



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

MODELAGEM HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA DE SUPORTE PARA
PROJETOS DE DRENAGEM URBANA: UM ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO
ACARI

Wallace Correa de Moura Filho

Projeto de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez e Luciana Fernandes Guimarães

Rio de Janeiro
Agosto de 2023

MODELAGEM HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA DE SUPORTE PARA
PROJETOS DE DRENAGEM URBANA: UM ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO
ACARI

Wallace Correa de Moura Filho

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof. Marcelo Gomes Miguez, D.Sc.

Prof^a. Luciana Fernandes Guimarães, D.Sc.

Prof. Matheus Martins de Sousa, D.Sc.

Prof. Virgilio Noronha Ribeiro da Cruz, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

AGOSTO de 2023

DE MOURA FILHO, WALLACE CORREA.

Modelagem Hidrodinâmica como ferramenta de suporte a projetos de drenagem urbana: Um estudo de caso na bacia do rio Acari / Wallace Correa de Moura Filho – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2023.

xii, 81 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez e Luciana Fernandes Guimarães

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Civil, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 68-73.

1. Resiliência a Inundações; 2. Risco; 3. Drenagem Sustentável; 4. Modelagem Matemática.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao Universo, por me permitir ter recebido a vida e chegado até aqui com todas as bênçãos que recebi.

Aos meus pais e minha família, Jaqueline Abraham e Richard Abraham, por todo o apoio que sempre tive em todos os âmbitos, por acreditarem em mim e por me fazerem acreditar também. Por correrem junto comigo em direção aos meus sonhos e me apoiarem tanto em todas as esferas e circunstâncias, vibrando com cada conquista e impulsionando em cada dificuldade.

À minha avó materna, Maria Serrath, que por ocasião do destino não pôde estar fisicamente presente neste momento, mas certamente observa meus caminhos e me dá forças onde estiver, como a segunda mãe que sempre foi.

Aos meus amigos de longa data e irmãos de consideração Matheus Lima, Julia Dreux, Pedro Rodrigues e Eduardo Toito que testemunharam o início, o meio e o fim dessa jornada, estando do meu lado dos piores e nos melhores momentos e abraçando todas as minhas versões.

Aos meus colegas e amigos de turma Daniel Begonha, Bruno Corrêa, Matheus Raymundo e João Arthur Ferreira, assim como muitos outros, que dividiram essa caminhada comigo e me ensinaram que nunca se caminha sozinho compartilhando sentimentos, sessões de estudo, trabalhos em grupo e momentos de lazer.

Aos meus amigos de outras caminhadas que também acompanharam de fora a minha passagem pela UFRJ e de alguma forma me apoiaram ou aconselharam, em especial Juan Decotté, Gustavo Alcantara, Juliane Natalizi, João Pedro Ferrari, Lucas França, Nicolas Drummond, Carolina Coutinho e Karina de Almeida

A toda equipe do LHC, que me acolheu três vezes ao longo dessa graduação: Como aluno extensionista, como estagiário e para o desenvolvimento do projeto de graduação, em especial aos que tive mais oportunidade de conviver diretamente Bruna Battemarco, João Paulo Fraga, Francis Miranda e Osvaldo Rezende.

Aos meus orientadores, Marcelo Gomes Miguez e Luciana Fernandes Guimarães, por também me acolherem no LHC e aceitarem o desafio de me orientar e avaliar, assim como por todos os ensinamentos que recebi nesse tempo e toda a parceria que foi desenvolvida.

A Maria Vitória Ribeiro, M.Sc pelo Proarq, pelo desenvolvimento do seu projeto de dissertação integrado com o presente trabalho e disponibilidade em me auxiliar e sanar todas as dúvidas.

Ao professor Markus Lima, por aceitar me orientar em um projeto de iniciação científica que despertou de forma definitiva o meu amor pelo campo de estudo de dados e modelagem.

Aos meus companheiros animais presentes e que já se foram Pandora, Lua, Mimoso, Tadeu, Afrodite, Sol, Mel, Uni, Pamella e Athena, por me ensinarem o que é o amor incondicional e sempre entenderem meus sentimentos mesmo que não falemos a mesma língua.

E, finalmente, a mim mesmo, por ter perseverado e chegado até aqui mesmo com todas as noites solitárias de estudo, todos os contratempos e resultados negativos inesperados e todos os outros percalços que surgiram nesse caminho árduo.

A todos que fizeram parte dessa trajetória de uma forma ou de outra, meus sinceros agradecimentos.

Wallace Correa de Moura Filho

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

MODELAGEM HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA DE SUPORTE A
PROJETOS DE DRENAGEM URBANA: UM ESTUDO DE CASO NA BACIA DO
ACARI

Wallace Correa de Moura Filho

Agosto/2023

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez e Luciana Fernandes Guimarães

Curso: Engenharia Civil

A crescente intervenção antrópica nas características físicas das bacias urbanizadas provoca desequilíbrios nas parcelas do ciclo hidrológico. Esses desequilíbrios, por sua vez, trazem uma série de prejuízos à população e ao meio ambiente na forma de inundações, alterações na estabilidade de taludes, propagação de doenças e diversos outros problemas. Nesse sentido, torna-se cada vez mais relevante a abordagem da drenagem urbana sustentável, que propõe medidas para recuperar a dinâmica hidrológica para um estado semelhante ao natural, enquanto simultaneamente produz um sistema mais harmônico e integrado, caracterizado por propiciar a concepção de espaços que possuam função social, em estruturas multifuncionais. Este trabalho busca, utilizando esses conceitos, realizar um estudo de caso detalhado da região da bacia hidrográfica do Rio Acari e avaliar intervenções propostas que possam beneficiar a população local. Foi utilizado o modelo matemático de células de escoamento - MODCEL - para avaliar a efetividade das medidas propostas em um cenário de projeto, assim como para a otimização dos reservatórios propostos, de forma a maximizar o potencial das intervenções e completar a prospecção das ações estudadas.

Palavras-chave: Drenagem Urbana; Modelagem Hidráulica; MODCEL; GIS; Acari; Planejamento Urbano.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer.

HYDRODINAMIC MODELING AS A DECISION-MAKING SUPPORT TOOL: URBAN DRAINAGE IN ACARI

Wallace Correa de Moura Filho

August/2023

Advisors: Marcelo Gomes Miguez and Luciana Fernandes Guimaraes

Course: Civil Engineering

The increasing anthropic intervention on the physical aspects of urbanized regions causes imbalances on the local hydrological cycle. These imbalances, on turn, bring a series of prejudices to the population and to the environment in the form of floods, changes in slope stability, propagation of diseases and other miscellaneous problems. In that sense, the sustainable urban drainage approach becomes more important than ever, proposing measures that envision the recovery of the local hydrologic dynamic to a state akin to the pre-urbanization one, while simultaneously building a more harmonic and integrated system, characterized by offering the conception of spaces that possess social roles, in multifunctional structures. This work aims to, by utilizing these concepts, develop a detailed case study of the Hydrographic Basin of the Acari River and evaluate proposed interventions that can benefit the local community. We will also use The Mathematical Flow Cell Model – MODCEL – in this study to quantify the proposed measures' effectiveness in the projected scenario, as well as perform parameter optimizations on the proposed interventions, so that the prospection of the studied actions can be more complete, and their potential can be fully harnessed.

Keywords: Urban Drainage; Hydraulic Modeling; MODCEL; GIS; Acari; Urban Planning

Sumário

1 Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Motivação.....	14
1.2	Antecedentes	16
1.3	Objetivo Geral	17
1.4	Objetivos Específicos	17
2	Revisão Bibliográfica	18
2.1	Relação entre água e cidade.....	18
2.2	Controle de inundações urbanas.....	24
2.3	Sistemas de espaços livres	26
2.4	Infraestruturas Verdes e Azuis (IVA)	28
2.4.1	Wetlands	30
2.4.2	Bacias de Retenção.....	31
2.4.3	Bacias de Detenção.....	33
2.4.4	Jardins de Chuva/Canteiros Pluviais	34
2.4.5	Pavimentos Permeáveis	36
2.4.6	Telhados Verdes	37
3	Metodologia	39
3.1	Modelo de Células de Escoamento (MODCEL).....	39
3.2	Otimização de reservatórios	41
3.3	Sistema de informações geográficas (SIG)	42
3.4	Linguagem de programação Python.....	43
4	Estudo de caso – Bacia do Acari	46
4.1	Intervenções propostas	49
5	Resultados e Discussão	55
5.1	Resultados da modelagem do projeto de Gomes (2022).....	55

5.2	Otimização das estruturas	57
5.2.1	Caso tipo 1: Reservatórios subutilizados	59
5.2.2	Caso tipo 2: Reservatórios em falha por vertimento.....	60
5.2.3	Resultados finais da modelagem	62
6	Considerações Finais	66
7	Referências Bibliográficas.....	68
A.1	Apêndice A – Códigos Python desenvolvidos	74
A.2	Apêndice B – Tabela final com as medidas de otimização	80

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição dos tipos de desastres naturais em 2021 em comparação com a média do período de 2001 a 2020.	14
Figura 2 - Londínio, cidade romana situada no estuário do rio Tâmis.	19
Figura 3 - Impactos da urbanização no ciclo hidrológico.	22
Figura 4 - Impactos da urbanização no hidrograma da bacia.	23
Figura 5 - Soluções baseadas na natureza como um conceito guarda-chuva.	26
Figura 6 - Exemplo de wetland.	31
Figura 7 - Exemplo de bacia de retenção.	32
Figura 8 - Exemplo de bacia de detenção.	34
Figura 9 - Exemplo de Jardim de Chuva.	35
Figura 10 - Exemplo de pavimentos permeáveis.	37
Figura 11 - Exemplo de telhado verde.	37
Figura 12 - Exemplo de arquivo JSON.	44
Figura 13 - Exemplo de gráficos gerados via script (Célula 104 – Antes do processo de otimização)	45
Figura 14 - Bairros da Bacia Hidrográfica do Rio Acari.	46
Figura 15 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Situação Atual)	48
Figura 16 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Cenário Base).	49
Figura 17 - Estruturas modeladas no cenário de projeto.	51
Figura 18 - Croqui representativo de disposição dos orifícios em uma bacia de retenção multifuncional.	53
Figura 19 - Croqui representativo de disposição dos orifícios em uma bacia de retenção.	54
Figura 20 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Cenário proposto não otimizado)	56
Figura 21 - Localização das células de referência para estudo de casos tipo	58
Figura 22 - Comportamento da célula de número 165 antes (esquerda) e depois (direita) da otimização	60
Figura 23 - Comportamento da célula de número 167 antes (esquerda) e depois (direita) da otimização	62
Figura 24 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Cenário proposto otimizado)	63
Figura 25 - Variações nas lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari em relação à situação inicial (Cenário proposto otimizado)	65

Figura 26 - Perfil de Níveis de Água máximos do Rio Acari para os cenário Atual e cenário de projeto otimizado 65

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Caracterização das estruturas de armazenamento	51
Tabela 2 - Caracterização das estruturas de armazenamento	52
Tabela 3 - Caracterização das tipologias de infiltração	54
Tabela 4 - Sumarização dos resultados da modelagem.....	64

1 Introdução

A ocupação urbana característica das grandes metrópoles e a consequente intensificação de fenômenos associados a ela (adensamento populacional, ilhas de calor, impermeabilização do solo, etc.) trazem consigo cada vez mais problemas (KUDDUS et al., 2020). Com isso, naturalmente encontram-se cada vez mais em pauta discussões relacionadas à sustentabilidade da ocupação humana. Apesar da atenção crescente, porém, ainda existem muitas controvérsias a respeito da materialização dessa preocupação, uma vez que tanto a sociedade humana quanto a natureza são sistemas extremamente complexos, cujas particularidades, necessidades e influências variam tanto na esfera temporal quanto na espacial. Dessa forma, revela-se cada vez mais importante que se levante esse tipo de questionamento e que a expansão urbana esteja sujeita a constante reavaliação, para que possa ser realizada de maneira coerente, de acordo com as demandas presentes e futuras, mas também de acordo com as necessidades do ecossistema natural (HOSONO, 2019).

O crescimento urbano acelerado muitas vezes ocorre desacompanhado da implementação de uma infraestrutura urbana de saneamento adequada. Segundo a Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007), o saneamento básico é composto pelos setores de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Neste trabalho, o setor de drenagem será abordado de forma integrada ao planejamento urbano, como forma de melhorar a qualidade de vida nas cidades.

A água é um bem indispensável à vida, seja nos seus usos consuntivos diretos associados às necessidades biológicas humanas (como ingestão) ou na sua utilização indireta para fins também fundamentais como geração de energia e transporte. A cadência de expansão urbana descuidada traz consigo uma gama de intervenções que impactam as parcelas do ciclo hidrológico, como o desmatamento da vegetação local e a impermeabilização do solo. Esses fatores, aliados às alterações topológicas e à formação de um sistema de drenagem artificial para atender a ocupação humana, resultam no aumento das vazões de pico superficiais, em danos aos ecossistemas fluviais e na redução nas vazões de base e no tempo de concentração da bacia (MIGUEZ, 2001).

Os eventos pluviométricos mais críticos para o sistema de drenagem são caracterizados por curtas durações e altas intensidades. Esses eventos torrenciais nos países periféricos, principalmente nas regiões tropicais onde as chuvas são mais intensas,

trazem diversos prejuízos sociais, humanos e materiais (JHA et al., 2012). As inundações decorrentes desses eventos causam, entre outros problemas, a paralisação de serviços e negócios, interrompem o funcionamento das redes de transportes, criam mecanismos de difusão de vetores de doenças e efeitos negativos mútuos com o sistema de esgotamento sanitário (REZENDE et al., 2018).

O relatório de desastres naturais elaborado pela Organização das Nações Unidas (CRED, 2022) indica que a maior parte dos desastres naturais catalogados correspondem às inundações, conforme apresentado na Figura 1. Além disso, a ocorrência de eventos de inundações apresenta uma tendência crescente, conforme pode também ser observado na mesma figura.

Figura 1 - Distribuição dos tipos de desastres naturais em 2021 em comparação com a média do período de 2001 a 2020.



Fonte: CRED, 2022.

Considerando a criticidade destes fenômenos tanto em termos temporais (na medida em que apresentam crescente frequência) quanto espaciais (devido à natureza global do processo de urbanização que age como principal catalisador desses fenômenos), entende-se que os sistemas de drenagens frágeis e despreparados constituem um risco à integridade física e financeira da população, e constituem também um enorme obstáculo no desenvolvimento dos países, tanto sob a ótica econômica quanto social. Nesse contexto, a drenagem urbana sustentável surge como resposta a essa demanda e constitui uma importante abordagem para aumentar a resiliência das cidades.

1.1 Motivação

As inundações urbanas representam uma das mais críticas fontes de impactos negativos nas regiões urbanas, especialmente em países em desenvolvimento. Nesses

países, além de muitas vezes existir a escassez de recursos, os processos de industrialização e urbanização em geral foram tardios e rápidos, sem o devido acompanhamento da infraestrutura necessária (MIGUEZ et al., 2012).

Entre 2001 e 2020, as inundações causaram uma média de 5185 mortes por ano (CRED, 2022). No caso do Brasil, entre 1990-2014, dados históricos apontam que 82,2% das mortes devido a desastres naturais estão ligadas às inundações, mesmo sua frequência sendo apenas de 65,2% (EM-DAT, 2022). Além disso, o risco associado a cheias e inundações no Brasil refere-se a 98,6% da Perda Anual Média (*Average Annual Loss*), tendo um custo estimado de 4,44 bilhões de dólares (UNISDR, 2019).

Partindo disso, este trabalho propõe a utilização dos conceitos de drenagem urbana sustentável para a mitigação dos impactos das inundações em uma bacia hidrográfica urbana. O estudo de caso escolhido é a Bacia Hidrográfica do Rio Acari, localizada na zona norte do município do Rio de Janeiro e que possui mais de 140 km² de área de contribuição. O rio Acari, junto com o rio Pavuna, formam o rio São João de Meriti, que deságua na Baía de Guanabara.

A Bacia Hidrográfica do Rio Acari possui graves problemas de infraestrutura associados a cheias, inundações, assoreamento e deposição de dejetos. A urbanização da região se deu de forma irregular, caracterizada por ocupação excessiva das margens, estrangulando assim o escoamento e contribuindo para intensa ocorrência dos fenômenos de sedimentação e erosão. Assim, enxerga-se um cenário de degradação ambiental e urbana nos arredores (OLIVEIRA, 2018).

Além dos fatores físicos, a população residente nos bairros que compõem essa bacia em geral possui renda média baixa e o índice de desenvolvimento humano (IDH) é um dos menores do município (GUIMARÃES, 2016). Essa situação de vulnerabilidade socioeconômica contribui ainda mais para agravar os prejuízos e reduzir a capacidade de recuperação da região diante das inundações (GUIMARÃES, 2016).

As estruturas tradicionais de micro e macrodrenagem que existem na região acabam tornando-se ineficazes diante dos problemas mencionados, o que torna a bacia vulnerável e expõe grande parte da população às inundações. As planícies de inundação que, no estado natural da bacia, atuariam como reservatórios temporários das cheias estão ocupadas quase em sua totalidade. Na foz do rio, ocorre ainda um processo de restrição do escoamento por influência de maré e que pode ser agravado por possíveis mudanças climáticas. Além disso, atualmente, o rio já possui uma série de restrições ao escoamento devido à presença de pontes improvisadas ou impróprias,

que acabam represando água nas partes altas da bacia. Diante de todas essas questões, evidencia-se a necessidade de soluções mais efetivas de drenagem, passando por um diagnóstico mais preciso da situação atual da bacia e a proposição de medidas adequadas para avaliação da efetividade da solução de drenagem. No âmbito dessas medidas, ressalta-se também a necessidade de agregar a sustentabilidade e a integração paisagística e funcional das estruturas a serem propostas, uma vez que, para além das questões de drenagem, a população dessa região encontra-se em situação de vulnerabilidade em diversas esferas.

1.2 Antecedentes

A Bacia Hidrográfica do Rio Acari enfrenta uma situação de extrema criticidade devido aos problemas de inundação, o que motivou a realização de diversos estudos e iniciativas voltadas para a região. Dentre essas ações, destaca-se, inicialmente, o Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais (PDMAP), que se apresenta como um esforço fundamental de estudos e anteprojetos com o propósito de realizar um diagnóstico robusto da situação atual da drenagem urbana, assim como a proposição de algumas medidas corretivas e preventivas para a mitigação das inundações, assim como a implantação de um sistema de monitoramento, alerta e mobilização da Defesa Civil (HIDROSTUDIO/FCTH, 2014).

O PDMAP constituiu um insumo crucial para a análise e diagnóstico dos problemas da bacia, e diversos outros estudos surgiram a partir do mesmo. Um destes foi o estudo conduzido por Oliveira (2018), que partindo do PDMAP, incorporou outras propostas ao discutir o sistema de drenagem urbana como eixo estruturante do planejamento. Nesse trabalho, foi realizada a modelagem matemática da Bacia Hidrográfica do Rio Acari para o diagnóstico da situação atual e, posteriormente, foram incluídos os 22 reservatórios preconizados pelo PDMAP para permitir a quantificação de sua eficiência. Foi feita também a integração entre eles por meio de um parque fluvial, formando uma rede de reservatórios de amortecimento. Finalmente, foi realizada a otimização desses reservatórios de forma a reduzir o volume escavado indicado pelo PDMAP quando possível (OLIVEIRA, 2018). Ambos os estudos possuem um papel fundamental na busca por soluções eficazes e sustentáveis para enfrentar os problemas nessa bacia, com o objetivo de salvaguardar as comunidades e o meio ambiente local.

