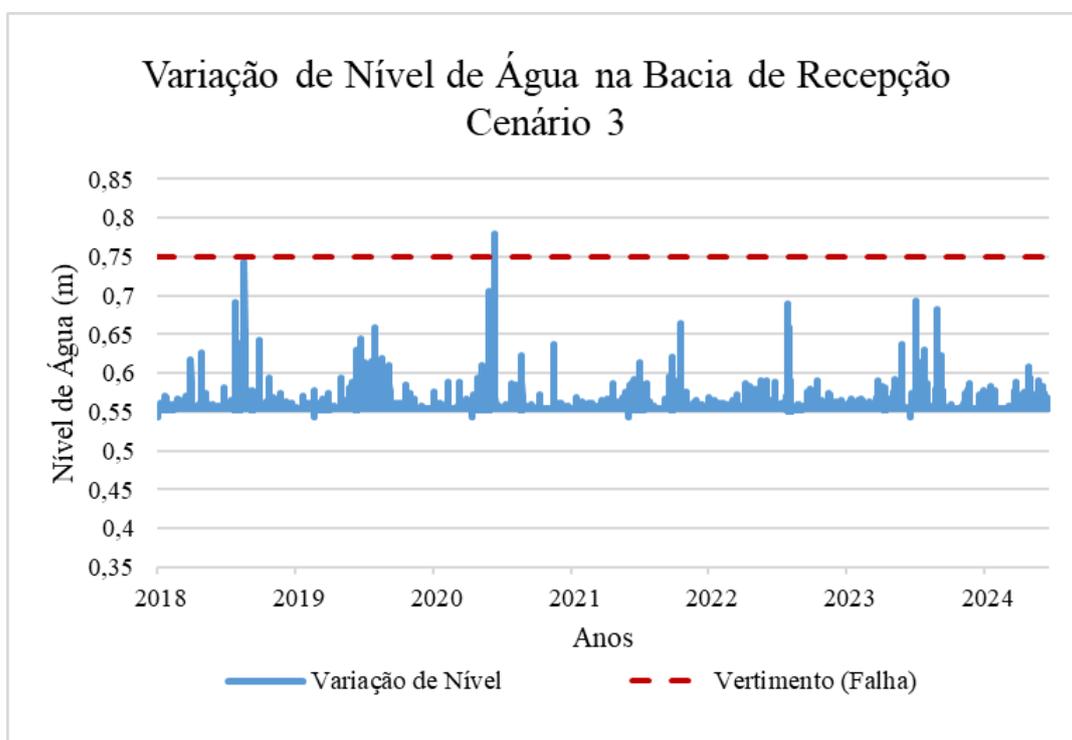


Figura 5.12 Variação de Nível de Água para o Cenário 3. Fonte: Própria

Em situações extremamente isoladas os picos passam a ultrapassar a cota de vertimento de $0,75\text{m}$, resultando em transbordamentos, mesmo sem considerar o aumento na intensidade de precipitação. Dentre os cenários analisados até então, é o primeiro cenário onde ocorre transbordamento na bacia de recepção. Ainda assim, o percentual de falha, que antes era zero, não chega a $0,002\%$.

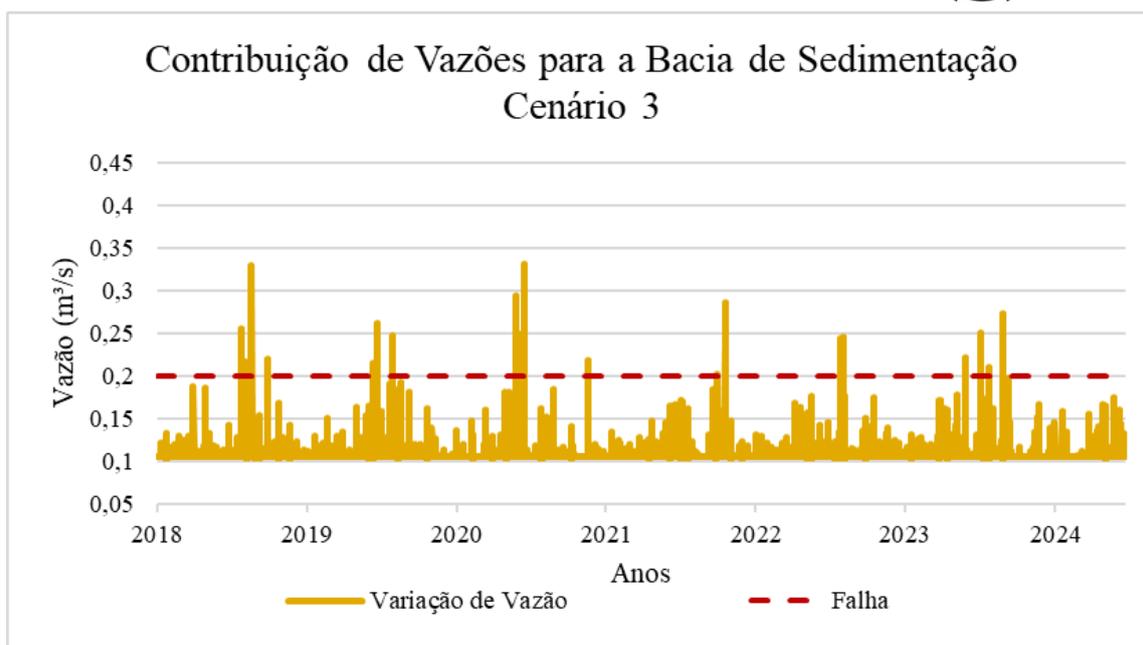


Figura 5.13 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 3. Fonte: Própria

Ainda que o perfil geral dos hidrogramas seja semelhante ao do cenário atual, a frequência de excedências do critério de falha aumenta ligeiramente, já que a retenção inicial está reduzida pela linha de base elevada. O aumento dessa frequência, apesar de visível, representa um valor pouco significativo, resultando em um percentual de falha de 0,041%.

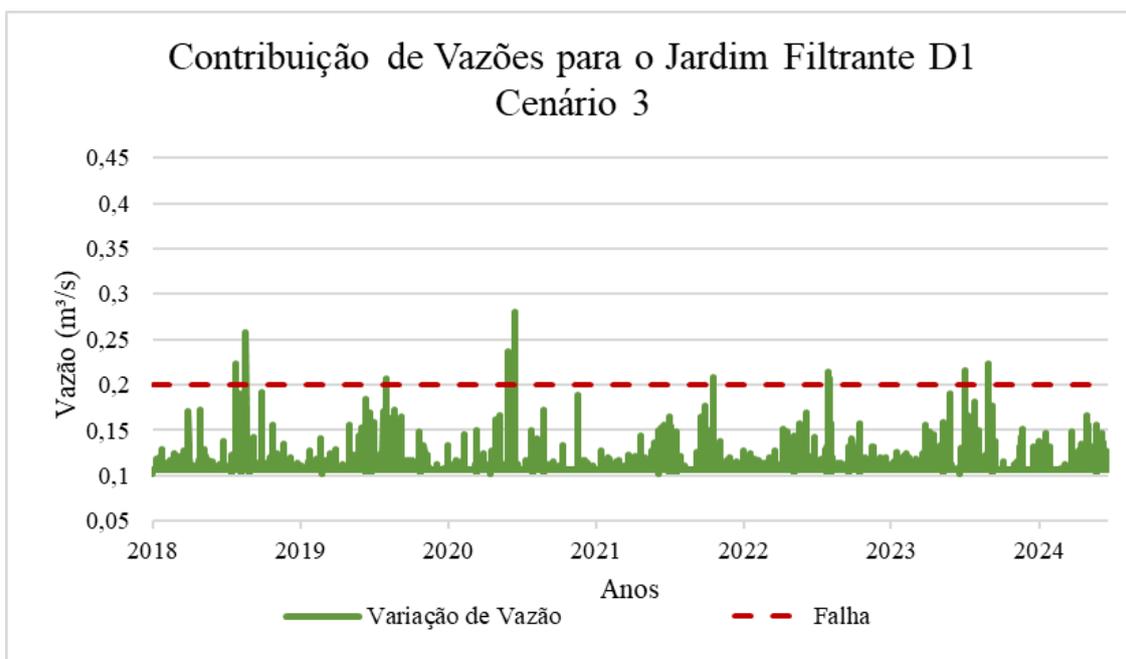


Figura 5.14 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 3. Fonte: Própria

No jardim filtrante mais crítico, as vazões de pico alcançam cerca de $0,28 \text{ m}^3/\text{s}$, também acima do valor de falha, mas apresentam uma atenuação média de aproximadamente 15% em relação à bacia de sedimentação. Contudo, o prolongamento do período em que o sistema opera próximo a falha reduz o tempo de detenção efetivo e agrava o risco de sobrecarga dos jardins filtrantes. O percentual de falha, para esse cenário, se aproxima do percentual do cenário atual, indicando que o aumento do nível do mar em 0,50m não influencia, de forma significativa, a contribuição de vazões para os jardins filtrantes.

5.4 Cenário 4

Neste cenário considera-se simultaneamente o incremento de 30% na intensidade das chuvas, conforme indicado pelo IPCC e Oliveira et al. (2023), e a elevação do nível médio do mar em 0,50m, conforme estudo da UFF. Essa abordagem tem como objetivo avaliar de maneira integrada o comportamento do sistema frente a eventos extremos de precipitação associados à elevação do nível do mar.

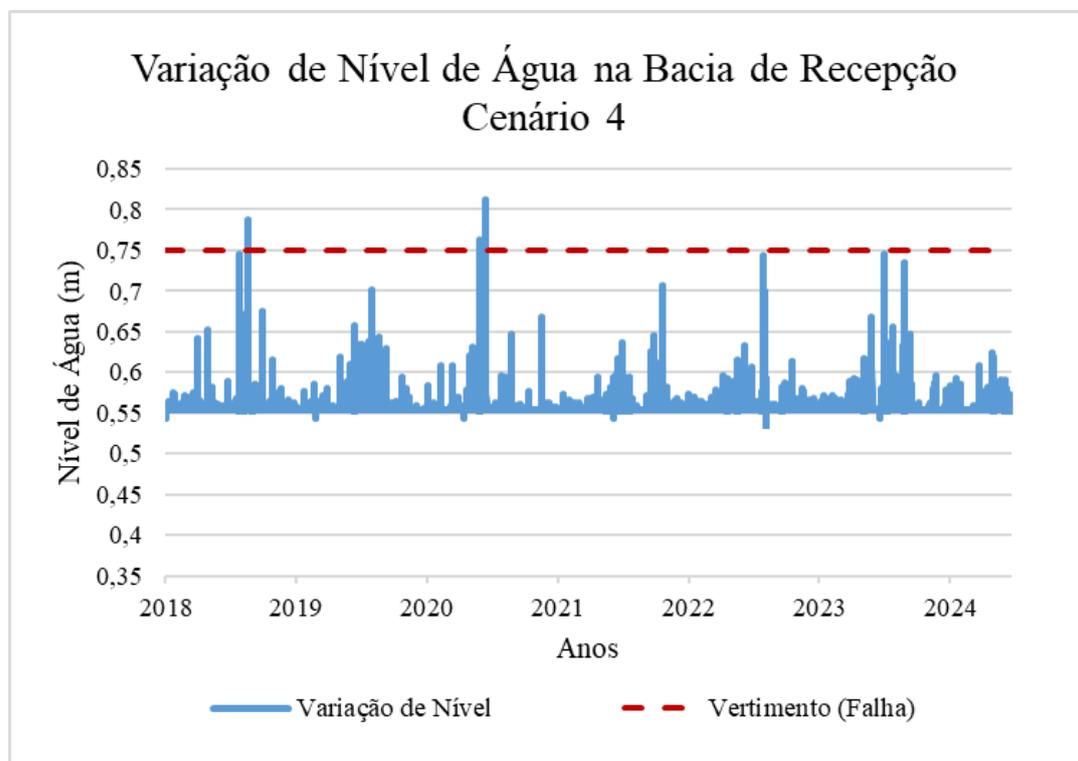


Figura 5.15 Variação de Nível de Água para o Cenário 4. Fonte: Própria

Como resultado do cenário 4, os picos de nível passam a atingir aproximadamente 0,80m, ultrapassando o vertimento, de 0,75m. A margem operacional, que no cenário atual girava

em torno de 0,20m, reduz-se para cerca de 0,05m, indicando transbordamentos com maior frequência, ainda que em situações pontuais. Esse resultado demonstra que a bacia de recepção pode vir a deixar de amortecer efetivamente em eventos extremos. É o cenário que apresenta uma falha consideravelmente maior que em todos os outros, ainda que pouco significativa em relação ao sistema no geral. A falha percentual da variação de nível, nesse cenário, é de 0,005%.