Como uma evolução da proposta de Oliveira (2018), Gomes (2022) buscou explorar o conceito de infraestruturas verdes e azuis (IVA), com o objetivo de promover uma integração mais saudável entre a dinâmica da água e o espaço urbano. Este trabalho também propôs a avaliação da percepção e do posicionamento de diversos atores em

relação às intervenções propostas no projeto, assim como a compreensão de seu nível de entendimento no que tange aos projetos de urbanismo, especialmente no tocante ao uso das IVA (GOMES, 2022).

Nesse contexto, o projeto de Gomes (2022), tendo um viés mais voltado para o urbanismo, demandava uma integração com a engenharia para permitir uma avaliação mais quantitativa, que pudesse indicar eficiência hidráulica das medidas propostas. Diante desta oportunidade, o presente trabalho foi desenvolvido de forma integrada e complementar ao projeto de Gomes (2022), promovendo uma troca de insumos entre eles ao considerar as IVAs propostas como referência para a construção do cenário de projeto e, em contrapartida, fornecendo os resultados hidráulicos que refletem o potencial das estruturas de drenagem propostas por meio da utilização da modelagem matemática desenvolvida no âmbito da engenharia.

1.3 Objetivo Geral

Como objetivo geral, este trabalho se propõe a analisar a eficiência hidráulica de um projeto multifuncional que integra funções sociais ao amortecimento de vazões, para otimizar as estruturas dos reservatórios propostos e maximizar os resultados de amortecimento.

1.4 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Realizar estudos preliminares e revisões bibliográficas que permitam o diagnóstico da situação de cheias da região do Acari, no Rio de Janeiro.
- Propor uma abordagem integrada que utilize tecnologias associadas a Sistemas de Informação Geográfica (GIS) e o Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) desenvolvido na UFRJ (MIGUEZ, 2001).
- Quantificar a efetividade de um cenário de intervenção proposto no estudo de Gomes (2022), servindo também de insumo para o desenvolvimento do trabalho em questão.
- Realizar a otimização das estruturas e intervenções inicialmente consideradas, levando em conta o tempo de recorrência de 25 anos.

2 Revisão Bibliográfica

Na presente seção, serão apresentados as bases conceituais e os alicerces teóricos que atuaram como eixos estruturantes na elaboração deste trabalho a partir da compreensão das interações entre a sociedade humana e o ciclo hidrológico e da necessidade do melhor aproveitamento dos espaços livres no meio físico.

2.1 Relação entre água e cidade

Inicialmente, na região de Jericó/Palestina, no fim do Período Neolítico (antes de 6000 a.C.), se formaram as primeiras sociedades sedentárias em oposição aos caçadores/coletores nômades que eram a hegemonia anteriormente (DELLEUR, 2003).

Conforme ocorreu o gradual abandono do nomadismo, observou-se nessas civilizações uma ocupação intensa das áreas ribeirinhas tanto nas regiões de cultivo quanto nos assentamentos. Alguns dos principais motivos dessas ocupação são explorados por Sayers *et al.* (2009):

- Agricultura e Irrigação:

A presença de água de fácil acesso traz uma série de benefícios à prática agrícola, assim como a disponibilização para o consumo das civilizações se desenvolvendo. Nesse contexto, vieram também as primeiras ações no sentido de tentar compreender e evitar as inundações sazonais.

Tem-se como principais exemplos dessas ocupações ribeirinhas a população egípcia que se assentou no torno do Rio Nilo e a civilização mesopotâmica, desenvolvida nos arredores dos rios Tigre e Eufrates. Em ambas civilizações, além dos primeiros sistemas de abastecimento, já havia alguns esforços no sentido de controlar cheias como diques protetores para os civis e as plantações.

- Vantagem estratégica:

Além das questões internas, a proximidade de rios era fundamental diante do contexto imperialista em que grande parte dessas civilizações antigas se desenvolveu. Além de reduzir a quantidade de direções de possíveis ataques (uma vez que poucos povos tinham o domínio da guerra aquática nesse ponto da histórica) e de facilitar o acesso a abastecimento de água e ao transporte de outros mantimentos em caso de batalhas extensas. Um exemplo forte desse tipo de interesse, exposto na Figura 2, foi a civilização de Londínio, uma cidade romana fundada em torno do rio Tâmis, localizada no atual território de Londres.

Figura 2 - Londínio, cidade romana situada no estuário do rio Tâmis.



Fonte: SAYERS et al., 2009.

Assim, sendo a água de fundamental importância para a vida, torna-se natural o fato de que as primeiras grandes civilizações foram construídas próximas de rios ou, de forma mais geral, corpos hídricos. Seja para o abastecimento humano, higiene, rotas comerciais ou vantagem estratégica mediante uma barreira natural (MIGUEZ et al., 2016), diversas sociedades apoiaram seu desenvolvimento tendo os rios como eixo de crescimento. Entende-se, portanto, que a relação entre a sociedade humana e os cursos d'água, assim como as dinâmicas que regem as interações entre esses componentes, são temas tão antigos quanto a própria história do homem. Assim, essas relações também sofreram alterações conforme a forma do ser humano perceber a natureza ao seu redor e ocupar o seu espaço mudaram ao longo do tempo.

Nesse sentido, o crescimento populacional foi uma tendência construída de forma constante ao longo da história humana (DONG et al., 2016). Excetuando fenômenos pontuais como guerras e pragas, em geral cada vez mais os avanços científicos permitiram que as pessoas tivessem vidas melhores e com mais longevidade, além de atrair acúmulos populacionais para esses mesmos polos de inovação. Esse fenômeno intensificou-se especialmente após a Primeira Revolução Industrial, quando o crescimento das cidades acelerou exponencialmente e trouxe consigo o aumento da população urbana (ALVAREZ-PALAU et al., 2020). No Brasil, esse processo passou a ter força majoritariamente apenas após a década de 50, e aconteceu de forma explosiva

e desordenada assim como na maior parte dos países em desenvolvimento (PAULO, 2010).

Esse ritmo excessivo de crescimento traz consigo diversas perturbações nos meios físico, químico, biológico, sociocultural (associado a problemas sociais, pobreza e outros fatores relacionados aos valores e à vida da população) e urbano (no sentido de caracterizar a formação de uma infraestrutura precária e muitas vezes insuficiente) (OLIVEN, 2010).

Desse processo, surge uma sociedade urbanizada sem urbanidade, com uma altíssima característica de acúmulo populacional, falta de organização e, conseqüentemente, limitação na acessibilidade e disponibilidade de serviços, direitos e até mesmo à própria cidadania dos residentes. Define também problemas socioeconômicos, com intensa estratificação social, usualmente apresentando regiões minuciosamente planejadas, concentradoras de atenção e investimentos públicos e privados, geograficamente próximas a verdadeiros antros de pobreza e fome (GROSTEIN, 2001).

Como fruto desses processos de urbanização explosiva, as mudanças na dinâmica de interação entre a sociedade e os sistemas hidrológico e hidrográfico se manifestam de duas principais formas: a intensificação do processo de extração das águas dos rios para consumo humano (principalmente abastecimento) e o processo de impermeabilização do solo (que dificulta o retorno das águas ao ambiente natural e a direciona para o ambiente artificial) (BUTLER et al., 2004). Esses fenômenos trouxeram consigo a necessidade de que se desenvolvesse uma tecnologia dedicada a tentar resolver os aspectos nocivos dessa relação e, dessa forma, permitir o contínuo avanço da civilização, o que levaria ao desenvolvimento dos estudos de drenagem urbana.

Nesse contexto, a pavimentação (e conseqüente redução da permeabilidade) de regiões previamente cobertas por vegetação afeta significativamente o balanço hídrico local, aumentando a parcela da água que escoia superficialmente pelo sistema e reduzindo a parte que é capaz de se infiltrar no solo e dar continuidade ao ciclo, conforme observado na

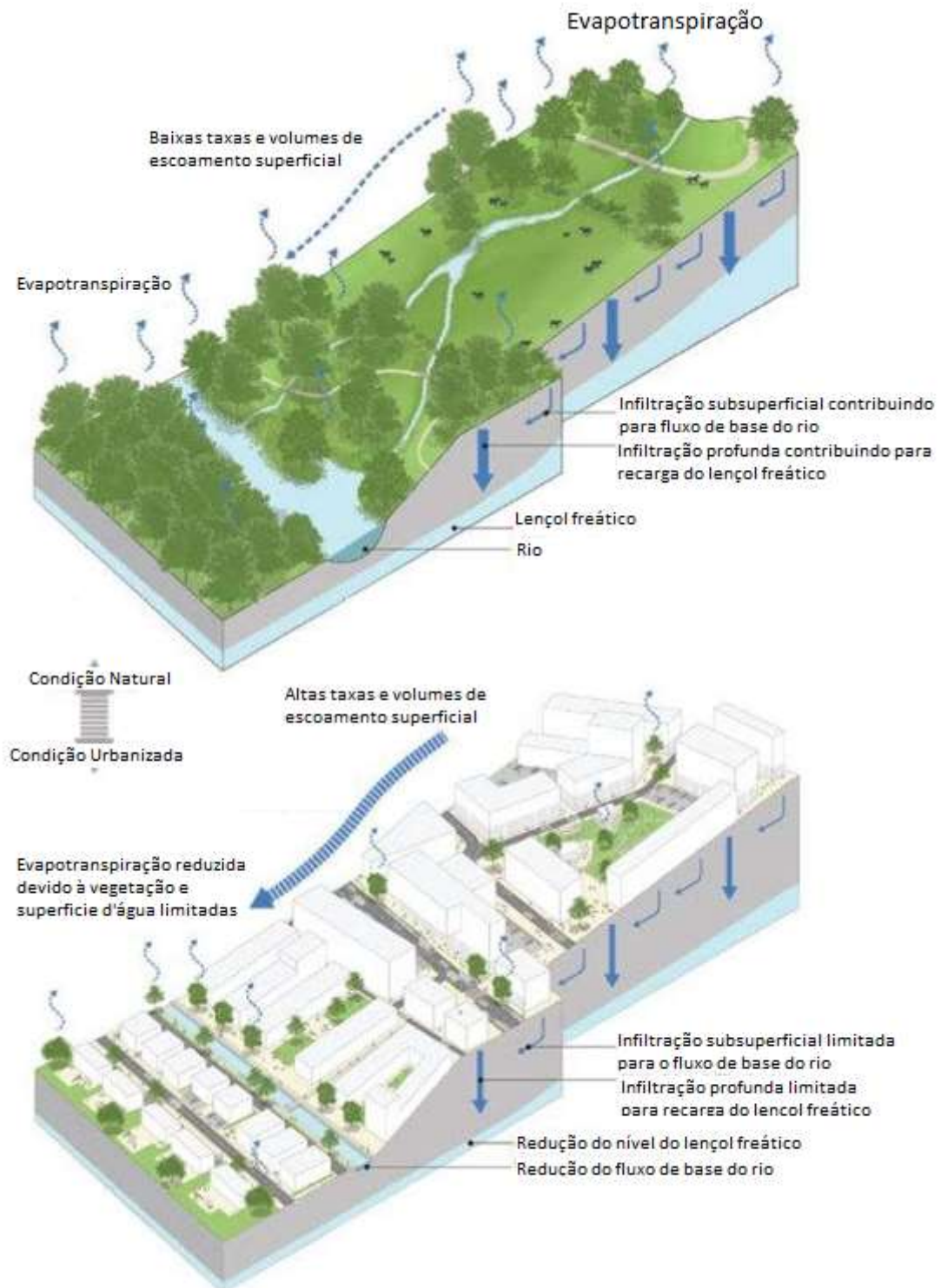
Figura 3.

Outrossim, com a redução da capacidade de retenção do solo e da vegetação, além do aumento nas vazões máximas das cheias, há também um aumento na velocidade dos escoamentos superficiais, o que pode acarretar na intensificação indesejada dos processos de erosão superficial e assoreamento dos rios. Assim, pode-se concluir que os fenômenos anteriormente descritos são responsáveis por concentrar os picos de vazão, fazendo com que ocorram mais cedo e aumentando significativamente sua intensidade, conforme pode ser observado na Figura 4.

Dessa forma, entre os diversos impactos decorrentes da ação antrópica que podem afetar o regime hidrológico de uma região, se destacam como catalisadores das inundações (MIGUEZ et al., 2016):

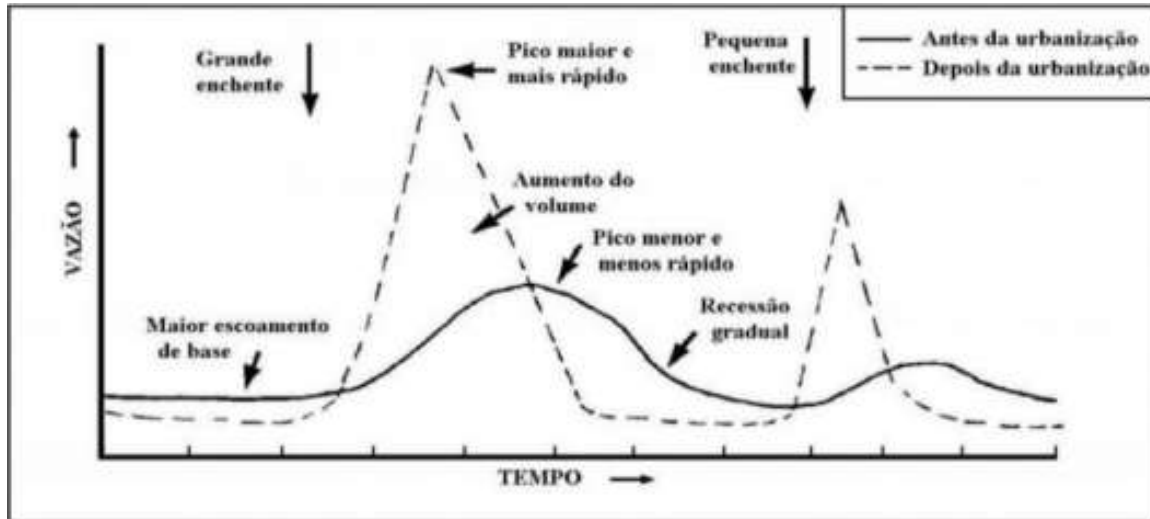
- Redução da vegetação nativa - A modificação do ecossistema vegetal está associada a diversos outros males secundários. Entre alguns deles, pode-se citar o assoreamento do fundo e estrangulamento das calhas dos rios, redução nas capacidades de amortecimento de inundações e no fluxo canalizado, intensificação da característica superficial do escoamento na bacia e problemas no ciclo de evapotranspiração
- Impermeabilização do solo - Diminui a capacidade de infiltração e, conseqüentemente, intensifica o escoamento superficial.
- Ocupação de áreas de risco – As habitações localizadas nas margens e no leito secundário dos rios aumenta a exposição da população a cheias.
- Deposição de resíduos nas calhas – O acúmulo de corpos sólidos reduz a capacidade de transporte do rio.
- Favelização - Produto de alguns impactos anteriores, o fenômeno da favelização é caracterizado pela formação de comunidades em situação crítica de exposição. A redução da vegetação e o estrangulamento do fluxo do canal, assim como a deposição de carga orgânica no sistema hídrico, aumentam o risco de inundações e outros tipos de desastres nessas regiões.
- Deposição de resíduos sólidos - Com o descarte irregular associado à população nos arredores do rio, pontos de singularidade tornam-se áreas especialmente sensíveis na medida em que têm sua capacidade de vazão reduzida e o seu nível d'água aumentado.

Figura 3 - Impactos da urbanização no ciclo hidrológico.



Fonte: BALLARD, 2015.

Figura 4 - Impactos da urbanização no hidrograma da bacia.



Fonte: LEOPOLD, 1968 apud MIGUEZ et al., 2016.

As oscilações nas cotas dos rios, sejam de natureza diária ou sazonal, são fenômenos cíclicos e de ordem ambiental, com importante papel no meio ambiente na medida em que alteram o regime de carreamento de partículas no corpo hídrico, podendo contribuir positivamente em aspectos como a regulação da quantidade de matéria orgânica na água ou a mitigação do acúmulo de sólidos no fundo (GARDNER, 2017). Essas alterações antrópicas, no entanto, muitas vezes causam modificações nas características fundamentais dos corpos hídricos e, por conseguinte, provocam a intensificação indevida das cheias que culmina em inundações, gerando prejuízos de ordem econômica, ambiental, humana e social (CARNEIRO et al., 2011).

A dificuldade de acesso à informação a respeito dessa situação contribui, também, para o agravamento desse quadro. Nesse sentido, é comum que os dados a respeito dos riscos às quais as populações estão expostas sejam rasos ou insuficientes para uma análise mais elaborada e faltem informações como, por exemplo, o número de habitantes em situação de risco ou a gravidade do mesmo (CHAKARIAN, 2008)

Assim, as cidades apresentam problemas nas mais variadas escalas, desde falhas na competência da microdrenagem que ocasionam problemas desde a obstrução de vias, alagamento de ruas e dificuldade de circulação, até inundações que atingem parte considerável da cidade em função da falha da macrodrenagem. A situação é ainda mais crítica quando ambos os sistemas de micro e macrodrenagem falham simultaneamente.

Diante desses impactos e com a redução do potencial de escoamento do rio, muitas vezes se tornam necessárias intervenções físicas para evitar ou mitigar esses efeitos negativos na bacia hidrográfica, resguardando o meio ambiente e os habitantes locais das possíveis consequências dos problemas de drenagem mencionados.

2.2 Controle de inundações urbanas

Assim como as mencionadas na seção 2.1, muitas outras civilizações historicamente antigas desenvolveram também seus próprios sistemas de drenagem urbana com suas próprias particularidades, conhecimentos e tecnologias. Por exemplo, os Persas, os Indus e os Gregos já projetavam e executavam com sucesso estruturas que visavam à coleta da água precipitada e o transporte da mesma, assim como de outros resíduos, para longe da região ocupada (BURIAN et al., 2002). Esse objetivo sedimentou o caminho para que fossem consolidados os pilares principais da drenagem urbana tradicional: a captação e a condução imediata das águas pluviais para a jusante.

Essa abordagem, chamada de Higienista, consolidou-se também no Brasil entre 1850 e 1990, no que ficou conhecido como Fase 1. No entanto, na medida em que a urbanização avançou, as consequências dessa lógica de drenagem começaram a ser observadas: a elevação do pico de cheias nos cursos de água e a diminuição do tempo de concentração, o que caracteriza uma solução parcial que resulta em diversos problemas intersetoriais, que por sua vez culminam em uma série de prejuízos e exposições para a sociedade e a população residente (CHRISTOFIDIS et al., 2019).