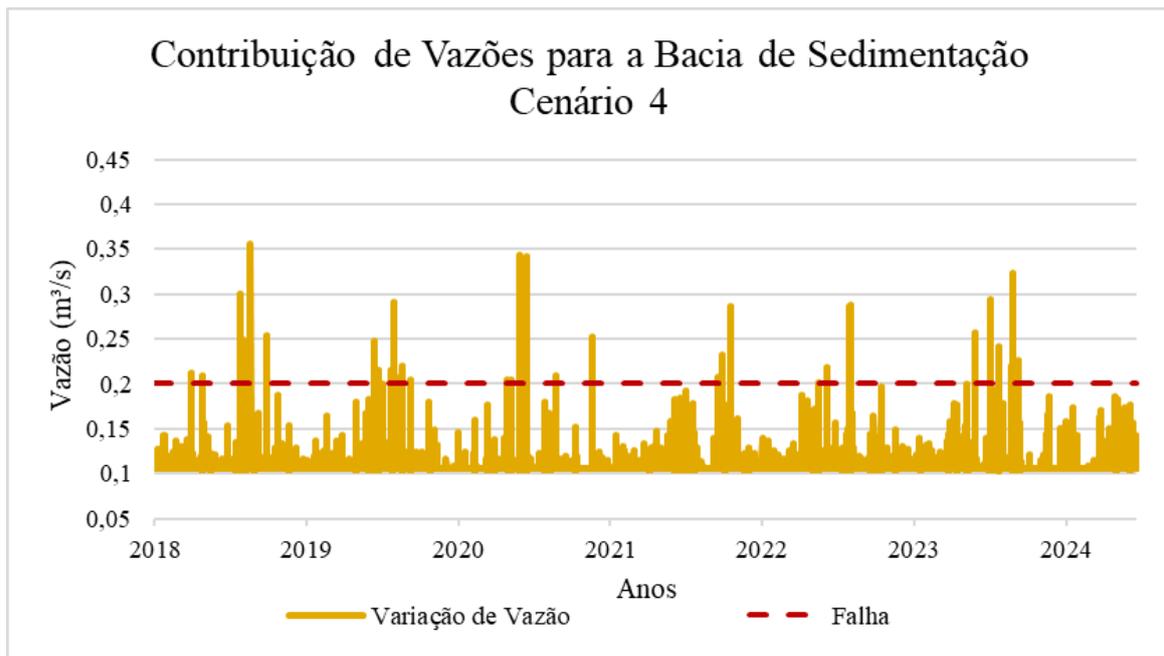


Figura 5.16 Contribuição de Vazões - Bacia de Sedimentação. Cenário 4. Fonte: Própria

Os hidrogramas mostram picos de até 0,35m³/s e a frequência e a magnitude das excedências são maiores do que às observadas em qualquer outro cenário. O percentual de falha chega a 0,068%, demonstrando que, apesar de ser o cenário mais crítico, ainda corrobora para ressaltar a efetividade do sistema, levando em conta que o percentual de falha segue sendo extremamente baixo.

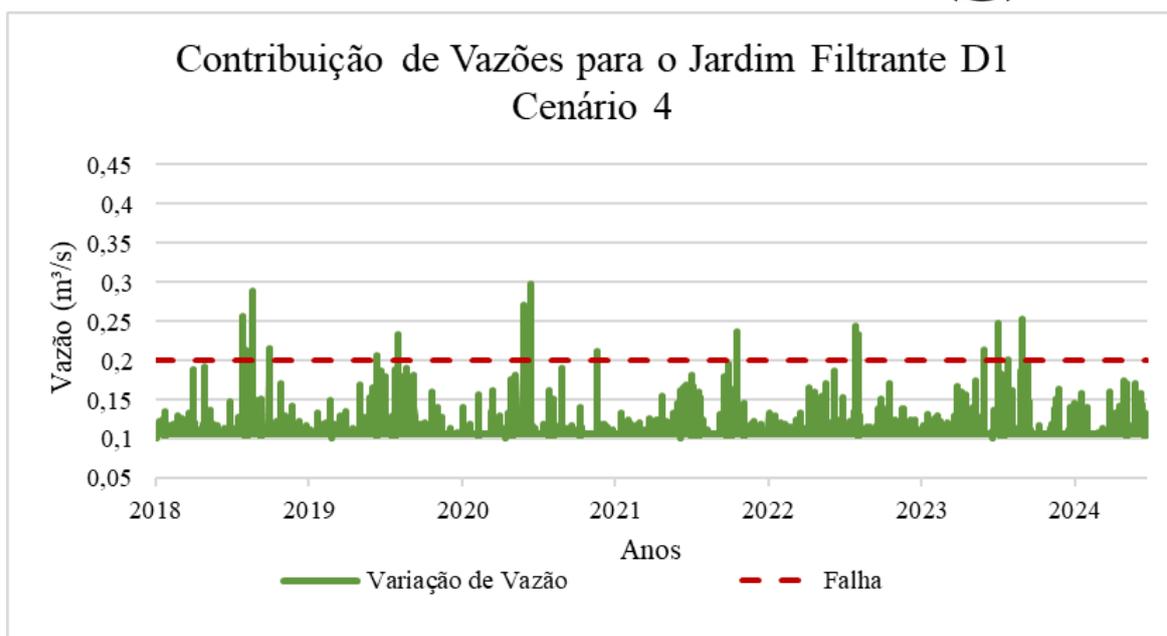


Figura 5.17 Contribuição de Vazões - Jardim Filtrante "D1". Cenário 4. Fonte: Própria

A vazão máxima no jardim filtrante “D1” atinge um valor próximo a $0,30\text{m}^3/\text{s}$, excedendo em quase 50% o critério da falha. Nota-se um prolongamento no tempo em que o sistema opera acima da falha, comprometendo o processo de infiltração e retenção de sólidos. No entanto, quando comparado ao panorama geral, o percentual de falha continua baixo, chegando a 0,041%. Esse cenário é parecido com o cenário 2, onde se considera apenas os 30% de aumento na intensidade da chuva, levando em conta que já havia sido avaliado o fato de que o nível do mar não influencia significativamente quando são avaliadas apenas as vazões.

5.5 Comparação dos cenários

A análise comparativa entre os quatro cenários simulados tem como objetivo compreender os limites operacionais e os pontos de fragilidade do sistema de jardins filtrantes diante de distintas mudanças climáticas. Dessa forma, foram sobrepostos os resultados das simulações hidrodinâmicas de cada cenário nos três gráficos previamente avaliados, permitindo a visualização conjunta e comparativa de todas as diferentes configurações.