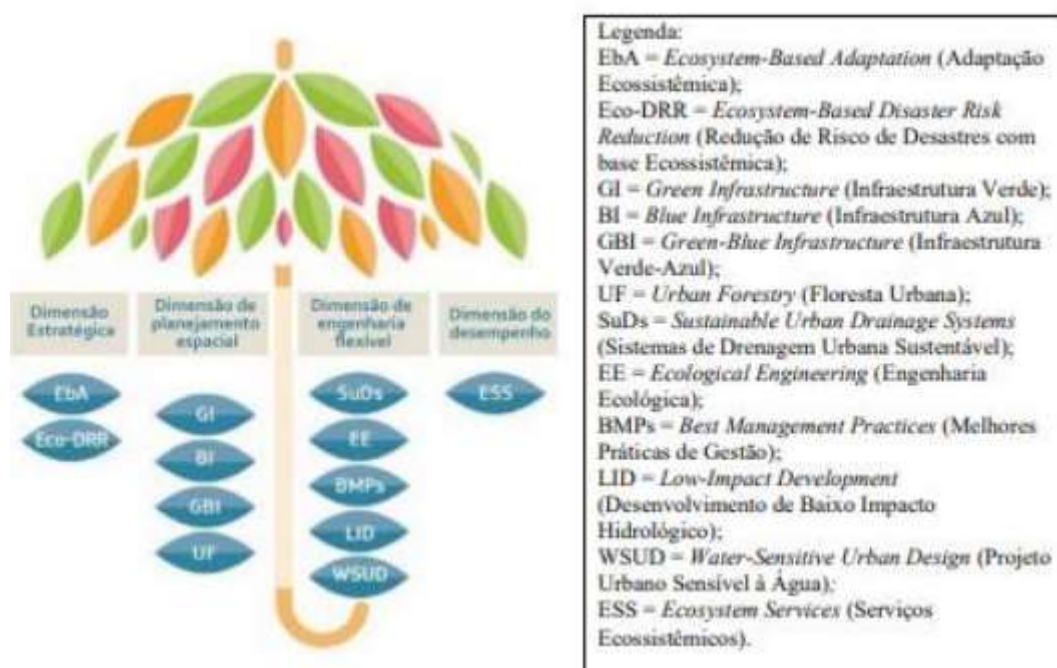
Após 1990, deu-se início a uma transição evolutiva com o surgimento de um novo paradigma, denominado de ambientalista (ou Fase 2). Diante desse novo contexto, foram resgatados alguns princípios que já estavam sendo colocados em prática em muitas outras regiões no tratamento das águas pluviais urbanas, onde o objetivo passava a ser resgatar características da dinâmica natural das águas, como a tentativa de intensificar os fenômenos de infiltração e percolação nas superfícies com intenção de controle, manejo qualitativo e quantitativo, reduzir o escoamento superficial, regularizar a oferta hídrica, e promover medidas que almejam à reservação das águas, como alternativa para redução dos picos de cheia e da velocidade de escoamento (CHRISTOFIDIS et al., 2019).

Em paralelo ao desenvolvimento do paradigma ambientalista no Brasil, em alguns outros países já surgiam, a partir de 1970, algumas propostas de medidas relacionadas à drenagem urbana que viriam a representar uma evolução ainda maior nesse contexto. Suas características inovadoras e atrativos residiam no fato de que, além de ultrapassar

a abordagem tradicional focada apenas em coletar a água das chuvas e a transportar o mais rápido possível para longe do foco habitacional, esse novo paradigma buscava aliar essa percepção ambiental à atenção à geomorfologia e aos componentes estruturais e não estruturais da região, como zoneamentos, ocupação de áreas mais ou menos vulneráveis, seguros e outras medidas de cunho social. Ao aliar essas medidas estruturais e não estruturais, eram ampliadas as possibilidades de combate às inundações e a outros problemas causados pelo manejo inadequado de águas pluviais, e consolidou-se cada vez mais a abordagem que viria a ser conhecida como Drenagem Urbana Sustentável (CHRISTOFIDIS et al., 2019). No contexto dessa nova cosmovisão, os elementos que compõem o sistema de drenagem possuem o objetivo de restaurar as relações hidrodinâmicas da bacia de modo a se retornar às características e condições originais do ciclo hidrológico local, antes da influência dos processos de urbanização (OLIVEIRA, 2018). As intervenções passam, então, a buscar resgatar os fenômenos de infiltração e retenção das águas pluviais, complementando as abordagens convencionais.

Existe uma grande diversidade de definições e terminologias associadas ao paradigma da drenagem urbana sustentável, conforme explorado por Fletcher *et al.* (2015) em um robusto estudo bibliográfico em torno dessas abordagens integradas como *Low Impact Development* (LID), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), *Integrated Urban Water Management* (IUWM), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), *Best Management Practices* (BMP), *Green Infrastructure* (GI), entre outros, traduzidos na Figura 5.

Figura 5 - Soluções baseadas na natureza como um conceito guarda-chuva



Fonte: Comissão Europeia (2021) apud GOMES, 2022, com tradução feita por Merlo (2022).

É importante salientar que, apesar da existência de uma variedade de terminologias diferentes, existe uma sobreposição natural entre elas, uma vez que a diferenciação é sutil e se baseia nas circunstâncias das sociedades e países de origem, assim como de seu contexto de desenvolvimento. As nomenclaturas possuem, portanto, fatores-chave comuns que as identificam como elementos de discussão da chamada drenagem urbana sustentável: o foco na atenuação de inundações e cheias, a busca por um regime de escoamento de acordo com os padrões de sustentabilidade contemporâneos, uma melhora na qualidade da água e a mitigação na quantidades de poluentes presentes na bacia hidrográfica (FLETCHER et al., 2015).

Assim, como reação a essa problemática da drenagem, existe a urgência de defender um modelo de gestão onde haja antecipação do planejamento do espaço urbano, de forma que a ocupação possa se dar de forma saudável e harmônica tanto para o homem quanto para o meio que o cerca, assim como iniciativas que promovam a reestruturação de espaços já ocupados em vista da mitigação das inundações. Dessa forma, será possível prover plenamente as necessidades dos cidadãos assim como preservar a estabilidade e a harmonia com o meio ambiente.

2.3 Sistemas de espaços livres

Em sua pesquisa, Gomes (2022) discute a respeito dos sistemas de espaços livres urbanos, que representam um fundamental alicerce de sua base teórica. Eles são definidos como os espaços livres de quaisquer edificações, incluindo mas não limitado a quintais, jardins (públicos ou privados), ruas, rios, parques, praias urbanas e mangues (MAGNOLI, 1982). Esses espaços formam uma malha pervasiva indispensável para a formação das cidades e centros urbanos e, quase sempre, constituem a maior porcentagem do solo das cidades brasileiras. Não apenas com relação à ocupação do espaço físico, todo o desenvolvimento do ecossistema urbano se dá a partir desses espaços e de relações de conectividade, hierarquia e complementaridade entre os mesmos e outros elementos da paisagem urbana. Entre os múltiplos papéis dessas áreas, pode-se enumerar a circulação; a drenagem; convívio humano; recreação; aspectos afetivos como memórias; conforto; ecologia ou mesmo atividades do ócio. As características particulares desses sistemas variam de acordo com a região onde estão localizados – atreladas a aspectos como o grau de planejamento e projeto prévio com o qual se deu a urbanização do local ou o grau de atenção fornecido pela gestão pública ao longo do processo de ocupação (CORREA, 2004).

Em geral, associa-se cidades mais compactas a ocupações mais resilientes e sustentáveis, já que assim se aumenta a efetividade do uso do solo. No entanto, no que tange aos espaços livres, é importante se atentar a essa compatibilidade das cidades, pois pode reduzir excessivamente os espaços livres que constituem um alicerce indispensável no atendimento das demandas ambientais, sociais e de infraestrutura de uma sociedade urbana (DE ROO, 1998).

Os espaços livres são um elemento com potencial elevado de impacto na transformação do processo de construção da paisagem, uma vez que constituem o elemento mais flexível da ocupação humana, tanto considerando aspectos funcionais quanto espaciais. São também dotados de uma fragilidade proporcional ao seu potencial, quando negligenciados ou mal utilizados. Essa dualidade se reflete na sua criticidade no que tange à possibilidade de reestruturação do território por meio de sua disponibilidade (TARDIN, 2008).

Esses espaços, quando projetados e executados com o devido zelo, podem representar um elemento chave de uma composição sistêmica ao explorar o potencial do seu caráter multifuncional, sendo capaz de beneficiar a população em termos sociais, culturais, ambientais e de infraestrutura. Essa ideia dos espaços livres multifuncionais como elemento de suporte ao desenvolvimento urbano sustentável é amplamente aceita e utilizada tanto na teoria quanto na prática do planejamento e do projeto urbano, e

baseia-se na ideia de que esses espaços multifuncionais trazem um espectro amplo de benefícios para as regiões urbanas, afetando as esferas ambientais, sociais e econômicas (ZIVKOVIC et al., 2019).

Os espaços livres apresentam também grandes potencialidades quando aliados à Drenagem Urbana Sustentável, uma vez que suas áreas amplas e de caráter multifuncional constituem grandes oportunidades de implantação de medidas estruturais e não estruturais que podem aliar a recuperação da dinâmica hidrológica local com os múltiplos benefícios que esses espaços trazem.

2.4 Infraestruturas Verdes e Azuis (IVA)

A partir dessa nova mentalidade dentro do universo da drenagem urbana e da definição de conceitos como o de espaços livres, começaram a surgir diversos outros conceitos e terminologias mais específicos que também foram abordados por Gomes (2022). Um dos que viria a se destacar e se tornar um alicerce importante para a ciência moderna das águas pluviais é o termo “Infraestrutura Verde”. Esse termo surgiu inicialmente em 1994, em um documento direcionado ao governador da Flórida (EUA) sobre estratégias de preservação ambientais, colocando os sistemas naturais como componentes fundamentais da infraestrutura urbana (FIREHOCK, 2010). Segundo Benedict e McMahon (2002), o contexto era de esforços voltados para a execução de corredores ecológicos nos Estados Unidos. A ideia defendida pelos autores é a de que essas infraestruturas verdes são dotadas da capacidade de interligar paisagens e ecossistemas através de elementos definidos como *sites*, *links* e *hubs*. Os *sites* são definidos como elementos ambientais de menor escala e, em geral, isolados dos outros sistemas, mas que são caracterizados pela possibilidade de incrementar o valor social e ecológico da região através de oportunidades como fornecer espaço para recreação ou abrigar vida selvagem. Já os *links*, costumeiramente associados a planícies de inundação, rios, corredores verdes e cinturões verdes, são áreas intermediárias que conectam esse sistema; ligações entre paisagens e ecossistemas. Essas estruturas também possuem a potencialidade do uso recreacional, concomitante à proteção da biodiversidade e do sítio ecológico local. Por fim, os *hubs* seriam áreas de proteção ambiental e outros tipos de reservas amplas (parques comunitários ou regionais, florestas e outras estruturas que possam abrigar plantas nativas e se tornar o nicho ecológico de vida selvagem).

Alguns anos depois na França, viria a surgir o termo “trama verde e azul”, relacionada à *Loi Grenelle de l'Environnement*, a *Grenelle 1* (FRANCE, 2009). Nela, há um reconhecimento dos prejuízos ocorridos na biodiversidade local e são estipulados uma série de urgências práticas no sentido de frear o consumo dos recursos naturais, assim como de preservar o estado dos ecossistemas (FARAH, 2012; VIMAL et al., 2012). Nesse processo, é definido que a abordagem para garantir a plenitude do que foi proposto seria a chamada *trame verte et bleue*, que viria a ser melhor detalhada na *Lei Engagement national pour l'environnement*, a *Grenelle II*, de 2010 (FARAH, 2012; VIMAL et al., 2012). Nesse sentido, a metodologia da trama verde azul foi adotada como orientação no planejamento do território, e visava à continuidade entre esses ambientes naturais e paisagens no âmbito ecológico (IAU, 2011).

De forma semelhante ao processo que ocorreu no surgimento do termo infraestrutura verde, foram definidos alguns componentes como eixos estruturantes dessa concepção: cursos d'água, corredores ecológicos e reservatórios de biodiversidade. Os cursos d'água, dentro dessa cosmovisão, compreendem todo e qualquer corpo hídrico dotado de capacidade de resguardar os ambientes em seu estado natural e assim restaurar a continuidade ecológica. Os corredores ecológicos, por sua vez, atuam como estrutura de conexão, a serem percorridos pela fauna e flora ao se deslocarem entre as unidades definidas. Finalmente, os reservatórios de biodiversidade são regiões onde existem todas as condições apropriadas para residência das espécies (AMSALLEM et al., 2010).

Assim, é notória a evolução das estratégias insurgentes sendo difundidas em diversos países ao longo dos últimos anos e uma crescente valorização da biodiversidade e dessas tecnologias que a tem como ponto focal. Todo esse histórico culminou na atual concepção de “infraestruturas verdes e azuis”. Esses avanços têm como característica comum a utilização de estruturas naturais ou seminaturais no âmbito da drenagem urbana. Em oposição à drenagem urbana tradicional, as IVA têm se destacado no nicho da drenagem urbana sustentável devido aos múltiplos benefícios que trazem em diversas esferas, proporcionando também avanços sociais como a criação de áreas de lazer. Além disso, elas também são mais flexíveis e adaptáveis a mudanças climáticas, uma questão de extrema importância no mundo contemporâneo (NCUBE et al., 2021). Apesar de seus claros benefícios e da crescente popularidade, a utilização das IVA ainda representa apenas uma tímida fração quando comparada com a abordagem convencional (DEELY et al., 2020; DROSOU et al., 2019), em especial em países em desenvolvimento onde os recursos são mais escassos e existem mais limitações em diversas camadas, como o Brasil. Nesse sentido, no panorama brasileiro, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) desenvolveu em 2020, com o objetivo de fornecer um

suporte à tomada de decisão dos gestores públicos em relação à escolhas dos tipos com maior potencialidade a serem implementadas, um manual de apoio à implementação de infraestruturas verdes de acordo com as características particulares da região, levando em conta as diferentes escalas paisagísticas e locais (SOLERA, 2020). Nas subseções a seguir serão explorados de forma mais detalhada alguns tipos específicos de IVA que serão resgatados posteriormente no presente trabalho.

2.4.1 Wetlands

Conhecidas também como “alagados construídos”, essas estruturas têm seu nome originado no termo *wetland*, que é utilizado para se referir a ambientes caracterizados pela umidade ou até mesmo inundações sazonais, como pântanos, brejos e manguezais (SANTOS, 2001). Assim, essa alcunha de uma classe de ecossistemas naturais foi adotada e se popularizou a partir da década de 1970 também para essas estruturas artificiais de alagados construídos, caracterizados por sua capacidade de simultaneamente trazer melhorias para o sistema de drenagem e promover a habitação de seres vivos e o crescimento da biodiversidade, além de melhorar a qualidade da água (KADLEC et al., 1996; SANTOS, 2001).

Dessa forma, define-se esses tipos então como regiões pantanosas ou de águas rasas que tem como propósito armazenar águas pluviais por longos períodos, assim como utilizar vegetação aquática natural para promover o tratamento dessas águas. As profundidades, níveis de submersão característicos da vegetação e zonas de transição são características de projeto, pertinentes a cada caso particular e que influenciam no ciclo de nutrientes do ecossistema (BONZI, 2015). Ao aumentar a taxa de umidade no ar, também otimizam as condições para habitação de animais, e possuem também características estéticas que permitem sua integração total ao projeto paisagístico da região de interesse (BONZI, 2015). A Figura 6 apresenta um exemplo de wetland implantado em Nanterre, França.

Figura 6 - Exemplo de wetland.



Fonte: Disponível em <<https://ecotelhado.com/blog/a-utilizacao-de-wetlands-no-paisagismo-e-desenho-urbano-parque-na-franca-contribui-para-a-despoluicao-do-rio-sena/>>

Souza (2020) elaborou um quadro onde são mencionadas as principais vantagens e fatores limitantes na utilização dessas estruturas. De forma geral, pode-se citar como vantagens a resiliência em relação a variações na lâmina d'água; a contribuição da estrutura para a remoção de poluentes; o alto nível de flexibilidade de projeto; os custos reduzidos de manutenção e operação; a falta de necessidade de energia elétrica para seu funcionamento; boa capacidade de retrofit com lagoas de sedimentação e as potencialidades associadas a reutilização da água.

As limitações, por outro lado, consistem principalmente na necessidade de manutenção periódica; em não possuir uso recreativo, portanto, reduzindo as áreas disponíveis para isso onde são implantadas; e a necessidade de cautela com possíveis espécies invasoras que podem acabar prejudicando o ecossistema local. Além disso, as características biológicas desse tipo de intervenção podem também trazer alguns inconvenientes para a convivência com a população, como a proliferação de insetos e mosquitos e o odor desagradável (DE CARVALHO et al., 2013).

2.4.2 Bacias de Retenção

Também chamadas de “lagoas pluviais”, as bacias de retenção (Figura 7) são estruturas caracterizadas por possuírem lâmina d'água perene e um correspondente volume de espera. Elas tem como principais objetivos amortecer os picos de vazão do sistema de forma integrada com um suave tratamento dessas águas de chuva ao associar os fenômenos de sedimentação de poluentes e absorção biológica (CANHOLI, 2015; MIGUEZ et al., 2018; UACD, 2010). Seu uso se dá por meio do armazenamento de

volumes correspondentes a fluxos de escoamento superficial de sistemas de drenagem (sejam estruturas de drenagem tradicionais ou naturais), e sua capacidade máxima de reservação é definida pela diferença entre a lâmina dimensionada para extravasamento e a lâmina permanente estipulada em projeto (CORMIER et al., 2008). Assim, quando ocorre um evento de chuva de duração ou intensidade suficientes, o nível d'água é temporariamente elevado acima da lâmina permanente, retendo esse volume e permitindo a entrada gradual do mesmo no resto do sistema (CANHOLI, 2015). A existência de uma lâmina de água permanente nesses tipos de IVA está fortemente associada ao seu potencial paisagístico e recreacional, permitindo uma integração harmoniosa e multifuncional na paisagem urbana.

Figura 7 - Exemplo de bacia de retenção



Fonte: Disponível em <<https://www.cm-guimaraes.pt/participar/guimaraes-mais-verde/noticia/camara-de-guimaraes-inaugura-bacias-de-retencao-no-parque-das-hortas-e-apresenta-2-fase-de-obras>>

O tempo de retenção nessas estruturas torna possível a ocorrência da deposição de poluentes, e portanto as bacias de retenção podem contribuir para os processos de tratamento de água (BALLARD, 2015). É importante destacar que, diferentemente das *wetlands*, as lagoas pluviais em geral não são apropriadas para receber efluentes de esgoto (SOLERA, 2020). As principais vantagens dessa estrutura são a possibilidade de retenção de grandes volumes de água; a melhoria de qualidade da água; o crescimento e a preservação da biodiversidade no ambiente urbano; o estímulo a infiltração e a recarga de aquíferos; a valorização dos espaços urbanos, gerando valor e outras potencialidades socioeconômicas na região além da sua contribuição para a saúde da bacia hidrográfica (HERZOG, 2010; SOLERA, 2020).

Por outro lado, dentre as suas principais limitações, destacam-se o pré-requisito de áreas amplas para sua instalação (sendo assim usualmente mais indicadas para regiões

mais baixas, de jusante da bacia (UACD, 2010)). Além disso, as bacias de retenção trazem consigo algumas necessidades de manutenção consideravelmente delicadas, incluindo, mas não limitadas a, procedimentos de drenagem para manter os níveis de projeto da lâmina d'água permanente; a remoção de lixo e sedimentos; e a verificação da efetividade dos processos de tratamento biológico do efluente (UACD, 2010). Finalmente, as lagoas pluviais também não devem ser instaladas em áreas de níveis de precipitação considerados insuficientes ou com solos altamente permeáveis, exceto em casos de solo compactado ou coberto de argila (UACD, 2010).

2.4.3 Bacias de Detenção

Também chamadas de “piscinões”, as bacias de retenção (Figura 8) são tipos de IVA caracterizados por regiões de depressão que são projetadas com o objetivo de receber e reservar de forma efêmera quantidades de águas pluviais até que as mesmas possam seguir para sua destinação, sejam corpos hídricos receptores, galerias ou outras estruturas (UACD, 2010).

Uma importante característica dessas estruturas é que elas são secas em momentos de estiagem, armazenando água apenas durante e após os eventos de chuva (CANHOLI, 2015). Essa constitui a sua principal diferenciação em relação às bacias de retenção, e confere também a sua característica e principal vantagem que é a multifuncionalidade, já que podem ser utilizadas em praças, quadras ou pistas de skate que representam oportunidades de lazer e socialização para a população, além de constituírem importantes elementos de composição da paisagem urbana. Com essa reserva temporária, as bacias de retenção contribuem para reduzir a velocidade do escoamento superficial e os picos de vazão a jusante do sistema, mitigando as alterações antrópicas no ciclo hidrológico local e restaurando parcialmente a dinâmica pré-urbanização (RODRÍGUEZ et al., 2021; SOUZA et al., 2013).

Figura 8 - Exemplo de bacia de detenção



Fonte: Disponível em <https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/09/AF_Reservatorios%20Deten_web.pdf>. Acesso em 23 mar. 2023

Outras vantagens das bacias de detenção incluem a contribuição para a redução da erosão nas margens dos rios; a maior facilidade de limpeza dos mesmos; e a redução de possíveis prejuízos financeiros com obras de canalização a jusante devido à sua grande capacidade de armazenamento (ABCP, 2013; RODRÍGUEZ et al., 2021).

As bacias de detenção, no entanto, possuem algumas complexidades intrínsecas à sua aplicação. É recomendado, em primeiro lugar, que sejam aplicadas em regiões urbanas com já elevado nível de impermeabilização, e que já sejam pontos de acúmulo de água. Terrenos ociosos e/ou degradados associados a potencialidades de valorização da região e ao aumento da qualidade de vida também são fortes candidatos (ABCP, 2013). Além disso, a manutenção apropriada é fundamental para que sejam aproveitados e mantidos os benefícios trazidos por essa topologia. Sua abordagem varia de acordo com o tipo de estrutura e o contexto de utilização, mas, em geral, inclui inspeções periódicas, limpeza, replantio (quando vegetada), reparos e, principalmente, retirada de sedimentos que podem se acumular (SOUZA et al., 2013). Quando desempenham função recreativa, deve ainda ser assegurado o tratamento de possíveis focos erosivos e poças restantes após o escoamento total (SOUZA et al., 2013).

2.4.4 Jardins de Chuva/Canteiros Pluviais

Os jardins de chuva (Figura 9), assim como os canteiros pluviais, são tipos de IVA caracterizados por áreas de depressão topográfica em conjunção com uma superfície vegetada, sob o pressuposto de reduzir a ocorrência do escoamento superficial ao promover a infiltração das águas pluviais ali precipitadas ou conduzidas. Assim, a água

que chega na estrutura fica reservada no interior dessas depressões, na medida em que forma pequenos corpos d'água que eventualmente irão se infiltrar no solo (FCTH, [s.d.]).

Quanto à diferenciação entre os jardins de chuva e os canteiros pluviais, em geral considera-se que o principal fator de distinção é a estrutura física – os canteiros pluviais normalmente são confinados, permitindo que sejam utilizados em espaços urbanos de menor escala (HERZOG, 2010). Além disso, é comum que as características de esvaziamento dos canteiros pluviais também possuam certo grau de variabilidade: Podem ou não contar com um extravasador e/ou a infiltração no fundo da estrutura, mas podem também contar apenas com os fenômenos de evapotranspiração e (CORMIER et al., 2008).

As principais vantagens dessa são: a redução do escoamento superficial; a consequente mitigação da frequência e/ou da intensidade de inundações; a agregação de valor paisagístico com elementos vegetais atrativos para o espaço urbano; a contribuição para a remoção de poluentes e desintoxicação do ambiente urbano; o subsequente impacto positivo na qualidade da água; a representação de uma alternativa às estruturas tradicionais de drenagem, muitas vezes caras ou acompanhadas de impactos negativos; a criação de potenciais áreas de habitação de vida selvagem e consequente aumento da biodiversidade e a mitigação de efeitos nocivos decorrentes da urbanização como ilhas de calor e impermeabilização (FCTH, [s.d.]; SOLERA, 2020; SUSDRAIN, 2021).

Figura 9 - Exemplo de Jardim de Chuva



Fonte: Disponível em <<http://luciapinheiro.arq.br/variedade/paisagismo/jardim-de-chuva-o-investimento-em-biodiversidade>>. Acesso em 23 mar. 2023.

Esses dispositivos, no entanto, apresentam também alguns fatores de restrição como a inviabilidade de serem aplicados em regiões de grande contribuição pluvial devido a sua limitada capacidade de reservação; o risco de contaminação de aquíferos; e a dependência de condições geotécnicas e associadas ao lençol freático local, sob risco de poluição do mesmo (FCTH, [s.d.]; MIGUEZ et al., 2018). Assim, os sítios ideais para sua implementação são pátios, residências, estacionamentos e ruas largas com tráfego pouco intenso.

2.4.5 Pavimentos Permeáveis

Também conhecidos como pavimentos porosos, os pavimentos permeáveis (Figura 10) são caracterizados por permitirem a infiltração das águas precipitadas ou conduzidas aos mesmos no solo, promovendo a recarga de aquíferos subterrâneos, removendo poluentes e reduzindo a parcela do volume de água que escoam superficialmente na área (MIGUEZ et al., 2018). Esse tipo de estrutura usualmente possui também uma camada de brita responsável pelo armazenamento de um volume de água, contribuindo também para o funcionamento desse tipo de IVA. Um ponto notável para sua aplicação reside no fato de que, em áreas urbanas, usualmente caracterizadas por maiores densidades de ocupação, as superfícies com funcionalidade associada a passagem de veículos como vias ou estacionamentos – em geral, superfícies impermeáveis - ocupam pelo menos 30% da área de contribuição da bacia (BAPTISTA et al., 2011). Assim, existe um grande potencial de utilização desse tipo de tecnologia, pois sua aplicação em áreas maiores pode trazer consigo ganhos significativos na atenuação das inundações. A implantação dos pavimentos permeáveis é recomendada em áreas de ocupação industrial, pátios, galpões, ruas com tráfego pouco intenso, praças, calçadas, estacionamentos, conjuntos habitacionais e condomínios (MOTA et al., 2013).

Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2011), uma das vantagens da aplicação de pavimentos porosos tem relação com o seu custo de implantação, que é basicamente equivalente ao dos pavimentos tradicionais – mas trazendo economia na implementação do sistema de drenagem tradicional. Além disso, essas estruturas não requerem espaços adicionais para sua execução, e trazem consigo um benefício integrado ao realizar a filtração de poluentes e a suspensão de sólidos, contribuindo para a melhoria da qualidade das águas. Apesar disso, algumas limitações devem também ser consideradas ao se cogitar a aplicação dos pavimentos permeáveis – a depender da situação de projeto, eles podem estimular a poluição dos lençóis freáticos e a colmatação da estrutura, o que pode comprometer sua capacidade hidráulica (MOTA et al., 2013).

Figura 10 - Exemplo de pavimentos permeáveis



Fonte: Disponível em <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/pavimentos-permeaveis-evitam-acumulo-de-agua-no-piso/10955>>

2.4.6 Telhados Verdes

Finalmente, os telhados verdes, apresentados na Figura 11, consistem em áreas de cobertura compostas por substratos absorventes, muitas vezes sendo vegetação natural. Esses estratos ajudam a reter e, conseqüentemente, atrasar o escoamento das águas precipitadas (CORMIER et al., 2008). A característica positiva marcante dos telhados verdes é a quantidade de benefícios arquitetônicos e ergonômicos que eles trazem consigo além dos hidráulicos, como o conforto térmico trazido pela atenuação da temperatura interna da edificação; mitigação da formação de ilhas de calor; redução da emissão de gases associados ao efeito estufa; promoção do desenvolvimento da biodiversidade; contribuições no aumento da qualidade do ar e o valor estético que eles podem trazer ao ambiente urbano (OKUMURA, 2022).

Figura 11 - Exemplo de telhado verde



Fonte: Disponível em <<https://ledmoveis.com.br/arquitetura-como-criar-um-telhado-verde/>>

Como desvantagens, no entanto, essas estruturas apresentam certas limitações no que tange à sua implementação em lajes técnicas e ao atendimento de critérios de segurança estrutural (MIGUEZ et al., 2018). Okumura (2022) elaborou um quadro onde enumerou os principais requisitos e recomendações em relação à aplicação dos telhados verdes, dando especial atenção à questão da diminuição da fração precipitada correspondente ao escoamento superficial e à viabilidade do processo de execução em si. A conclusão de sua pesquisa foi a de que idealmente se deve aplicar essa tecnologia em áreas regulares (como lajes), e foi descartada a possibilidade de utilização em inclinações maiores do que 15%. A autora conclui também que a utilização dos telhados verdes se mostra mais efetiva na diminuição do escoamento a jusante quando instaladas a montante da bacia.

O recomendado é, então, a implantação dessas estruturas como medida de controle da fonte, localizadas no início das redes, podendo ser utilizadas tanto no contexto de habitações unifamiliares quanto em edifícios industriais, conjuntos habitacionais ou habitações multifamiliares (UACD, 2010). Os telhados verdes, além disso, são estruturas que exigem certos cuidados com manutenção, por meio da inspeção periódica da área vegetada e da situação de escoamento para evitar o fenômeno da colmatação (UACD, 2010).

3 Metodologia

A metodologia adotada na elaboração do presente trabalho tem como objetivo otimizar o fluxo de trabalho de forma a usufruir de forma plena das possibilidades oferecidas pelas ferramentas tecnológicas disponíveis.

De forma resumida, o estudo foi desenvolvido da seguinte forma:

- Levantamento e análise de dados pertinentes à região (condições de topografia, hidrologia, pluviometria, urbanização);
- Atualização do modelo desenvolvido por Oliveira (OLIVEIRA, 2018) para a Bacia do Rio Acari, de forma a simular o cenário proposto por Gomes (2022), com o objetivo de quantificar a efetividade do projeto urbano proposto;
- Otimização do dimensionamento hidráulico das estruturas previstas no projeto, partindo por meio de uma variação iterativa dos principais parâmetros de projeto: o número, o diâmetro e a disposição dos orifícios de descarga, assim como a profundidade dos reservatórios.
- Análise dos impactos da otimização em relação à proposta inicial, considerando as métricas de lâmina d'água média ponderada e número de domicílios afetados na bacia.

3.1 Modelo de Células de Escoamento (MODCEL)

O Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) é um modelo hidrodinâmico Quasi-2D, desenvolvido por Miguez (2001) que considera que uma região do espaço pode ser representada por um conjunto de áreas homogêneas e o comportamento hidrodinâmico dessa região pode ser representado por relações hidráulicas associadas à troca de vazões entre elas.

As entidades componentes principais do MODCEL são as células e as ligações. Nesse modelo, as células são compartimentos bidimensionais considerados homogêneos, que tem como objetivo representar o espaço modelado, levando em consideração características de elevação e ocupação do solo (MIGUEZ et al., 2017). Nesse sentido, Miguez *et al.* (2017) citam alguns parâmetros importantes para a caracterização do comportamento da superfície da região delimitada:

- A área total planejada, fator determinante para o cálculo do volume de chuva sobre a célula;
- A área de armazenamento, associado ao cálculo do equilíbrio de massa;

- As características de uso e ocupação do solo, associadas ao coeficiente de escoamento superficial.

As células possuem ainda mais alguns parâmetros que permitem o refinamento da sua caracterização, como o coeficiente de urbanização e as cotas de fundo e nível d'água inicial.

Além disso, as células possuem tipos, associados a papéis específicos dentro do contexto dos sistemas de drenagem:

- Células de canal (Tipo 0) – Define as células onde é desenvolvido o escoamento principal do sistema de drenagem (a céu aberto).
- Células de galeria (Tipo 1) – Representam condutos fechados que formam a rede de drenagem subterrânea.
- Células de planície (Tipo 2) – Representam os escoamentos com superfície livre em planícies urbanas alagáveis. Estão associadas a áreas de armazenamento, zonas de encosta, regiões de vertimento de rio (e vice-versa), áreas de transposição de margem, etc.
- Células de reservatório (Tipo 3) – Caracterizadas pela definição por parte do usuário de uma curva cota-área, que estabelece patamares com diferentes áreas na célula.
- Células de planície não urbanizada (Tipo 4) – Análogo ao tipo 2, porém associado a regiões sem urbanização.

As relações hidrodinâmicas entre as células, por sua vez, são materializadas por meio do conceito de ligações.

As ligações, assim como as células, podem ser de diferentes tipos de acordo com as características da conexão que representam. As ligações podem ser dos tipos C4 (Canal), P (Planície), G1/G2/G3 (Galeria), E (Entrada de Galeria), S (Saída de Galeria), D (Confluência entre Galerias), A (Confluência entre Galeria e Rio), M1/M2 (Bueiro), V (Vertedor), O1 (Orifício), F (Comporta FLAP), R (Saída de Reservatório), B (Bombeamento), U (Soleira), L (Laboratório), C5 (Brecha Variável), O2 (Operação de Comportas), Y (Escoamento Subterrâneo) e GEN (Genérica). Neste trabalho, foram utilizados os seguintes tipos:

- Ligações tipo P (Planície) – Ligações que caracterizam a conexão entre planícies onde o escoamento acontece livremente.

- Ligações tipo V (Vertedor) – Ligações que caracterizam a conexão entre células onde existe um obstáculo físico que faz com que só haja vazão entre elas caso o nível d'água atinja determinada altura (materializada sob a forma do parâmetro cota do vertedor). Utilizada, por exemplo, entre células de reservatório e células de planície, ou entre células de rio e planícies marginais.
- Ligações tipo F (Comporta FLAP) – Ligações utilizadas para descarga unidirecional de uma célula para outra. Caracterizada pela definição dos orifícios na célula de origem – podendo variar em quantidade, dimensão e coeficiente de orifício. No presente trabalho, foram utilizadas ligações tipo F para a modelagem de todos os orifícios de descarga dos reservatórios para as células de rio à jusante.

O MODCEL foi utilizado como ferramenta hidrológico-hidrodinâmica para a modelagem da Bacia do Rio Acari. Esse modelo foi desenvolvido e calibrado por Oliveira (2018) e foi utilizado para a aplicação de um novo cenário. Nesse sentido, foram realizadas alterações de parâmetros e características de forma a simular a implementação das novas propostas de intervenção. Os resultados foram, então, comparados com os da etapa de diagnóstico, de forma a permitir a análise do impacto das medidas propostas. Assim, para o tempo de recorrência de 25 anos, será quantificada a eficácia dessas hipóteses.

A partir deste novo cenário, será realizada a otimização das intervenções inicialmente propostas, conforme será descrito a seguir na seção 3.2.

3.2 Otimização de reservatórios

A otimização dos reservatórios é um procedimento crucial para garantir o desempenho hidráulico ideal dessas estruturas, evitando falhas operacionais e maximizando seu potencial de amortecimento. Neste estudo, foi adotada uma abordagem sequencial para otimizar os parâmetros dos reservatórios inicialmente propostos a fim de superar desafios que surgissem na simulação inicial. Para evitar falhas decorrentes de extravasamentos e a subutilização dos reservatórios, foram empregados métodos que ajustam a capacidade de armazenamento e as vazões de saída, garantindo que a capacidade do reservatório não seja excedida para o evento de referência adotado no dimensionamento (TR 25 anos) e seja utilizada em todo o seu potencial. Através dessa otimização, busca-se, então, alcançar uma operação eficiente e segura do conjunto de reservatórios propostos neste novo cenário de projeto.

As alterações a serem consideradas no processo de otimização são:

- Variação nos diâmetros dos orifícios de descarga associados aos reservatórios.
- Variação no número de orifícios de descarga associados aos reservatórios.
- Rebaixamento ou elevação da cota de fundo das células de reservatório para aumentar ou diminuir o volume reservado, contanto que isso não provoque perda de funcionalidade dos orifícios de descarga devido à cota do corpo d'água receptor.

A otimização dos reservatórios foi realizada considerando o tempo de recorrência de 25 anos, de forma iterativa e de montante para jusante, uma vez que o comportamento de cada estrutura afeta os canais associados e, conseqüentemente, os outros reservatórios mais a jusante. Além disso, serão consideradas para otimização somente as células de reservatório correspondentes aos seguintes tipos de IVA, associadas às células do tipo 3 (reservatórios):

- Wetlands
- Bacias de Retenção
- Bacias de Detenção

Os outros tipos foram desconsideradas uma vez que os jardins de chuva/canteiros pluviais possuem suas características funcionais fundamentalmente associadas à sua integração com a vegetação e as dimensões de projeto, o que age como um fator restritivo na possibilidade de variação. Além disso, possuem pequenas profundidades, o que em geral restringe mais ainda as opções de otimização. No caso dos pavimentos permeáveis e telhados verdes, foram desconsiderados uma vez que a modelagem dessas estruturas passa somente pela alteração do coeficiente de runoff da célula, portanto não são passíveis de alterações significativas sem alteração das definições de projeto.

3.3 Sistema de informações geográficas (SIG)

Segundo Mennecke (1996) um sistema de informações geográficas (SIG) é um sistema de informações baseado em computadores que fornece ferramentas para coletar, integrar, manipular, analisar, modelar e representar dados que estão referenciados a uma representação cartográfica precisa de um objeto ou conjunto de objetos no espaço. Isso inclui a elaboração de mapas, a associação de atributos a figuras de localização bem definida no espaço e as diversas ferramentas de processamento desses atributos.

Em uma primeira etapa, no QGIS, foi realizado o estudo da região tomando proveito das propriedades desse software de associar valores e atributos a regiões mapeadas e aos

seus componentes geométricos e geográficos. Esses estudos foram utilizados como base para as propostas de intervenção a serem modeladas.

Esse software utiliza arquivos chamados *shapefiles*, que são dados de natureza mista – objetos espaciais de diversas naturezas como pontos e polígonos georreferenciados, dotados também de atributos (que funcionam de forma estruturada, em formato de planilha).

Ao final do trabalho, essa ferramenta foi também utilizada para construir os mapas e visualizações que constituem os principais elementos de materialização dos resultados.

3.4 Linguagem de programação Python

Devido à quantidade significativa de intervenções a serem estudadas, surgiu a necessidade de otimizar a execução dessas alterações no modelo de forma a reduzir o tempo necessário para produzir os resultados. Nesse sentido, foram construídos alguns scripts simples utilizando a linguagem Python, que podem ser consultados no Apêndice A.

Os scripts utilizam como informações de entrada:

- Planilhas eletrônicas correspondentes às intervenções estudadas;
- Planilha, gerada utilizando o SIG, na qual se relacionam as estruturas a serem modeladas com as células nas quais elas estavam localizadas (vide seção 3.2).

Os códigos, então, realizam um *loop* nesses arquivos e identificam as tipologias localizadas na mesma célula, compilando as informações e somando as áreas das tipologias idênticas que localizadas na mesma célula, além de sumarizar as tipologias diferentes presentes em cada célula.

O script fornece como saída um arquivo no formato JSON (*JavaScript Object Notation*), que permite aninhamentos em oposição à estrutura tabular de uma planilha, onde as intervenções estavam organizadas por célula e não mais por estrutura, o que foi um grande facilitador no processo de visualização e execução da modelagem dado o grande número de objetos (Figura 12).

Figura 12 - Exemplo de arquivo JSON



Fonte: Elaborado pelo autor.