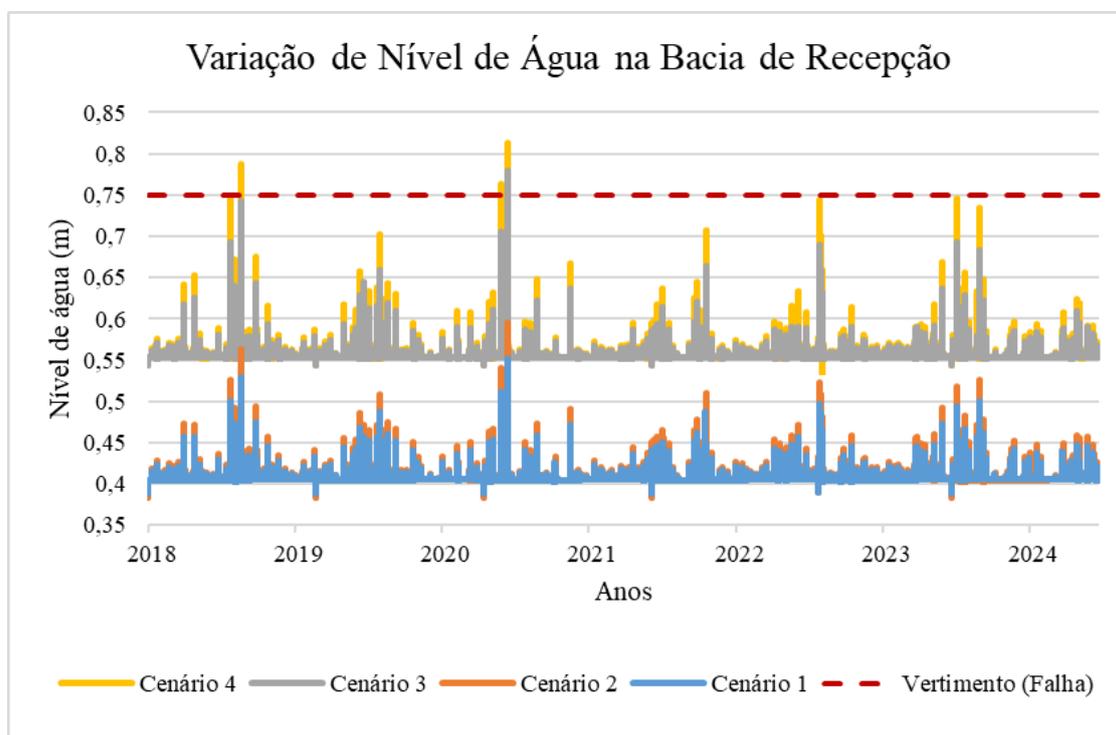


Figura 5.18 Variação de Nível de Água na Bacia de Recepção de todos os cenários. Fonte: Própria.

Quanto aos perfis temporais sobrepostos nos gráficos, observa-se que, na bacia de recepção, a curva referente às condições atuais (cenário 1) mantém-se abaixo da cota de vertimento (0,75m), ao mesmo tempo que o aumento de 30% na intensidade pluviométrica (cenário 2) aproxima repetidamente os picos desse limite, porém, sem ultrapassá-lo. A simples elevação do nível do mar em 0,50m (cenário 3) faz com que toda a curva de variação de nível seja deslocada para valores mais elevados, provocando transbordamentos em situações pontuais, e a combinação de ambos os efeitos (cenário 4) resulta em extravasamentos com maior frequência, ainda que baixa, e níveis de até 0,80m.

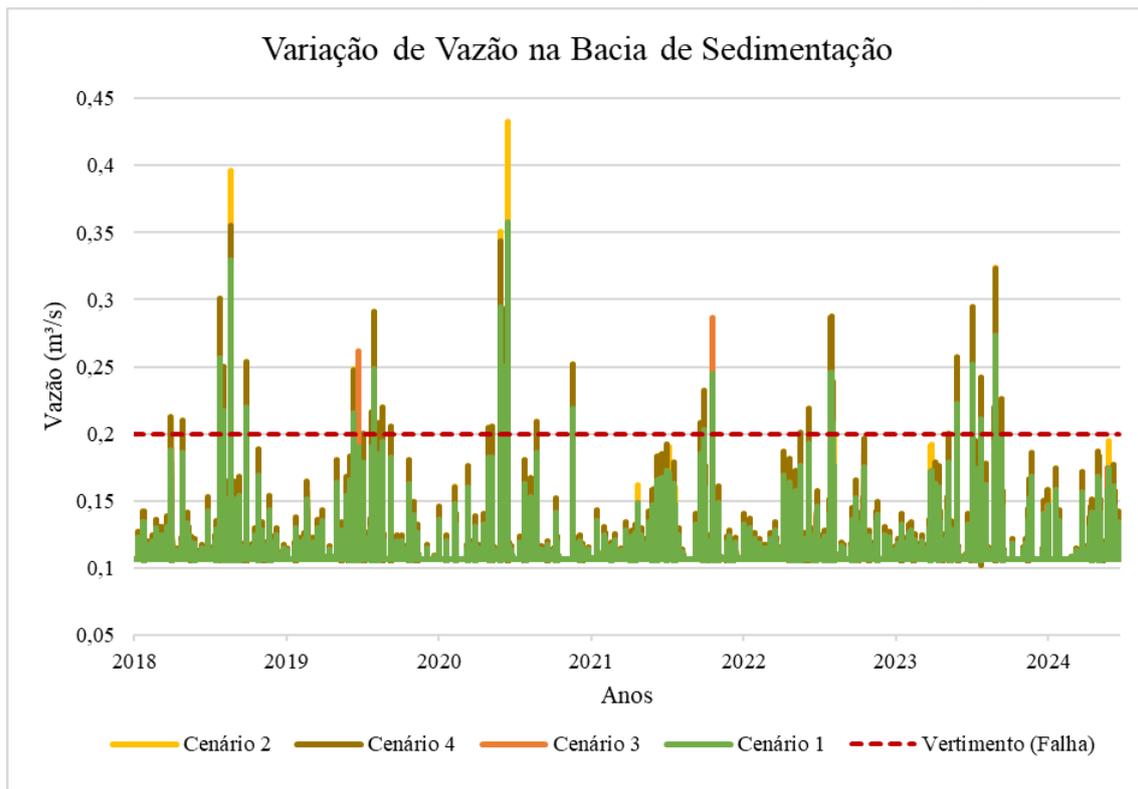


Figura 5.19 Variação de Vazão na Bacia de Sedimentação de todos os cenários. Fonte: Própria.