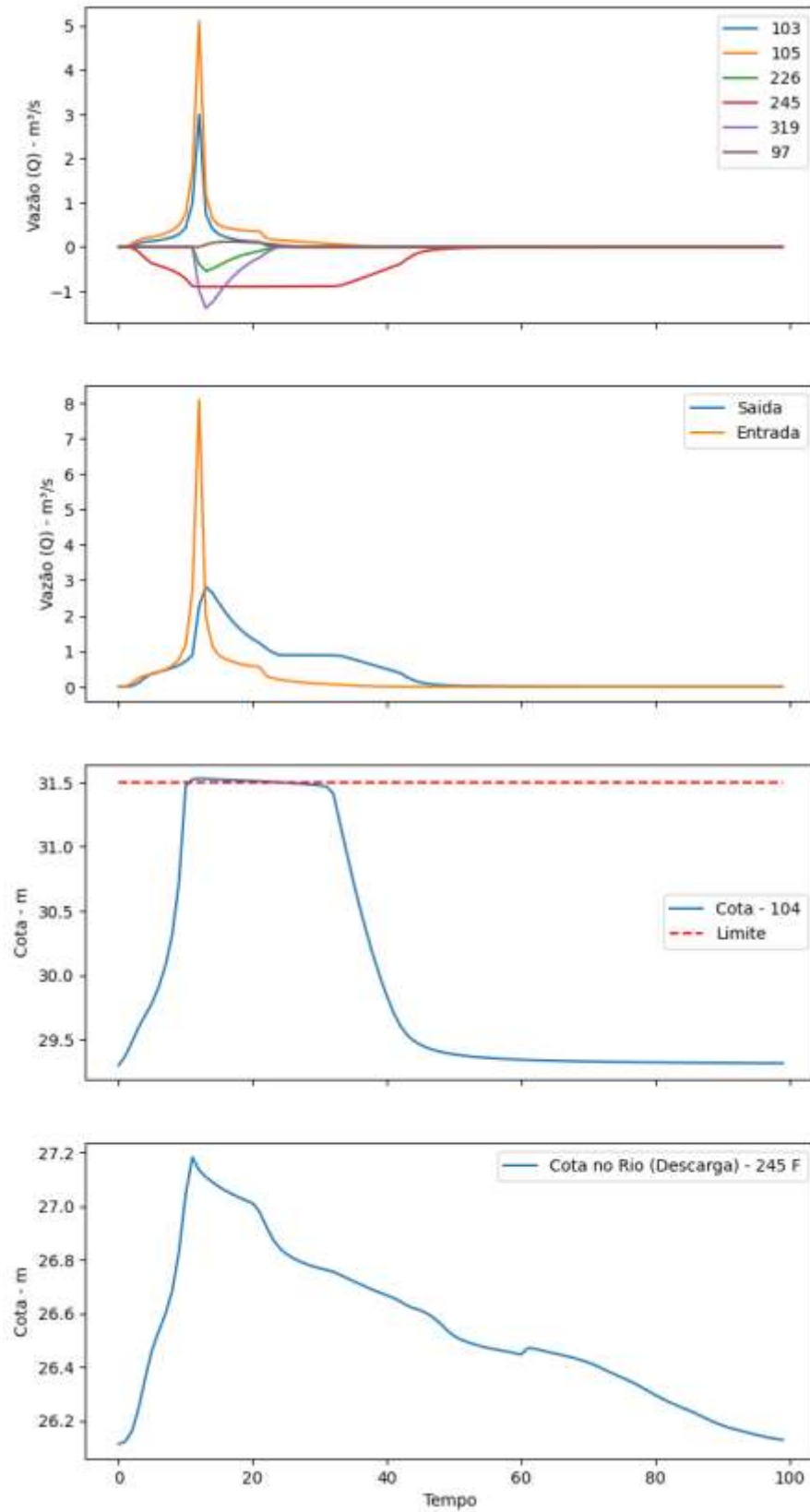
Foi também desenvolvido um *script* com o objetivo de manipular os arquivos de saída do MODCEL, gerando automaticamente os gráficos pertinentes à análise desenvolvida no trabalho. Para cada célula de reservatório a ser otimizada, era realizada pelo código uma busca nos arquivos correspondentes e gerados os gráficos, conforme exemplo apresentado na Figura 13, referentes a:

- Vazões entre a célula de referência e todas as outras células às quais ela se liga, na qual valores positivos representam entradas e valores negativos representam saídas;
- Vazões totais de entrada e saída na célula;
- Cota do nível d'água na célula ao longo do tempo, incluindo marcação horizontal referente à cota de vertimento, ou seja, o limite para evitar a falha (o extravasamento) da estrutura;
- Cota do nível d'água na célula de canal que recebe a descarga dessa célula ao longo do tempo.

Além disso, foram criados mais dois *scripts* que possuem a função de agregar informações de apoio nos arquivos de saída do MODCEL para servir de insumo para a construção desses gráficos. Nesse caso, os valores resgatados foram os patamares máximos de cada célula de reservatório (a serem considerados como limites de extravasamento) e as células de rio correspondentes à descarga de cada reservatório.

Finalmente, a linguagem de programação foi utilizada também para gerar uma lista ordenada dos reservatórios a serem otimizados, levando em consideração o tipo (canteiros pluviais e jardins de chuva não foram otimizados) quanto suas respectivas cotas (que definem a ordem, uma vez que o processo de otimização, nesse caso, precisa ser feito de forma iterativa de montante para jusante considerando o patamar máximo/cota do vertedor dos reservatórios).

Figura 13 - Exemplo de gráficos gerados via script (Célula 104 – Antes do processo de otimização)

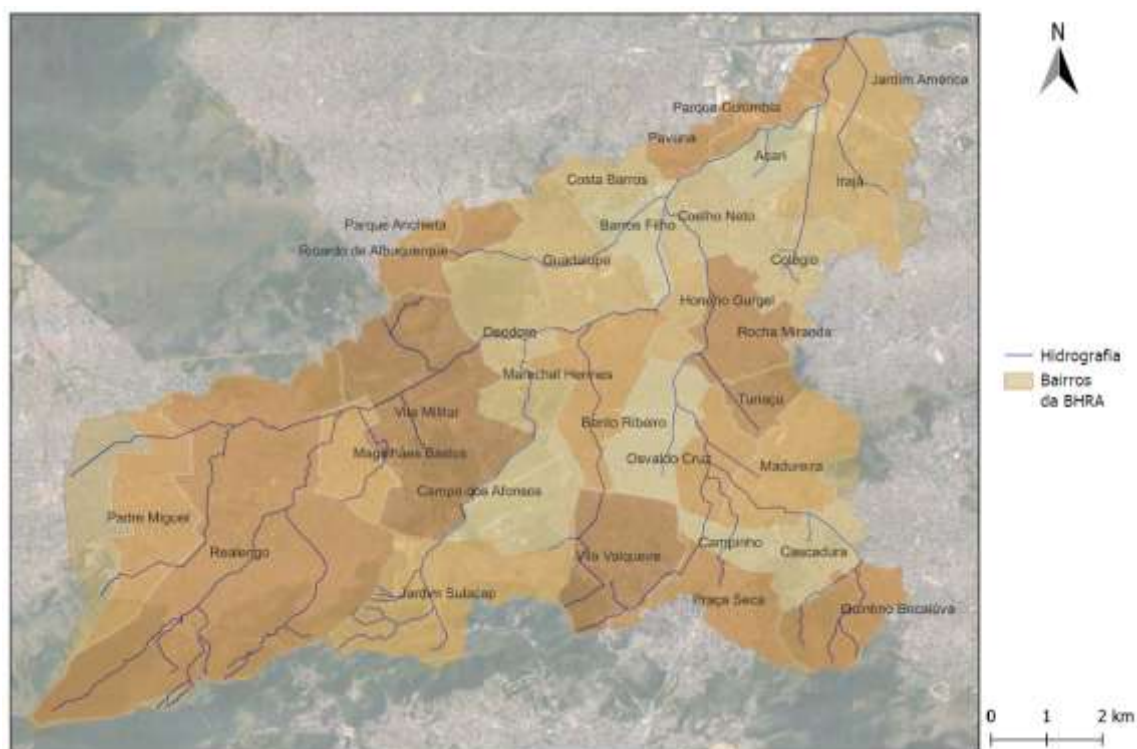


Fonte: Elaborado pelo autor

4 Estudo de caso – Bacia do Acari

Esta seção tem como objetivo apresentar a Bacia Hidrográfica do Rio Acari (BRHA), localizada na Zona Norte do Rio de Janeiro, como estudo de caso. Esta bacia abriga 32 bairros, apresentados na Figura 14, e nela residem aproximadamente 950.851 habitantes (IBGE, 2010). Em decorrência das particularidades do processo de urbanização da região, que se deu de forma desordenada e com um déficit de planejamento, a infraestrutura, em geral, é insuficiente para comportar o desenvolvimento da região. Além desses fatores históricos, existem também habitações em áreas de várzea, baixa predominância de espaços livres e lançamento irregular de corpos hídricos, que contribuem para a degradação da Bacia do Rio Acari.

Figura 14 - Bairros da Bacia Hidrográfica do Rio Acari



Fonte: Elaborado pelo autor

Dos 32 bairros da BRHA, 25 estão abaixo da média do Índice de Desenvolvimento Social (IDS), que foi calculado para o total dos 158 bairros existentes no Rio de Janeiro. Esse índice toma como base o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) definido pela Organização das Nações Unidas (ONU), e almeja estimar o nível de desenvolvimento social e qualidade de vida de determinada região. Nesse índice, consideram-se fatores

como disponibilidade de renda, grau de escolaridade, saneamento básico e qualidade habitacional (OLIVEIRA, 2018).

Todos esses fatores colaboram para que exista uma relação conturbada entre o rio e os habitantes da região, sendo até mesmo visto como “fonte de problemas” devido à frequência de inundações. Apesar disso, mesmo que as melhorias nos sistemas de drenagem e esgotamento sejam reivindicadas pelos moradores, esse ainda é considerado um tópico menos prioritário tendo em vista as demandas por serviços associados ao transporte, trabalho, violência e segurança (BRITTO et al., 2007). Como forma de melhorar as condições gerais da bacia, é possível aliar essas preocupações e caminhar em direção a uma evolução integrada ao se considerar o conceito da multifuncionalidade das paisagens – isto é, sua capacidade de desempenhar diversas funções em um mesmo espaço, dessa forma sendo também capazes de multiplicar sua efetividade ao associar funções hidráulicas a funções sociais, ambientais e econômicas (LÄHDE et al., 2019; LOURENÇO et al., 2015).

Assim, a drenagem urbana pode ser utilizada como um ponto focal estruturante ao se aliar a concepção deste sistema com outras preocupações socioambientais, podendo evoluir de forma que gere benefícios para a população local simultaneamente em diversos âmbitos, inclusive alguns destes considerados pautas de maior urgência.

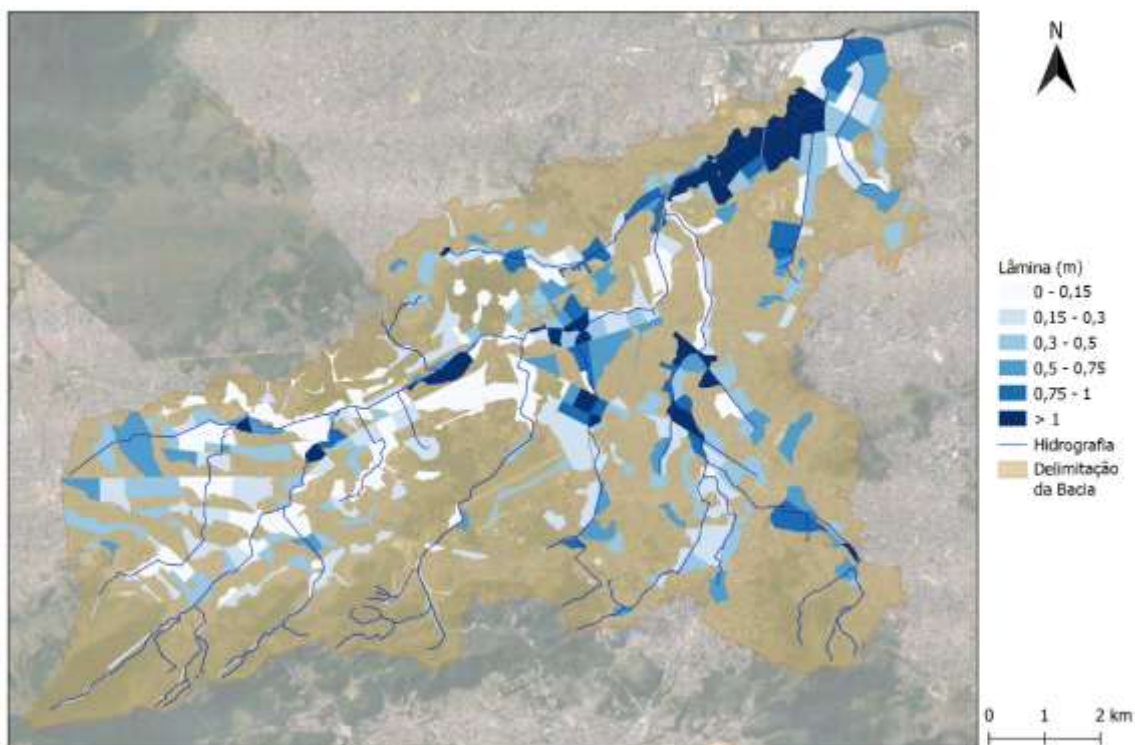
Nesse sentido, tendo em vista esses problemas já conhecidos, diversos órgãos já elaboraram estudos e planos com o intuito de obter um diagnóstico mais preciso da situação da bacia, além de elaborar projetos com o intuito de reverter, entre outros aspectos, os impactos causados por essas chuvas na região. Um dos exemplos mais proeminentes nesse campo é o Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro (PDMAP), publicado em 2014, que teve como objetivo avaliar sob uma ótica sistêmica as características da urbanização da cidade do Rio de Janeiro. O PDMAP traz uma perspectiva orientada a buscar a implementação de princípios de drenagem urbana que levassem em conta questões de qualidade, recarga de aquíferos e reintegração dos cursos d’água à paisagem urbana (HIDROSTUDIO/FCTH, 2014). O plano trazia ainda as premissas de delimitar espaços para acomodar águas excedentes à capacidade de drenagem atual, de forma a evitar futuras inundações; implementar medidas compensatórias em áreas em processo de urbanização; discutir estratégias para evitar a transferência dessas inundações para a jusante; almejar à integração positiva dos corpos hídricos na paisagem urbana; e evitar intervenções em canais já consolidados.

A análise inicial realizada pelo PDMAP (HIDROSTUDIO/FCTH, 2014) destacou os mais críticos pontos de alagamento da bacia. Como forma de atenuar os efeitos das inundações e de forma a materializar as premissas mencionadas, o Plano também propôs algumas medidas como desassoreamento, utilização de reservatórios com o objetivo de amortecer vazões nas cotas intermediárias e reservatórios de “pé de morro” para mitigação de cheias rápidas e deposição de sedimentos.

Além disso, existem também outros estudos que analisaram a situação da bacia tendo o sistema de drenagem urbana como eixo estruturante de planejamento (OLIVEIRA, 2018). Em uma alternativa de projeto tomando como referência as medidas propostas no PDMAP, Oliveira (2018) utilizou o MODCEL para simular as seguintes intervenções na Bacia do Rio Acari: correções estruturais no sistema de drenagem; limpeza e dragagem dos principais cursos d'água; implementação dos reservatórios previstos pelo PDMAP; incorporação de espaços livres para controle de inundações e propostas de parques fluviais.

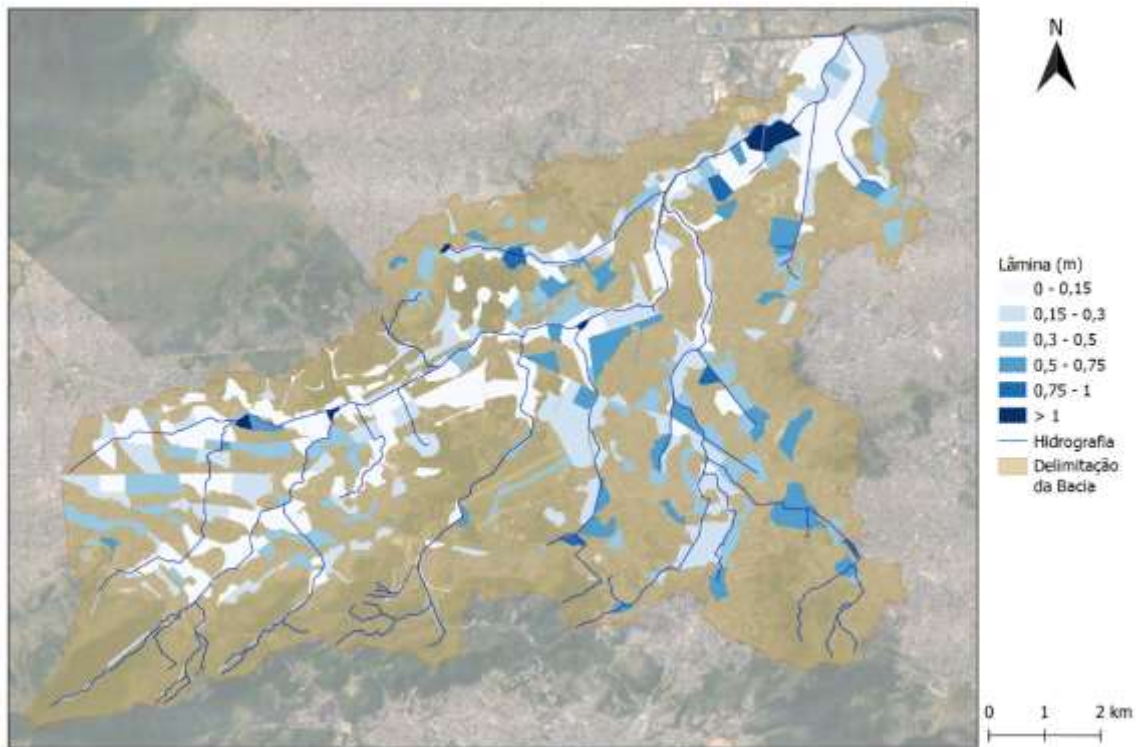
As lâminas de inundação na situação atual da bacia e no cenário de projeto proposto por Oliveira (2018) podem ser observados na Figura 15 e na Figura 16, respectivamente

Figura 15 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Situação Atual)



Fonte: Elaborado pelo autor com o apoio dos dados da pesquisa referida (OLIVEIRA, 2018).

Figura 16 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Cenário Base)



Fonte: Elaborado pelo autor com o apoio dos dados da pesquisa referida (OLIVEIRA, 2018).

O projeto proposto por Oliveira (2018) propõe intervenções majoritariamente concentradas ao longo da calha do Rio Acari e apresentou bastante efetividade em reduzir as lâminas de inundação na BRHA. No entanto, um projeto de drenagem como eixo estruturante de planejamento pode ainda ser complementado com medidas mais distribuídas pelo território integrando-se à um projeto de urbanismo que traz benefícios à população também em outras esferas como a de lazer, ecológica e paisagística.

Neste sentido, novas intervenções foram propostas por Gomes (2022) para a região como forma de incrementar a resiliência e, ao mesmo tempo, promover a revitalização do ambiente urbano por meio da agregação desses espaços multifuncionais.