Nos hidrogramas de vazão para a bacia de sedimentação, o cenário 1 raramente excede o critério de falha de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto o cenário 2 atinge picos de até $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$; o cenário 3 aumenta modestamente a frequência de excedências e o cenário 4, embora um pouco atenuado em relação ao pico máximo do cenário 2, mantém as recorrências de falha.

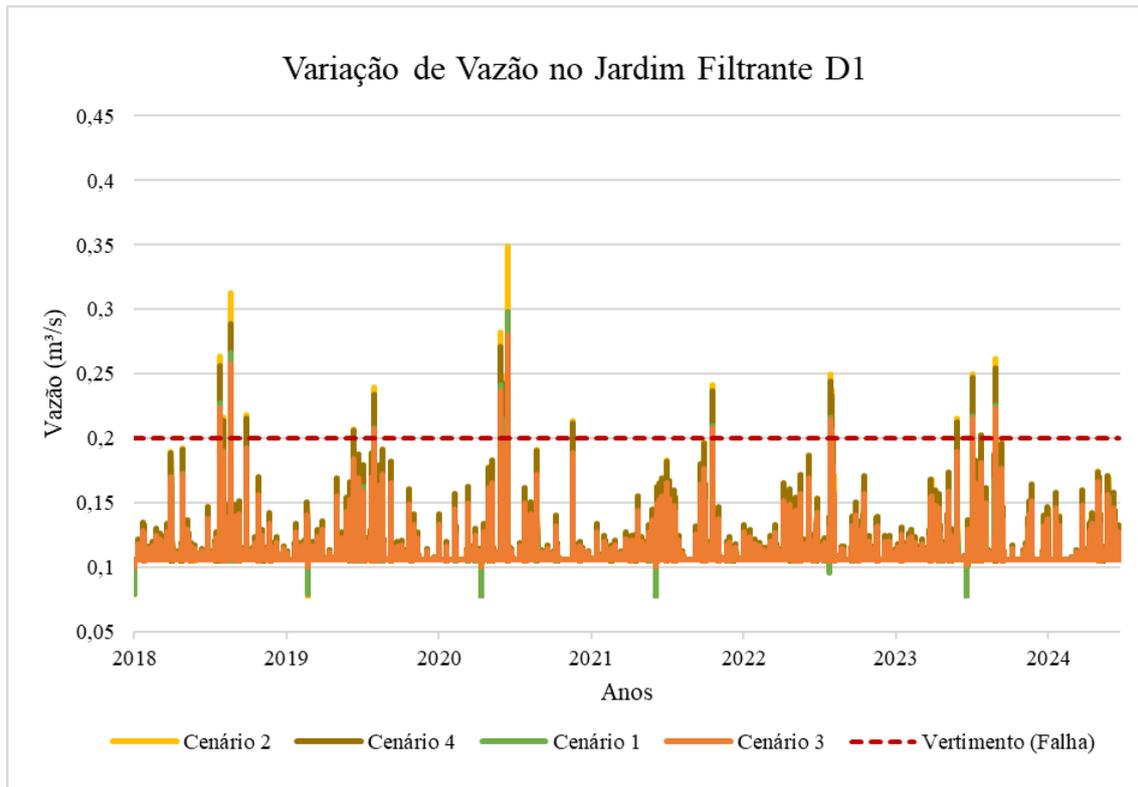


Figura 5.20 Variação de Vazão no Jardim Filtrante D1 de todos os cenários. Fonte: Própria.

Por fim, no jardim filtrante D1, o fluxo praticamente não ultrapassa $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ no cenário 1, surge com picos de $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$ no cenário 2, apresenta poucos excessos no cenário 3 e repete o padrão crítico do cenário 2 no cenário 4, com maior duração acima do vertimento.

Quando esses comportamentos são sintetizados nas Tabelas 4 e 5, confirma-se que a vazão média permanece estável em torno de $0,1067 \text{ m}^3/\text{s}$ em todos os cenários, o desvio-padrão cresce de $0,0043 \text{ m}^3/\text{s}$ (cenário 1) para cerca de $0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$ nos cenários com chuva intensificada, o percentual de falha na bacia de sedimentação varia de $0,0371 \%$ a $0,0672 \%$ e nos jardins filtrantes de $0,0230 \%$ a $0,0406 \%$, enquanto as vazões máximas alcançam $0,294 \text{ m}^3/\text{s}$ (cenário 1), $0,433 \text{ m}^3/\text{s}$ (cenário 2), $0,331 \text{ m}^3/\text{s}$ (cenário 3) e $0,355 \text{ m}^3/\text{s}$ (cenário 4) na bacia de sedimentação, e valores levemente inferiores no jardim D1. Em conjunto, gráficos e tabelas evidenciam que, apesar das falhas pontuais em cenários críticos, o sistema opera de forma efetiva na maior parte do tempo, conferindo resiliência ao arranjo de jardins filtrantes frente às projeções de mudanças climáticas.

Tabela 4. Análise das vazões de contribuição para a Bacia de Sedimentação. Fonte: Própria

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Q Média (m ³ /s)	0,1067	0,1069	0,1067	0,1069
Q Desv. Pad. (m ³ /s)	0,0043	0,0056	0,0043	0,0055
% de falha	0,0371	0,0654	0,0406	0,0672
Q máx (m ³ /s)	0,2943	0,4328	0,3306	0,3554

Tabela 5 Análise das vazões de contribuição para os Jardins Filtrantes. Fonte: Própria

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Q Média	0,1067	0,1069	0,1067	0,1069
Q Desv. Pad.	0,0035	0,0046	0,0035	0,0046
% de falha	0,0230	0,0406	0,0230	0,0406
Q máx	0,2983	0,3488	0,2803	0,2980

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o desempenho do sistema de jardins filtrantes do Parque Orla Piratininga frente a cenários críticos, levando em consideração tanto o impacto das mudanças climáticas quanto o aumento da frequência de eventos pluviométricos extremos.

Com essa finalidade, foram cumpridos cinco objetivos específicos, iniciando-se pela elaboração de um referencial teórico abrangente que fundamentou conceitos-chave de manejo de águas pluviais e soluções baseadas na natureza, principalmente quanto aos jardins filtrantes, objeto de estudo, além de finalizar o capítulo teórico com a discussão dos efeitos das mudanças climáticas sobre o manejo de águas pluviais, sintetizando todas as informações necessárias para o conhecimento sobre o tema. Em seguida, procedeu-se à análise detalhada do estudo de caso e do funcionamento hidráulico dos jardins filtrantes, avaliando sua capacidade de retenção, o tempo de resposta ao escoamento e sua contribuição para a redução do risco de inundação, especificando todas as suas etapas. Posteriormente, realizou-se a avaliação do regime de chuvas de Piratininga e do comportamento do nível da Lagoa de Piratininga, o que possibilitou a construção dos hietogramas e hidrogramas utilizados nas simulações. Por fim, executaram-se simulações hidrodinâmicas em MODCEL para quatro cenários críticos tornando possível a avaliação dos resultados obtidos.

O desenvolvimento metodológico deste trabalho iniciou-se com um estudo hidrológico simplificado, cujo propósito foi caracterizar de maneira detalhada a bacia hidrográfica do Rio Cafubá. Com esse objetivo, coletaram-se dados topográficos, como a área total e a sua declividade média, além de um levantamento do uso do solo, de forma a definir o coeficiente de escoamento. Em sequência, aplicou-se o Método Racional considerando intensidades pluviométricas obtidas do INMET (2018–2023) e da Defesa Civil (2024). Nesse mesmo escopo, avaliou-se o aporte de esgotamento sanitário ao balanço hídrico da bacia, estimando-se vazões adicionais provenientes de redes coletoras municipais, de modo a incorporar eventuais contribuições de efluentes no cálculo global de escoamento. Concluído o levantamento hidrológico, procedeu-se ao estudo hidráulico por meio do software MODCEL. Foram executadas simulações hidrodinâmicas para quatro cenários

críticos: (i) condições atuais; (ii) aumento de 30 % na intensidade pluviométrica; (iii) elevação de 0,50m no nível médio do mar; e (iv) integração entre o aumento da intensidade pluviométrica com a elevação do nível do mar. Para cada um, inseriram-se hietogramas com durações de 60 min e hidrogramas de entrada calibrados conforme o Método Racional e os registros históricos. Os resultados analisados foram variações de níveis na bacia de recepção e de vazões de pico e base na bacia de sedimentação e no jardim filtrante D1, comparados a critérios de falha (0,75 m e 0,2 m³/s), permitindo avaliar de forma integrada a resiliência e os pontos de estrangulamento do sistema sob diferentes condicionantes climáticos.

Nas simulações dos cenários, o sistema de jardins filtrantes revelou desempenho resiliente, ainda que sujeito a variações conforme as condições impostas. No cenário de referência (situação atual), os jardins filtrantes operaram praticamente durante todo o período dentro de sua capacidade projetada, com vazões de entrada médias em torno de 0,107 m³/s e picos isolados abaixo de 0,30 m³/s, o que garante tempo de detenção adequado e eficiência na remoção de sólidos. Quando se aplicou o acréscimo de 30 % na intensidade pluviométrica, observou-se maior frequência de sobrecargas pontuais, com picos de até 0,35 m³/s e falhas ocorrendo em aproximadamente 0,041% do tempo e, ainda assim, o sistema manteve hidrogramas suavizados e recuperou de forma rápida sua capacidade de infiltração. No cenário de elevação do nível do mar, embora a linha de base elevada tenha reduzido o gradiente hidráulico de saída, os jardins filtrantes continuaram a operar dentro dos limites operacionais em quase 100% do tempo, registrando picos moderados próximos a 0,28 m³/s. Finalmente, na combinação dos dois impactos, a vazão de pico no jardim mais crítico atingiu 0,30 m³/s e as durações acima do limiar de 0,20 m³/s aumentaram, mas não comprometeram a funcionalidade principal do sistema, que apresentou eficiência superior a 99% do período simulado. Esses resultados destacam que, mesmo sob tensões provocadas por eventos climáticos extremos, o sistema de jardins filtrantes proporciona amortecimento hidráulico inicial eficaz e manutenção de condições de operação estáveis, evidenciando sua resiliência e adequação como solução baseada na natureza para manejo urbano de águas pluviais.

Em trabalhos que empregam modelagem hidrológica e hidrodinâmica para a avaliação de sistemas de jardins filtrantes, algumas limitações podem comprometer a precisão e a

confiabilidade dos resultados. Inicialmente, a disponibilidade e a qualidade dos dados de campo muitas vezes são insuficientes: lacunas em séries pluviométricas, manutenção irregular de estações e ausência de monitoramento contínuo das cotas de jusante dificultam a calibração e validação do modelo. Além disso, a definição de parâmetros e critérios de falha geralmente recorre a valores genéricos ou retirados de estudos piloto que podem não refletir as condições locais de solo, substrato e operação dos jardins filtrantes. As projeções climáticas empregadas, sejam as projeções de aumento de precipitação ou de elevação do nível do mar, dependem de técnicas de downscaling regional (WILBY; WIGLEY, 1997). Essas técnicas introduzem incertezas ao converter dados de modelos globais para a escala local, o que pode resultar em estimativas que superestimam ou subestimam os impactos reais. Reconhecer essas limitações é fundamental para interpretar adequadamente os resultados e orientar futuros aprimoramentos metodológicos, de instrumentação e de coleta de dados, de modo a reduzir incertezas e elevar a confiabilidade das simulações.

Ao demonstrar a integração do Método Racional com simulações hidrodinâmicas em MODCEL, a pesquisa estabelece um fluxo metodológico replicável, capaz de transformar dados pluviométricos históricos e projeções climáticas em avaliações precisas do comportamento hidráulico. Essa abordagem fornece subsídios técnicos para a otimização do dimensionamento de estruturas de retenção, bacias de decantação e leitos de jardins filtrantes, ampliando as ferramentas disponíveis para o enfrentamento de inundações urbanas. Além disso, a avaliação comparativa de diversos cenários climáticos, incluindo aumento de intensidade pluviométrica e elevação do nível do mar, contribui para a literatura sobre resiliência de soluções baseadas na natureza.

A adequação desta metodologia ao contexto local é outro ponto de importância. A utilização de séries pluviométricas específicas de Niterói, fornecidas pelo INMET e pela Defesa Civil, aliada à consideração de elevação de maré projetada por estudos regionais da UFF, assegura que as simulações reflitam fielmente as particularidades geográficas, usos de solo e dinâmica costeira da área de estudo. Essa adequação ao contexto regional aumenta a confiabilidade dos resultados e fortalece a aplicabilidade das recomendações junto às autoridades municipais, permitindo uma possível formulação de políticas de

drenagem e de manejo de águas pluviais mais eficazes e adaptadas às realidades locais de Piratininga.