4.1 Intervenções propostas

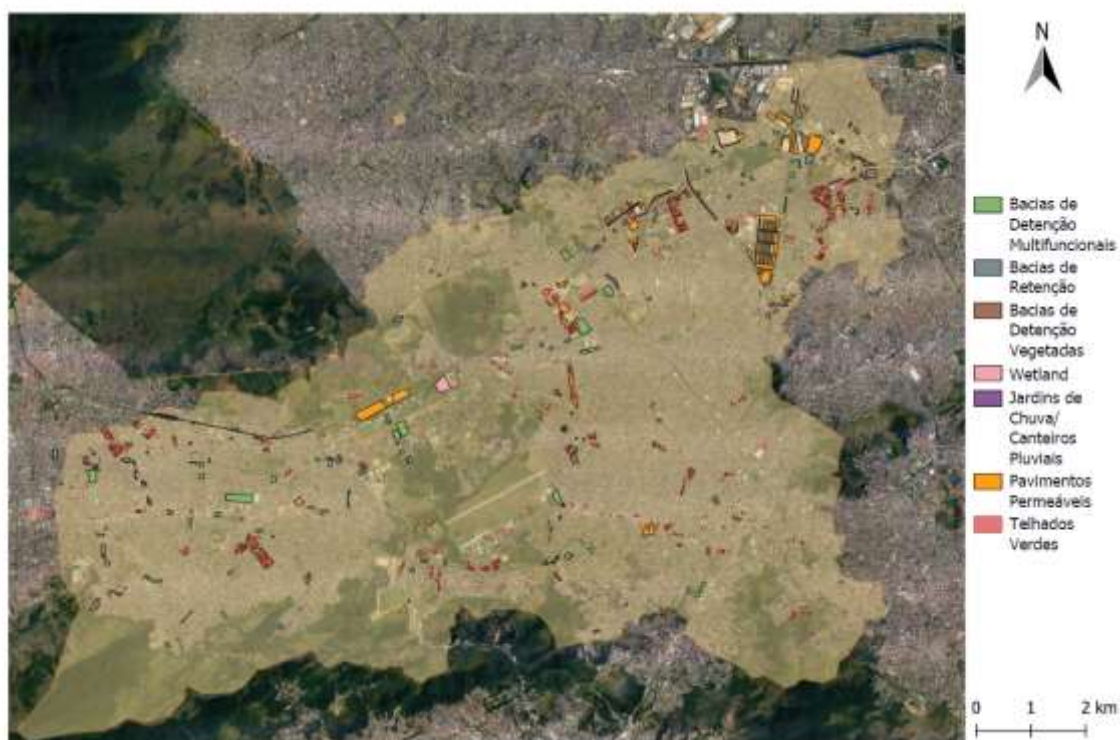
A partir das intervenções originalmente propostas no Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da cidade do Rio de Janeiro (HIDROSTUDIO/FCTH, 2014) e de estudos posteriores de revisão deste plano, com os respectivos modelos computacionais já previamente desenvolvidos (OLIVEIRA, 2018) para a região, foram introduzidas outras medidas, de cunho de arquitetura e urbanismo, conforme indicadas por Gomes (2022).

Nesta nova configuração de projeto, foram introduzidas os seguintes tipos de IVA, em dois grupos, de acordo com sua funcionalidade e metodologia de introdução no modelo computacional, conforme apresentado na Figura 17:

- Estruturas de armazenamento: Associadas ao armazenamento temporário de água da chuva e amortecimento das vazões na bacia. Engloba as bacias de detenção (divididas entre vegetadas e multifuncionais) e retenção, as wetlands e os jardins de chuva/canteiros pluviais. No caso dos tipos com lâmina d'água permanente (wetlands e bacias de retenção), foi considerado um nível d'água inicial de 1m.
- Estruturas de infiltração: São as intervenções de drenagem associadas a alteração na capacidade infiltração da água no solo e, dessa forma, reduzindo o escoamento superficial que chega ao sistema de drenagem urbana. Nesse caso, foram considerados os pavimentos permeáveis e os telhados verdes.

É importante considerar também que algumas dessas estruturas se enquadram nas duas categorias simultaneamente, como as bacias de detenção vegetadas, por exemplo, que exercem influência tanto na capacidade de armazenamento da região (por serem áreas rebaixadas) quanto na dinâmica de escoamento superficial (por serem vegetadas).

Figura 17 - Estruturas modeladas no cenário de projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor com o apoio dos dados da pesquisa referida (GOMES, 2022).

Referente ao primeiro grupo de intervenções, os tipos de IVA que permitem o armazenamento de uma parcela do volume precipitado foram inseridas no modelo utilizando células do tipo “Reservatório Cota-Área”, que definem a simulação de patamares com áreas diferentes dentro de uma mesma célula, permitindo calcular volumes ao longo do enchimento do reservatório. Com essa dinâmica, é possível simular o armazenamento temporário complementar proporcionado por essas estruturas. As características dessas estruturas projetadas estão sumarizadas na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 - Caracterização das estruturas de armazenamento

	Bacias de Retenção	Bacias de Detenção Multifuncionais	Bacias de Detenção Vegetadas
Área Total (m ²)	50.730	747.442	201.005
Volume Total (m ³)	152.191	1.046.419	241.206
Profundidade (m)	3,00	1,40	1,20

Tabela 2 - Caracterização das estruturas de armazenamento

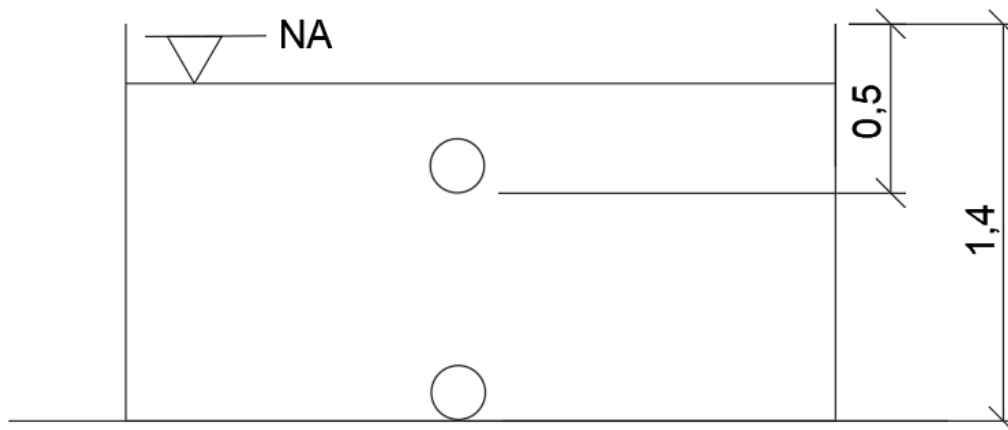
	Wetlands	Jardins de Chuva/ Canteiros Pluviais
Área Total (m²)	48.884	166.843
Volume Total (m³)	146.653	66.737

Além disso, foram considerados também no projeto inicial um conjunto de orifícios com o objetivo de realizar a descarga dos reservatórios propostos, de forma a promover o amortecimento dessas vazões e, assim, aliviar o sistema como um todo. Todos os orifícios foram representados com a consideração da utilização de comportas *flap*, de forma a impedir o refluxo de água de volta para o reservatório caso a cota do rio receptor se eleve de forma significativa. Como padrão inicial, para cada uma dessas estruturas, foram considerados dois orifícios de 40cm de diâmetro (para reservatórios sem lâmina permanente – bacias de detenção e canteiros pluviais) ou 70cm de diâmetro (para reservatórios com lâmina permanente – bacias de retenção e wetlands).

O primeiro orifício foi considerado no fundo da área correspondente ao volume útil do reservatório, ou seja, na cota de fundo do mesmo no caso das bacias de detenção/jardins de chuva/canteiros pluviais, e 1m acima do fundo (altura estipulada para a lâmina d'água permanente inicial) no caso das wetlands e bacias de retenção. Já o segundo orifício foi proposto 0,5m abaixo do patamar máximo do reservatório. Essa distribuição dos orifícios é importante para assegurar que o reservatório permaneça sendo descarregado mesmo que a cota da célula de rio de destino atinja a cota de fundo da célula, o que impede o funcionamento do orifício mais baixo. A Figura 18 e a Figura 19 apresentam croquis representativos exemplificando a disposição dos orifícios em bacias de detenção e de retenção, respectivamente.

Figura 18 - Croqui representativo de disposição dos orifícios em uma bacia de detenção multifuncional

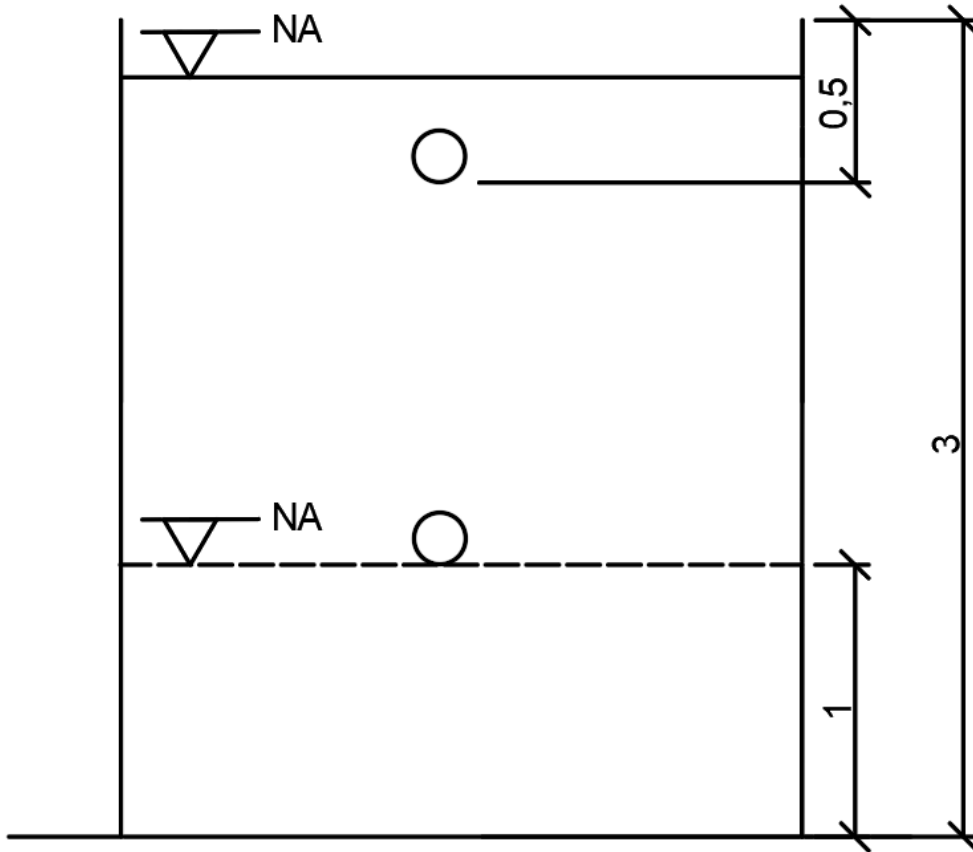
Bacia de Detenção Multifuncional - Célula 183



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 - Croqui representativo de disposição dos orifícios em uma bacia de retenção

Bacia de Retenção - Célula 30015



Fonte: Elaborado pelo autor

As estruturas associadas a infiltração, por sua vez, foram representadas por meio da alteração das características de permeabilidade das células de superfície por meio da mudança nos valores dos coeficientes de *runoff*, desconsiderando-se, para fins de simplificação, a capacidade de armazenamento no caso dos pavimentos permeáveis. O novo valor desse coeficiente foi calculado para cada célula realizando-se uma média entre o coeficiente de *runoff* original da mesma e o valor estipulado para as áreas vegetadas (0,25), ponderando-se pelas respectivas áreas. As áreas verdes introduzidas neste complemento de projeto são sumarizadas, por tipologia, na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização das tipologias de infiltração

	Pavimentos Permeáveis	Telhados Verdes
Área Total (m ²)	793.882	836.257

5 Resultados e Discussão

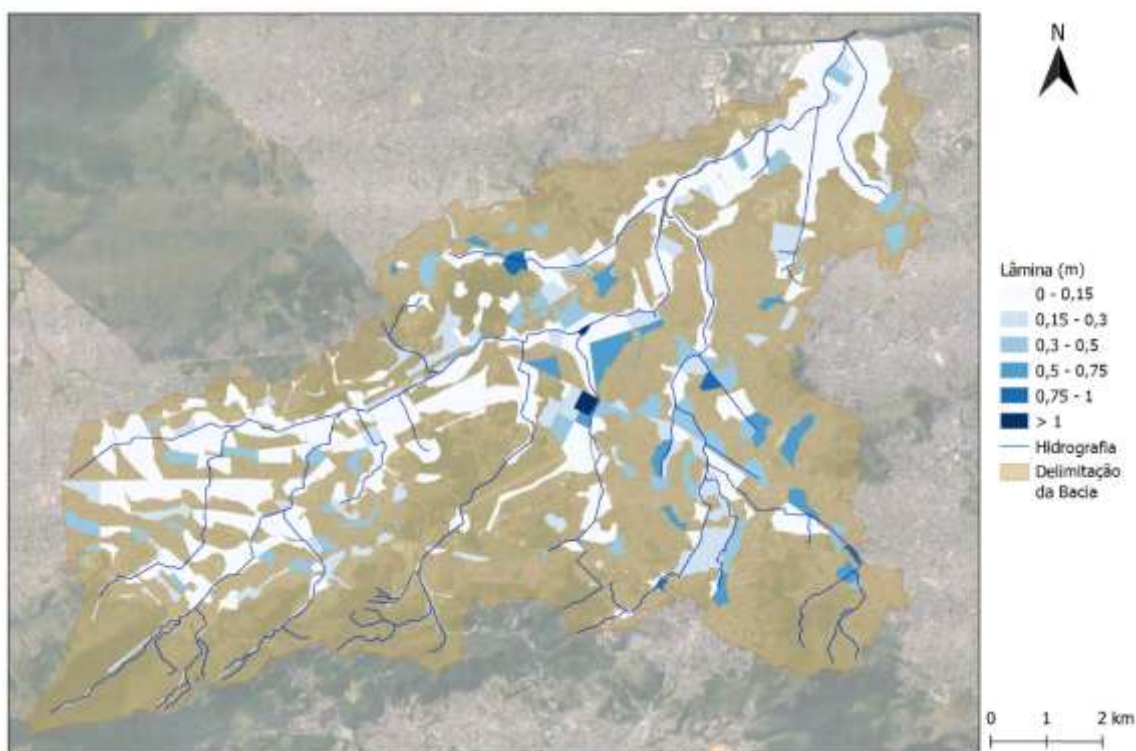
5.1 Resultados da modelagem do projeto de Gomes (2022)

Após a incorporação das propostas de intervenção neste novo cenário de projeto, é importante realizar a quantificação e a análise dos benefícios, tomando como métrica a altura das lâminas d'água na bacia quando da ocorrência de um evento de tempo de recorrência de 25 anos. No entanto, além da comparação das lâminas por meio de imagens como da Figura 20, foi realizado ainda o cálculo da média ponderada do alagamento em relação as áreas das células. Dessa forma, a variação do resultado em relação a situação atual tornou-se mais evidente.

No modelo de diagnóstico da situação atual da bacia, a lâmina média foi de 0,47 m, enquanto com as medidas de forte cunho sustentável propostas por Oliveira (2018), esse valor foi reduzido para 0,28 m, o que corresponde a uma redução de 40%, resultado bem expressivo e ponto de partida inicial do presente trabalho.

Com a introdução complementar das estruturas de IVA idealizadas por Gomes (2022) e exploradas na seção 4.1 do presente trabalho, houve uma redução ainda mais significativa, passando para 0,16m no cenário pré-otimização dos reservatórios. Isso corresponde a mais uma redução de 43% o que, considerando as intervenções propostas por ambos os autores, significa uma redução acumulada de cerca de 67% (Figura 20).

Figura 20 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Cenário proposto não otimizado)



Fonte: Elaborado pelo autor

Além da consideração da análise da lâmina média, foi utilizada também outra métrica de comparação dos cenários, que corresponde ao número de domicílios afetados pelas inundações.

Essa outra análise tem como objetivo a visualização dos resultados em um nível um pouco mais prático, na medida em que as lâminas médias não consideram diretamente fatores humanos e sociais como a distribuição da população na bacia. Nesse caso, foram utilizados também dados do estudo de Oliveira (2018) que descreviam a distribuição populacional nas células do modelo, identificando regiões de particular criticidade e vulnerabilidade, que possuem problemas de infraestrutura e ocupação irregular, além de agregar também o quantitativo de domicílios na região de cada célula. Assim, estes foram os atributos considerados para a análise de domicílios afetados. Foram consideradas afetadas as células com lâminas superiores a 0,2m (no caso das regiões identificadas como particularmente vulneráveis) ou 0,5m (no caso de regiões identificadas como de ocupação regular), conforme definido por Oliveira (2018). Esses patamares indicam a expectativa de entrada de água nas edificações de cada tipo (informal e formal).

Partindo dessas hipóteses, as medidas propostas inicialmente por Oliveira (2018) promoveram uma redução no número de domicílios afetados pelas inundações de um valor inicial de 46.398 para 22.521 na bacia, correspondendo a uma redução percentual de aproximadamente 51%. Com as intervenções de IVA propostas adicionalmente, esse valor foi posteriormente reduzido para 11.825 núcleos domiciliares afetados, uma diminuição de mais 47% em relação aos resultados obtidos anteriormente. Esses valores totalizaram, levando em conta as estruturas propostas por Oliveira (2018) e Gomes (2022), uma diminuição acumulada de 75% no número de domicílios afetados pelas inundações, o que representa, assim como no caso da lâmina média ponderada, uma redução extremamente significativa e que corrobora a efetividade da integração dos dispositivos de drenagem sustentável à paisagem urbana e à função social dos espaços. Mais ainda, cabe destacar que a combinação das duas informações produz ainda uma observação muito significativa: os 25% de domicílios residualmente afetados pela inundações, não contêm, em média, água em seu interior. Ou seja, como as lâminas d'água resultantes apresentam média ponderada de 0,16m, que é menor que o limiar pré-definido de 0,20m para acesso ao interior das edificações, a água de alagamento ainda presente nas células afetadas prejudica o pedestre, mas não causa danos ao conteúdo das edificações.

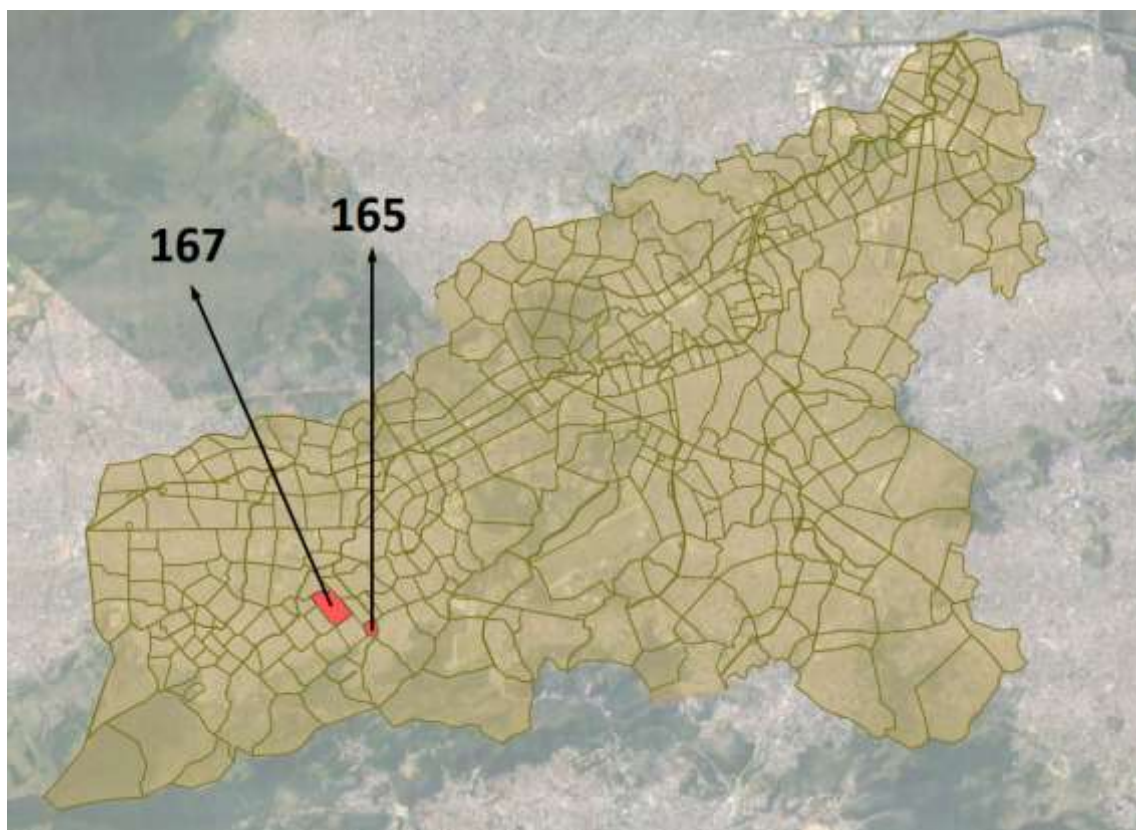
Essa contribuição adicional das IVA, além de possuir um valor crítico para o sistema de drenagem e representar uma oportunidade clara de agregar valor ao projeto urbanístico da região, fica ainda mais evidente quando se leva em conta os demais benefícios do uso de infraestruturas verdes e azuis. Nesse sentido, o projeto não apenas reduziria em mais 43% as lâminas esperadas e em 47% os núcleos residenciais afetados pela chuva de tempo de recorrência de 25 anos no caso da execução do projeto base, mas também traria inúmeros outras vantagens e geraria valor em diversos outros âmbitos, com a criação de espaços de lazer, socialização, cultura e prática esportiva, além de contribuir para o valor estético e paisagístico e, conseqüentemente, a valorização da região em diversos âmbitos.

5.2 Otimização das estruturas

Ao se considerarem os procedimentos e critérios de seleção descritos na seção 3.2, foi selecionado um conjunto de 64 reservatórios para serem otimizados. A sumarização das alterações que foram necessárias para atingir este objetivo podem ser encontradas no Apêndice B.

Devido ao grande número de reservatórios propostos e estudados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, tanto na esfera de implementação quanto de otimização, é pertinente dedicar um olhar um pouco mais detalhado a alguns casos particulares para compreender melhor a dinâmica desse processo e servir de referência para possíveis casos de usos futuros semelhantes. Assim, como parte do produto deste estudo, foram explorados alguns exemplos considerados pertinentes, definidos como casos-tipos para a otimização. É importante reiterar que este processo está sujeito a diversos fatores restritivos que muitas vezes envolvem *trade-offs* naturais – por exemplo, em alguns casos, um reservatório pode estar chegando à falha por extravasamento e as condições locais, por motivos técnicos, urbanísticos ou mesmo associados aos dispositivos de descarga do reservatório, não permitem o aumento do volume de armazenamento. Assim, a única opção para evitar a falha crítica do reservatório nesses casos é aumentar a vazão de descarga (pelo aumento da área do dispositivo de descarga) e, por conseguinte, reduzir o amortecimento das vazões para evitar a falha. No estudo dos casos tipo, foram estudadas as células referenciadas pelos identificadores 165 e 167, localizadas conforme o indicado na Figura 21.

Figura 21 - Localização das células de referência para estudo de casos tipo

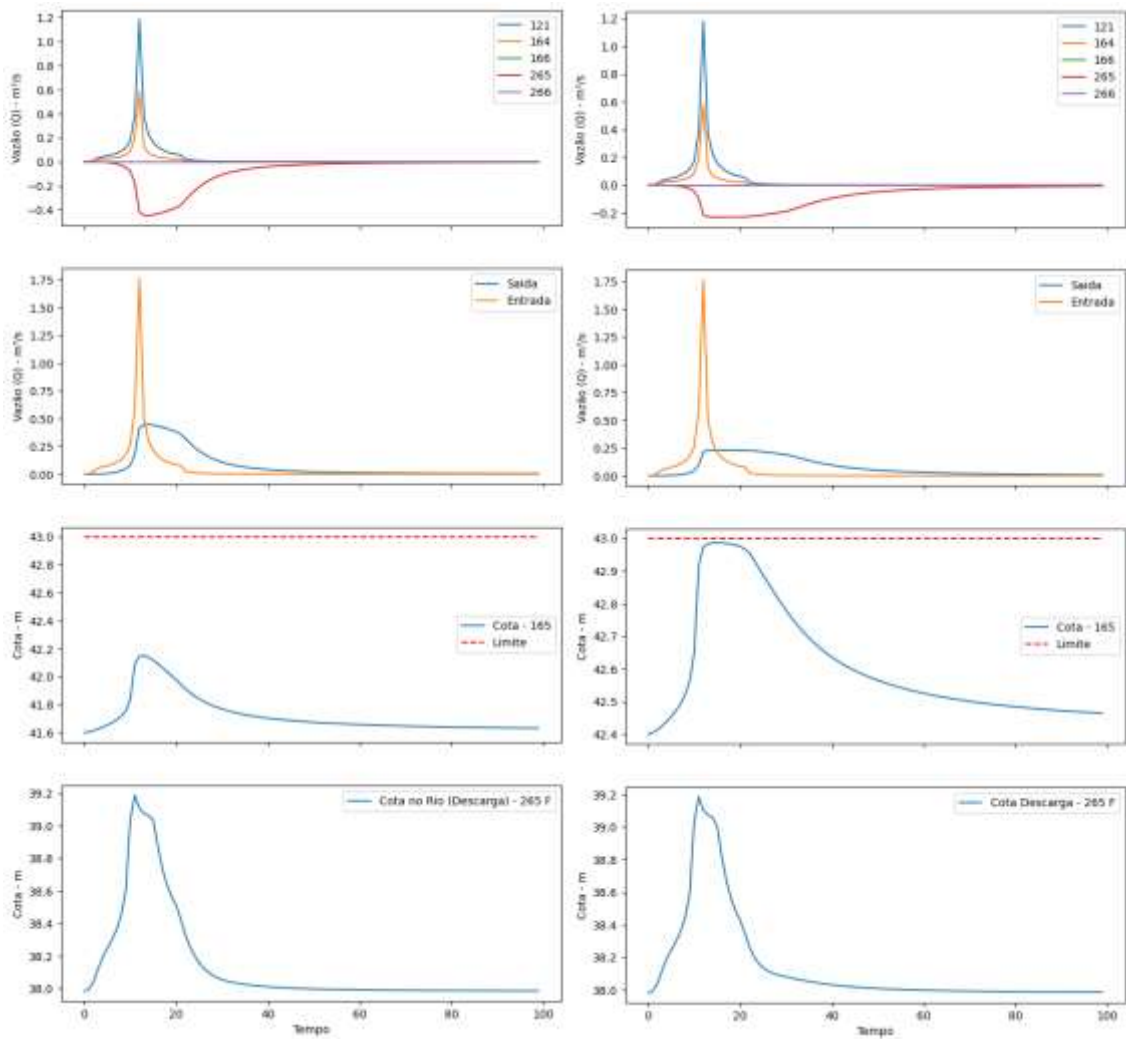


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.1 Caso tipo 1: Reservatórios subutilizados

Nesse caso, a cota máxima atingida pela água no reservatório deixa uma margem grande em relação à cota do vertedor, estando associada a um volume de armazenamento maior do que o necessário ou a orifícios de descarga muito numerosos ou de diâmetro superdimensionado. Nesse caso, em geral não foi considerada a diminuição dos orifícios de descarga, quando os diâmetros muito eram pequenos poderiam sofrer restrições por sedimentação de material na tubulação e gerar problemas operacionais. Assim, nesses casos, optou-se por propor um menor número de orifícios (quando possível, com o objetivo de aumentar o amortecimento ao promover a redução da vazão de descarga e assim também tirar mais proveito do volume de armazenamento do reservatório) e por reduzir a profundidade dos mesmos de forma a gerar economia de capital ao reduzir o volume de escavação necessário para a execução das intervenções, simultaneamente permitindo que seja extraída a capacidade máxima do reservatório projetado, conforme pode ser verificado na Figura 22.

Figura 22 - Comportamento da célula de número 165 antes (esquerda) e depois (direita) da otimização



Fonte: Elaborado pelo autor

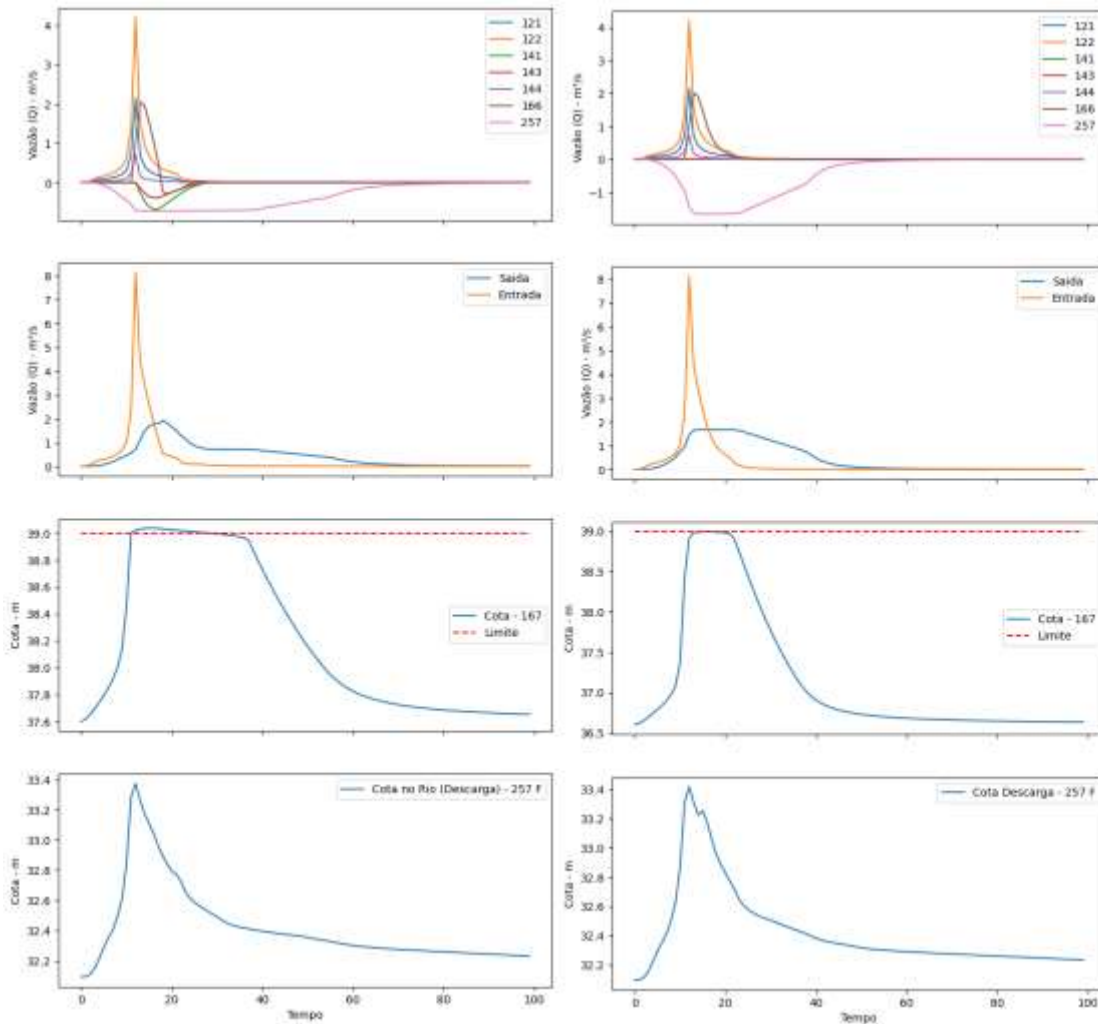
Neste exemplo, a cota de fundo foi elevada em 0,8m e foi removido um dos orifícios de modo a reduzir a vazão de saída. Dessa forma, reduziu-se o volume de escavação necessário e permitiu-se que o nível d'água chegasse consideravelmente mais próximo do limite, de forma a utilizar o potencial da estrutura projetada. Além disso, a redução da vazão de saída com a remoção do orifício também colaborou para um aumento significativo do amortecimento fornecido por esse reservatório. A vazão máxima de saída, que no cenário pré-otimização correspondia a aproximadamente 0,5 m³/s (uma redução de 71% em relação ao valor de entrada de 1,75 m³/s) para 0,25 m³/s (uma redução de 86% em relação ao valor de entrada de 1,75 m³/s).

5.2.2 Caso tipo 2: Reservatórios em falha por vertimento

Os reservatórios que foram definidos como pertencentes ao caso-tipo 2 apresentam comportamento relativamente simples. Pode-se observar, de acordo com a Figura 23, que o reservatório em questão, ao receber vazões de entrada expressivas de uma quantidade considerável de células vizinhas, estava sofrendo extravasamento (caracterizando uma falha crítica no dispositivo) e realizando o vertimento da água excedente para as células adjacentes. Para solucionar esse problema, foi proposto o rebaixamento da cota de fundo do reservatório em 1m e a alteração dos diâmetros dos orifícios de descarga para 0,60m.

Pode-se observar que, no caso dessa célula, foi possível evitar o extravasamento do reservatório, para o tempo de recorrência adotado no dimensionamento, mantendo o alto desempenho atingido no amortecimento, sendo a vazão máxima de saída (cerca de 1,8 m³/s) muito menor do que a vazão máxima de entrada (cerca de 8,2 m³/s). Isso equivale a uma redução percentual de 78%, amortecendo as vazões para praticamente um quinto do valor inicial neste exemplo. Esse resultado é extremamente positivo e corrobora a efetividade desse tipo de intervenção.

Figura 23 - Comportamento da célula de número 167 antes (esquerda) e depois (direita) da otimização



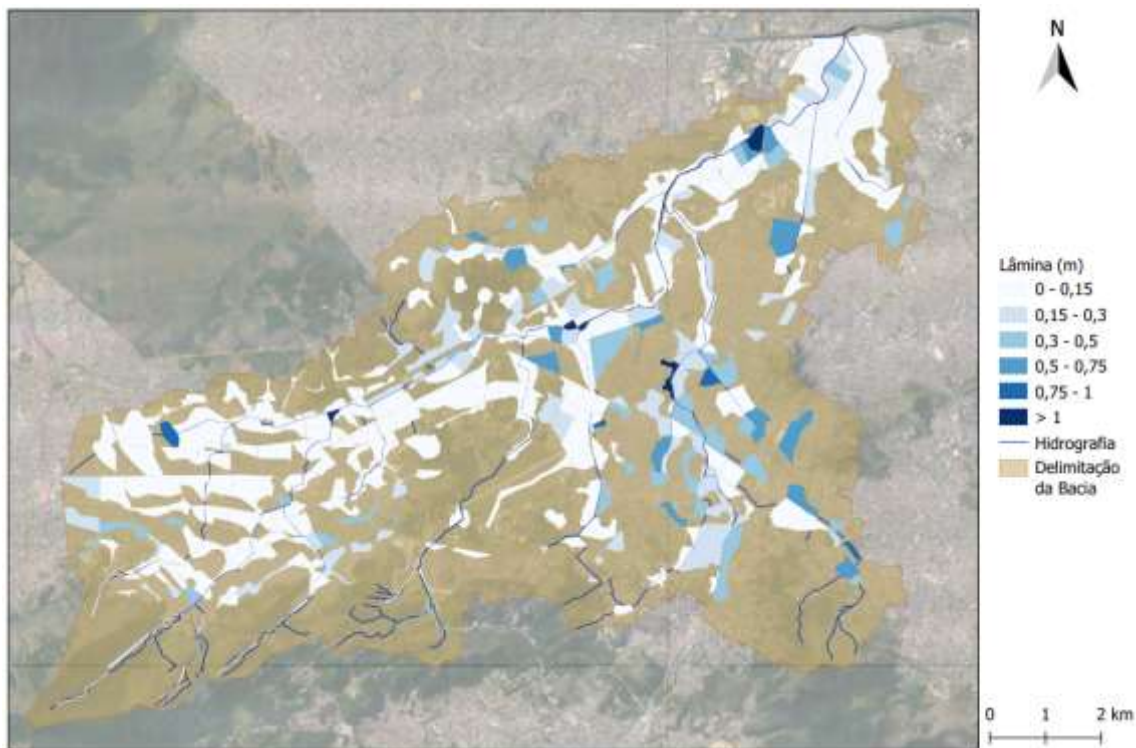
Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.3 Resultados finais da modelagem

Após a realização desse processo, os resultados finais mostraram-se ainda mais positivos, pois falhas das estruturas para o tempo de recorrência de referência puderam ser corrigidas e dispositivos superdimensionados puderam ser ajustados. O valor da lâmina média ponderada permaneceu sendo 0,16m, associado novamente a uma redução de 67% em relação à situação atual. No entanto, o processo de otimização promoveu uma redistribuição dessas lâminas d'água na medida em que foi evitado o extravasamento de alguns reservatórios que atingiam a falha anteriormente. Assim, observa-se nas manchas de inundação representadas na Figura 24 que, apesar do valor

coincidente da lâmina média ponderada, houve uma diferença na disposição espacial no resultado.

Figura 24 - Lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari (Cenário proposto otimizado)



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, no que tange à segunda métrica estudada – o número de domicílios afetados pelas inundações – houve uma discreta complementação direta do resultado anterior, com uma redução no número de edificações atingidas de 11.825 para 9.596, o que corresponde a uma redução percentual de mais 19% em relação ao cenário não otimizado. Com isso, a redução acumulada considerando as três etapas (projeto original de Oliveira (2018), as intervenções de IVA propostas por Gomes (2022) e a otimização desse conjunto) atingiu o valor extremamente expressivo de 79%. demonstrando a eficiência que pode ser atingida ao se aliarem os sistemas de drenagem urbana tradicionais com abordagens mais modernas e sustentáveis como as infraestruturas verdes e azuis em conjunto com a utilização de ferramentas modernas de modelagem hidrodinâmica para quantificar os resultados e promover uma iteração ativa das definições de projeto.