Para trabalhos futuros, recomenda-se inicialmente ampliar o horizonte de análise mediante séries históricas mais longas e a incorporação de cenários climáticos refinados com diferentes trajetórias de concentração de gases de efeito estufa, de modo a avaliar a performance dos jardins filtrantes ao longo de décadas e sob condições de mudança de uso do solo. Também se recomenda a verificação hidráulica do sistema para tempos de recorrência específicos, típicos do funcionamento de sistemas de drenagem, bem como a consideração da oscilação do nível Lagoa de Piratininga caso registros ou simulações sejam desenvolvidos para medir ou estimar sua variação.

Caso, medições do sistema sejam realizadas sugere-se a calibração e validação do modelo hidrológico e hidrodinâmico para aumentar a sua confiabilidade.

Adicionalmente, é pertinente o desenvolvimento de critérios de falha específicos para cada componente (bacia de recepção, sedimentação e jardins filtrantes), por meio de ensaios de campo e coleta de dados em tempo real, de forma a validar os limites de extravasamento e de vazão crítica, reduzindo incertezas atuais. De forma complementar, estudos de custo-benefício comparativos entre soluções convencionais de macrodrenagem e jardins filtrantes poderiam embasar decisões de investimento público, considerando aspectos hidrológicos, serviços ecossistêmicos e benefícios socioambientais.

O estudo reforça que políticas públicas de drenagem urbana devem evoluir na direção de promover infraestruturas verdes, integrando soluções baseadas na natureza aos planos diretores e aos instrumentos de gestão municipal, de modo a criar cidades mais adaptáveis, resilientes e ambientalmente sustentáveis para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A SEGUIR: NITERÓI. Niterói está vulnerável à elevação do nível do mar com aquecimento global, diz a UFF. Disponível em: <<https://aseguirniteroi.com.br/noticias/niteroi-esta-vulneravel-a-elevacao-do-nivel-do-mar-com-aquecimento-global-diz-a-uff/>>. Acesso em: 02 de junho de 2025.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas de saneamento: diagnóstico do esgotamento sanitário urbano. Brasília: ANA, 2021.

AQUAFLUXUS. Estudo de concepção de sistema de jardins filtrantes para o Parque Orla de Piratininga Alfredo Sirkis – POPAS. Projeto AQF-2021005. Niterói: Aquafluxus, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Prêmio Inovação em Saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 2021.

BRASIL. Ministério das Cidades. Relatório SINISA – Esgotamento Sanitário 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/RELATORIO_SINISA_ESGOTAMENTO_SANITARIO_2024.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Cadernos de Infraestrutura Verde Urbana, 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Cadernos de Infraestrutura Verde Urbana. Brasília: MDR, 2020.

BRASIL. Ministério das Cidades. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2022. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília: 2023.

BRIX, H. Do macrophyte use in constructed wetlands. Water Science and Technology, v. 35, n. 5, p. 11-17, 1997.

BRIX, H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. Water Science and Technology, 1994.

BRUNDTLAND, G. H. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Geneva: United Nations, 1986.

BURIAN, S. J.; et al. Urban stormwater management in the United States: historical developments and future directions. *Journal of Environmental Management*, v. 55, n. 2, p. 79–96, 1999.

CAINES, C. Lake and marsh plant ecology: characteristics of macrophytes. *Ecology*, v. 46, n. 5, p. 65–75, 1965.

CAF – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DA AMÉRICA LATINA. Inaugurado em Niterói o maior projeto de soluções naturais do Brasil. 2023. Disponível em: <<https://www.caf.com/pt/presente/noticias/inaugurado-em-niteroi-o-maior-projeto-de-solu%C3%A7%C3%B5es-naturais-do-brasil/>>. Acesso em: 03 jun. 2025.

CÂMARA METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO, 2017. Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI/RMRJ). Rio de Janeiro: Câmara Metropolitana de Integração Governamental (CMIG), 2017.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CEPAL – Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe. Gestão da drenagem urbana: princípios e estratégias. Santiago: CEPAL, 2015. Disponível em: <<https://www.cepal.org/pt-br/publicacoes/38004-gestao-drenagem-urbana>>. Acesso em: 20 de maio de 2025. Acesso em: 20 de maio de 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Diretrizes para o Manejo de Águas Pluviais Urbanas. São Paulo: CETESB, 2011.

CIRIA – Construction Industry Research and Information Association. The SuDS Manual (C697). London: CIRIA, 2007.

CISPAR – Consórcio Intermunicipal de Saneamento do Paraná. Drenagem Urbana. Disponível em: <https://www.cispar.pr.gov.br/pagina/992_Drenagem-Urbana.html>. Acesso em: 20 de maio de 2025.

COHEN-SHACHAM, E.; et al. Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland: IUCN, 2016.

CONFERÊNCIA DAS PARTES (COP-16). Projeto piloto de gestão costeira na Baía de Guanabara: relatório técnico. Cancun: COP-16, 2010.

CONFERÊNCIA DAS PARTES (COP-27). Reconhecimento do projeto de Parques de Orla pela ONU. Sharm el-Sheikh: COP-27, 2022.

DAVIS, J.; et al. Constructed wetlands to treat industrial wastewaters. *Water Science and Technology*, v. 25, n. 3, p. 1–10, 1995.

DEFESA CIVIL DE NITERÓI; INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Dados pluviométricos de Niterói/RJ (julho 2018–dezembro 2024). Niterói: Defesa Civil de Niterói; INMET, 2024.

EGGERMONT, H.; et al. Nature-based Solutions: New Approaches for Addressing Societal Challenges. *Landscaping Journal*, v. 10, p. 1–12, 2015.

EUROPEAN RESEARCH EXECUTIVE AGENCY. Nature-based solutions. Comissão Europeia, 2024. Disponível em: <https://rea.ec.europa.eu/funding-and-grants/horizon-europe-cluster-6-food-bioeconomy-natural-resources-agriculture-and-environment/nature-based-solutions_en>. Acesso em: 28 jun. 2025.

FLETCHER, T. D.; et al. SUDS, LID, BMPs and more – The evolution and application of urban drainage. *Journal of Hydrology*, v. 283, p. 134–145, 2015.

FUNDAÇÃO RIO-ÁGUAS. Programa Mutirão Reflorestamento: relatório de atividades. Rio de Janeiro: Fundação Rio-Águas, 2019.

G1. Chuva forte na Região Metropolitana do Rio deixa ruas alagadas. G1 Rio de Janeiro, 8 dez. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de->

janeiro/noticia/2020/12/08/chuva-forte-na-regiao-metropolitana-do-rio-deixa-ruas-alagadas.ghtml>. Acesso em: 15 jun. 2025.

HUTTON, G.; VARUGHESE, M. The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene. Washington: World Bank Group, 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2023.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Resumo Executivo - Ranking do Saneamento de 2024. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Resumo-Executivo-Ranking-do-Saneamento-de-2024-TRATA-BRASIL-GO-ASSOCIADOS.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: [s.n.].

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, NY, USA: [s.n.].

KABISCH, N.; et al. Nature-based Solutions to Climate Change Mitigation and Adaptation in Urban Areas: Linkages between Cities, Knowledge and Governance. *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 59, n. 11, p. 10–28, 2016.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. *Treatment wetlands*. 2. ed. CRC press, 2009.

MAES, J.; JACOBS, S. Nature-based solutions for Europe’s sustainable development. *Conservation Letters*, v. 8, n. 6, p. 1–10, 2015.

MEIO AMBIENTE MG – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. Drenagens de águas pluviais. Disponível em: <<https://www.meioambiente.mg.gov.br/pt/drenagens-de-água>>. Acesso em: 20 de maio de 2025.

MELBOURNE WATER. Constructed Wetlands Design Manual, 2005.

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

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.

NAÇÕES UNIDAS DO BRASIL. O que são as mudanças climáticas? Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-são-mudanças-climáticas>>. Acesso em: 01 de junho de 2025.

Nações Unidas do Brasil. (2022). Relatório sobre Soluções Baseadas na Natureza para adaptação urbana.

NITERÓI. Secretaria Municipal de Saúde. População residente por bairro – Censo 2022: Cafubá. Disponível em: <[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.](http://tabnit.saude.niteroi.rj.gov.br/cgi-bin/webtabz3.exe?Linha=Bairro%7CBAIRRO_COD%7Ccast%28value+as+integer%29%7CPop22%2FBairro.cnv&Coluna=-N%E3o-Ativa--&Incremento=Populacao+residente%7Ccast%28value+as+integer%29&pesqmes1=&SBairro=CAFUBA%7CCOD+07%7C6&nomedef=Pop22%2Fcenso22.def&grafico=>. Acesso em: 03 jul. 2025.</p></div><div data-bbox=)

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.

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. 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., MAGALHÃES, P. C. D., REZENDE, O. M., SOUSA, M. M. D., MARQUES, R. H. M., & GOMES MIGUEZ, M. MODCEL-MHUS: a comprehensive multilayer hydrodynamic unified simulation for stormwater, sanitary sewer systems, and urban surface. *Water Science & Technology*, v. 90, n. 1, p. 190-212, 2024.

PEREZ, L. P. et al. Mudanças climáticas e desastres: análise das desigualdades regionais no Brasil. *Sustainability in Debate*, v. 11, n. 3, p. 278–296, 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NITERÓI. Niterói tem o melhor saneamento do estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://niteroi.rj.gov.br/niteroi-tem-o-melhor-saneamento-do-estado-do-rio-de-janeiro/>>. Acesso em: 03 jun. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NITERÓI. Projeto ProSustentável – Parque Orla Piratininga. 2025. Disponível em: <https://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br/parque-orla-piratininga/>. Acesso em: 20 maio 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NITERÓI. Prefeitura de Niterói realiza seminário sobre Soluções Baseadas na Natureza. 2024. Disponível em: <https://niteroi.rj.gov.br/prefeitura-de-niteroi-realiza-seminario-sobre-solucoes-baseadas-na-natureza/>. Acesso em: 03 jun. 2025.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). Relatório de Desenvolvimento Humano 2008. Brasília: PNUD, 2008.

POMPÊO, M. G. Críticas às soluções emergenciais de drenagem urbana. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 10–20, 2000.

RIAHI, K.; et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, v. 42, p. 153–168, 2016.

ROCKSTRÖM, J.; et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, v. 14, n. 2, p. 32, 2009.

SEZERINO, P. H.; PHILIPPI, L. S.; ZOTELLI, M. F. *Wetlands construídos: fundamentos e aplicações*. Florianópolis: UFSC, 2012.

SIGEO. *Sistema de Informação Geográfica Municipal*. Niterói: Prefeitura de Niterói, 2023.

SILVA, C. M. L. F. *Mudanças climáticas e ambientais: contextos educacionais e históricos*. 2015.

TRATA BRASIL. Niterói entre as 10 melhores cidades do Brasil em saneamento básico. 2024. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/451-anos-niteroi-10-melhores-saneamento-basico/>>. Acesso em: 03 jun. 2025.

TRATA BRASIL. Rio de Janeiro amplia serviço de tratamento de esgoto e mais que dobra investimento em saneamento por habitante. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/rio-de-janeiro-amplia-servico-de-tratamento-de-esgoto-e-mais-que-dobra-investimento-em-saneamento-por-habitante/>>. Acesso em: 03 jun. 2025.

TSUTIYA, M. T. *Instalações hidráulico-sanitárias*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

TUCCI, C. E. M. *Gestão de águas pluviais urbanas*. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2008.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Nairobi: UNEP, 2020.

UNICEF; WHO. Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2020: Five years into the SDGs. Geneva: World Health Organization, 2021.

UN-HABITAT. World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization. Nairobi: UN-Habitat, 2020.

VALLEJOS, B. A. et al. DIAGNÓSTICO DAS INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO HUMAITÁ-JUIZ DE FORA E POSSÍVEIS IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. I FluHidros - Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, 2022.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Ecological Engineering, 1998.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. Water, 2005.

VYMAZAL, J.; KRÖPFELOVÁ, L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Springer, 2008.

WEATHER SPARK. Condições meteorológicas históricas durante 2024 em Niterói, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/h/y/30571/2024/Condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-hist%C3%B3ricas-durante-2024-em-Niter%C3%B3i-Rio-de-Janeiro-Brasil>>. Acesso em: 02 jun. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality. 4. ed. Geneva: WHO, 2017.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: a review of methodologies and limitations. Progress in Physical Geography, v. 21, n. 4, p. 530–548, 1997.

WWAP – UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. Paris: UNESCO, 2023.



ZADAR CONSTRUTORA. Projeto Parque Orla Piratininga. Apresentação em PowerPoint, 2024.