Assim, finalmente, encontram-se sumarizadas na Tabela 4 os resultados de todos os cenários, com os valores absolutos atingidos pelas métricas e suas respectivas reduções percentuais em relação à situação atual:

Tabela 4 - Sumarização dos resultados da modelagem

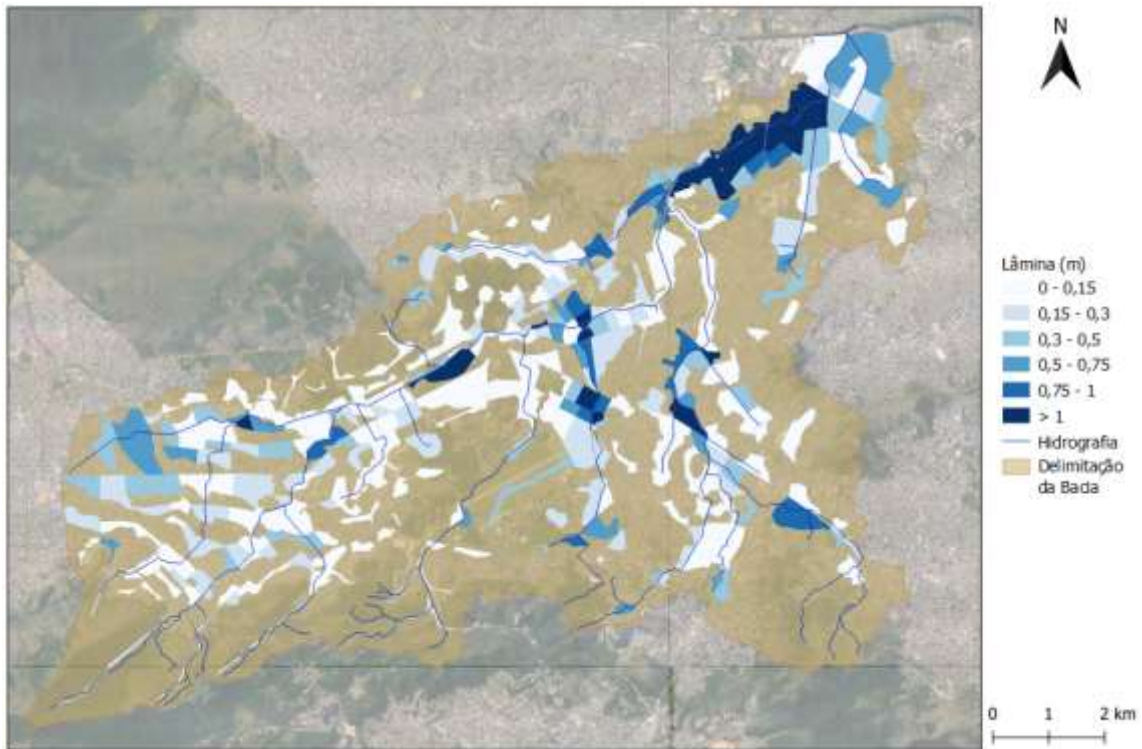
		Cenário			
		Atual	Oliveira	Gomes	Otimização
Lâmina Média Ponderada	Redução	-	40%	66%	66%
	Métrica	0.47	0.28	0.16	0.16
Domicílios Afetados	Redução	-	51%	75%	79%
	Métrica	46.398	22.521	11.825	9.596

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi elaborado também para posterior visualização dos resultados o mapa representado na Figura 25, que consiste nas lâminas diferenciais em relação ao cenário final de projeto – ou seja, as diferenças numéricas nas lâminas entre a situação atual e a modelagem pós-otimização, onde pode-se visualizar, mais uma vez, a efetividade atingida pelo cenário de projeto proposto ao longo de toda a região da bacia, especialmente na região particularmente crítica da jusante da BHRA.

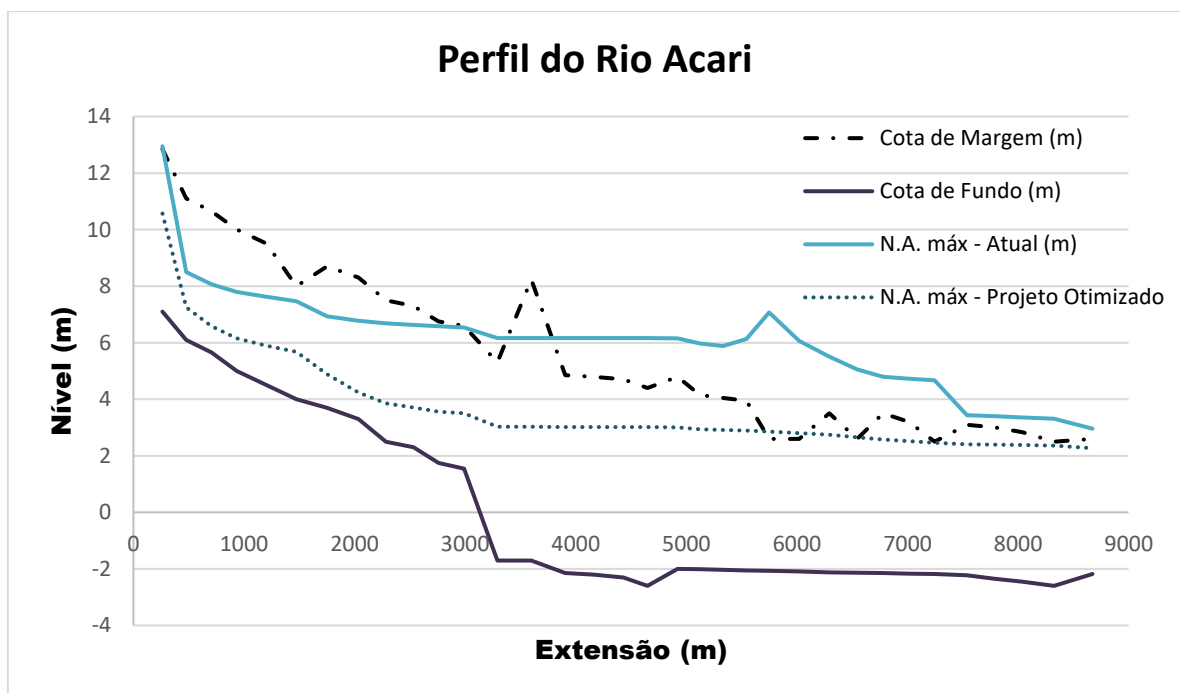
Além disso, encontram-se também representados, na Figura 26, os níveis mais críticos do Rio Acari, por meio do perfil de níveis d'água máximos nos cenários atual e de projeto pós-otimização, considerando o tempo de recorrência de 25 anos. O eixo x do gráfico corresponde ao eixo do Rio Acari e vai de zero, representando o ponto de encontro entre o Rio Sapopemba e o Rio Tingui, até o ponto de encontro com o Rio Pavuna aproximadamente 9km a jusante. Observa-se que, na situação atual, os níveis d'água do perfil do rio encontram-se acima das cotas de margem ao longo de praticamente todos os 5km finais desse trecho. No cenário de projeto, porém, esses níveis d'água são reduzidos consideravelmente de forma que o novo perfil traçado possui apenas alguns focos pontuais de extravasamento, estando seguro durante praticamente todo o trecho.

Figura 25 - Reduções nas lâminas d'água na Bacia Hidrográfica do Rio Acari em relação à situação inicial (Cenário proposto otimizado)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Perfil de Níveis de Água máximos do Rio Acari para o cenário atual e cenário de projeto otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 Considerações Finais

Considerando os resultados obtidos, percebe-se que a execução dos projetos que foram estudados traria consigo inúmeros benefícios para o desenvolvimento da Bacia do Rio Acari.

Muitos desses benefícios possuem efetividade imediata diante da sua execução, como as implicações positivas no âmbito da drenagem urbana - a redução da frequência e da intensidade das inundações e a recuperação de parcelas do ciclo hidrológico local, o restaurando parcialmente em direção ao estado de pré-urbanização – materializadas em forma da redução generalizada nas lâminas d'água ao longo da bacia que foi estudada.

Além disso, é importante também considerar os outros impactos positivos associados às características das estruturas que seguem os princípios da drenagem urbana sustentável que se observam mais marcantes a longo prazo. Os projetos propostos trazem consigo também, caso implantados, a valorização da região em diversos âmbitos, com a criação de áreas de lazer e socialização, o incremento de área vegetada e o conseqüente aumento da biodiversidade dos ecossistemas locais e o aumento do valor paisagístico das áreas estudadas sob o ponto de vista estético.

Tudo isso contribui também para a valorização da região, seja do ponto de vista monetário ou na perspectiva popular, o que por si só ajuda a trazer ainda mais benefícios e favorecer ainda mais o desenvolvimento e a qualidade de vida da população residente dessas regiões que atualmente enfrentam diversos problemas associados a essas questões de infraestrutura e habitação.

Além da quantificação da efetividade das propostas, outra conclusão relevante da pesquisa desenvolvida é a reiteração do potencial da modelagem hidrodinâmica enquanto ferramenta de suporte à tomada de decisões para os gestores públicos, pois permite uma análise detalhada da dinâmica de escoamentos em uma determinada bacia hidrográfica. Por meio da simulação de diferentes cenários de projeto, torna-se possível avaliar os efeitos de diferentes medidas para a mitigação das inundações. A modelagem hidrodinâmica permite também avaliar áreas críticas onde são necessárias intervenções prioritárias. Essas informações são cruciais para a tomada de decisão dos órgãos e instituições do Estado, que precisam definir políticas e projetos de engenharia que visem minimizar os impactos das inundações em áreas urbanas. Portanto, conclui-se que a modelagem hidrodinâmica agrega valor e confiabilidade para a avaliação de sistemas

de drenagem e para a promoção da sustentabilidade ambiental e do aumento da qualidade de vida em áreas urbanas.

É importante enfatizar que, na mesma medida em que esses projetos possuem o potencial de contribuir para uma urbanização cada vez mais planejada, mitigando fatores como ocupação irregular e projetos urbanísticos que falham em levar em consideração as características particulares da região, é fundamental assegurar que essas questões estudadas também sejam bem executadas na prática. Muitas das estruturas estudadas exigem medidas de manutenção como a retirada de material acumulado, o cuidado com a vegetação, entre diversas outras necessidades constantes desses espaços livres mesmo após sua implantação.

Mesmo em vista dos trabalhos que já foram desenvolvidos até o presente, ressalta-se também algumas recomendações de investigações futuras que podem ser sugestões valiosas ao aprofundar ainda mais esse tema:

- Avaliação e comparação da efetividade de medidas e estruturas de infraestrutura verde e azul para diferentes tempos de recorrência;
- Análise de custo-benefício de medidas e estruturas de infraestrutura verde e azul em relação a abordagens normalmente associadas à drenagem urbana tradicional;
- Investigação da relação entre as características de ocupação e uso do solo e a efetividade na mitigação de cheias da implantação de tipos de infraestrutura verde e azul;
- Análise da efetividade de estruturas de infraestrutura verde e azul na redução da carga de sedimentos, matéria orgânica e outros tipos de materiais transportados pela água;
- Investigação da viabilidade técnica e econômica da execução de diferentes conjuntos de técnicas de infraestrutura verde e azul e a sua classificação quantitativa em relação a facilidade de implantação;
- Simulação do comportamento a longo prazo das estruturas de infraestrutura verde e azul, considerando diferentes cenários de qualidade de manutenção das mesmas;
- Investigação do interesse e da aceitação pública dessas intervenções e a perspectiva da população residente a respeito de sua implantação.

7 Referências Bibliográficas

- ABCP. *Projeto Técnico: Reservatórios de Detenção*. 2013. Disponível em: <http://www.solucoesparacidades.com.br/saneamento/reservatorios-de-detencao/>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- ALVAREZ-PALAU, E. J.; BOGART, D.; DUNN, O.; SATCHELL, M.; TAYLOR, L. S., 2020. *Transport and urban growth in the first industrial revolution*. [S. l.], p. 0–67, 2020.
- AMSALLEM, J.; DESHAYES, M.; BONNEVIALLE, M., 2010. *Analyse comparative de méthodes d'élaboration de trames vertes et bleues nationales et régionales*. *Sciences Eaux & Territoires*, [S. l.], v. Numéro 3, n. 3, p. 40–45, 2010. DOI: 10.3917/set.003.0040.
- BALLARD, B. W., 2015. *The SuDS Manual*. London: CIRIA, 2015.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N. de O.; BARRAUD, S., 2011. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011.
- BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T., 2002. *Smart Conservation for the 21st Century*. *Green Infrastructure*, [S. l.], v. 20, p. 12–17, 2002. Disponível em: <https://www.merseyforest.org.uk/files/documents/1365/2002+Green+Infrastructure+Smart+Conservation+for+the+21st+Century..pdf>.
- BONZI, R., 2015. *Andar Sobre Agua Preta a Aplicacao Da Infraestrutura Verde Em Areas Densamente Urbanizadas*. [S. l.], n. 16, p. 159, 2015.
- BRASIL. *LEI Nº 11.445 DE 05 DE JANEIRO DE 2007*. 2007. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=11445&ano=2007&ato=9bacXWU90MRpWTad7>. Acesso em: 11 ago. 2023.
- BRITTO, A. L. N. de P.; SILVA, V. A. C. Da, 2007. *Viver às Margens dos Rios: uma análise da situação dos moradores da Favela Parque Unidos de Acari*. 1. ed. Rio de Janeiro.
- BURIAN, S. J.; EDWARDS, F. G., 2002. *Historical perspectives of urban drainage*. *Global Solutions for Urban Drainage*, [S. l.], n. 479, p. 1–16, 2002. DOI: 10.1061/40644(2002)284.
- BUTLER, D.; DAVIES, J. W., 2004. *Urban Drainage*. Florida: CRC Press, 2004.
- CANHOLI, A. P., 2015. *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- CARNEIRO, P.; MIGUEZ, M. G., 2011. *Controle de Inundações em Bacias Hidrográficas*

Metropolitanas. 1. ed. Publicação Digital: Annablume, 2011.

CHAKARIAN, L., 2008. *Uso e Ocupação do Solo Urbano em Encostas na Área de Proteção de Mananciais da Bacia de Guarapiranga*. *Habitation*, [S. l.], 2008.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. dos S. F. V.; KLIGERMAN, D. C., 2019. *A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza*. *Saúde em Debate*, [S. l.], v. 43, n. spe3, p. 94–108, 2019. DOI: 10.1590/0103-11042019s307.

CORMIER, N. S.; PELLEGRINO, P. R. M., 2008. *Infra-Estrutura Verde : Uma Estratégia Paisagística Para a Água Urbana Green Infrastructure : a Natural Systems Approach To Stormwater in*. *Paisagem e Ambiente: Ensaios*, [S. l.], v. 25, p. 127–142, 2008.

CORREA, P. F., 2004. *Paisagem e Sentido de Lugar: uma abordagem para os espaços livres em conjuntos habitacionais*. Universidade de São Paulo, [S. l.], 2004.

CRED. *Disasters in numbers 2021*. Belgium. DOI: 10.1787/eee82e6e-en.

DE CARVALHO, F. M.; CAMPOS, J. C.; MANNARINO, C. F., 2013. *Post-Treatment of Sanitary Sewer Using Wetland*. [S. l.], n. 024, p. 1–8, 2013.

DE ROO, A. P. J., 1998. *Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS*. *Hydrological Processes*, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 905–922, 1998. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199805)12:6<905::AID-HYP662>3.0.CO;2-2.

DEELY, J.; HYNES, S.; BARQUÍN, J.; BURGESS, D.; FINNEY, G.; SILIÓ, A.; ÁLVAREZ-MARTÍNEZ, J. M.; BAILLY, D.; BALLÉ-BÉGANTON, J., 2020. *Barrier identification framework for the implementation of blue and green infrastructures*. *Land Use Policy*, [S. l.], v. 99, n. July, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105108.

DELLEUR, J. W., 2003. *The Evolution of Urban Hydrology: Past, Present, and Future*. *Journal of Hydraulic Engineering*, [S. l.], v. 129, n. 8, p. 563–573, 2003. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:8(563).

DONG, J.; LI, W.; CAO, Y.; FANG, J., 1 de fevereiro de 2016. *How does technology and population progress relate? An empirical study of the last 10,000 years*. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 103, p. 57–70, 2016. DOI: 10.1016/J.TECHFORE.2015.11.011.

DROSOU, N.; SOETANTO, R.; HERMAWAN, F.; CHMUTINA, K.; BOSHER, L.; HATMOKO, J., 2019. *Key Factors Influencing Wider Adoption of. Water*, [S. l.], v. 11, n. 6, p. 1–20, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/6/1234>.

EM-DAT. *Emergency Events Database*. 2022. Disponível em:

<http://www.emdat.be/Database>.

FARAH, I., 2012. *Tramas verde e azul como ferramenta para o desenvolvimento sustentável: o caso de Paris*. Rio de Janeiro: Rio Books/ PROURB, 2012.

FCTH. *Projeto técnico: Jardins de chuva*. [s.d.]. Disponível em: solucoeparacidades.com.br/wp-content/uploads/.../AF_Jardins-de-Chuva-online.pdf.

FIREHOCK, K., 2010. *A Short History of the Term Green Infrastructure and Selected Literature*. [S. l.], n. January, p. 21–26, 2010.

FLETCHER, T. D. et al., 2015. *SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage*. *Urban Water Journal*, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>.

FRANCE. *LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement*. 2009. Disponível em: https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000020949548?init=true&page=1&query=Grenelle+de+l%27environnement+2009&searchField=ALL&tab_selection=all.

GARDNER, J. A., 2017. *Academy of Natural Sciences*. *Academy of Natural Sciences*, [S. l.], v. 160, 2017. DOI: 10.5962/bhl.title.123689.

GOMES, M. V. R., 2022. *INFRAESTRUTURAS VERDES E AZUIS COMO ESTRATÉGIA DE RESILIÊNCIA ÀS CHEIAS E REDESCOBERTA DA PAISAGEM MARGINAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ACARI, RIO DE JANEIRO*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2022.

GROSTEIN, M. D., 2001. *Metrópole E Expansão Urbana: a Persistência De Processos “Insustentáveis”*. *São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, v. 15, n. 1, 2001. DOI: 10.1590/s0102-88392001000100003.

GUIMARÃES, L. F., 2016. *Metodologia para Avaliação da Capacidade de Recuperação em Função de Prejuízos de Sucessivos Eventos de Inundação*. [S. l.], p. 1–23, 2016.

HERZOG, C., 2010. *TEORIA E PRÁTICAS EM CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS NO BRASIL*. [S. l.], p. 1–30, 2010.

HIDROSTUDIO/FCTH, 2014. *Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, [S. l.], 2014.

HOSONO, A., 2019. *6. Economic Transformation for High-Quality Growth: Insights from International Cooperation*. [s.l: s.n.]. DOI: 10.7312/kanb19476-008.

IAU. *La multifonctionnalité des trames verte et bleue en zones urbaines et périurbaines*.

2011. Disponível em: https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_900/La_multifonctionnalite_des_trames_verte_et_bleue_en_zones_urbaines_et_periurbaines.pdf.

IBGE. *Censo Demográfico*. 2010. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 30 jan. 2023.

JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J., 2012. *Cidades e Inundações*. [S. l.], 2012.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L., 1996. *Treatment Wetlands*. 2. ed. [s.l.] : CRC Press, 1996.

KUDDUS, A.; TYNAN, E.; MCBRYDE, E., 2020. *Urbanization : a problem for the rich and the poor ?* [S. l.], p. 1–4, 2020.

LÄHDE, E.; KHADKA, A.; TAHVONEN, O.; KOKKONEN, T., 2019. *Can we really have it all?-Designing multifunctionality with sustainable urban drainage system elements. Sustainability (Switzerland)*, [S. l.], v. 11, n. 7, 2019. DOI: 10.3390/su11071854.

LEOPOLD, L., 1968. *Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. Geological Survey Circular*, [S. l.], v. 554, p. 1–21, 1968. Disponível em: <http://enviro.lclark.edu/resources/Tryon/Water/Hydrology.pdf>.

LOURENÇO, I. B.; VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G.; BRITTO, A. L. N. de P., 2015. *Rios urbanos e paisagens multifuncionais: estudo de caso – Rio Dona Eugênia. Paisagem e Ambiente*, [S. l.], n. 36, p. 91, 2015. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.v0i36p91-115.

MAGNOLI, M., 1982. *Espaços Livres e Urbanização: Uma introdução a aspectos da paisagem metropolitana*. Universidade de São Paulo, [S. l.], 1982.

MENNECKE, B. E.; CROSSLAND, M. D., 1996. *Geographic information systems: Applications and research opportunities for information systems researchers. Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, [S. l.], v. 3, p. 537–546, 1996. DOI: 10.1109/HICSS.1996.493249.

MERLO, M. L., 2022. *CIDADES RESILIENTES AS CHEIAS: A Água Como Eixo Estruturante do Planejamento Territorial - O Caso de Guaratiba/RJ*. UFRJ, [S. l.], 2022.

MIGUEZ, M. G., 2001. *Modelo matemático de células de escoamento para bacias urbanas*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G., 2017. *Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model. Water (Switzerland)*, [S. l.], v. 9, n. 6, 2017. DOI: 10.3390/w9060445.

MIGUEZ, M. G.; DI GREGORIO, L.; VERÓL, A. P., 2018. *Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M., 2012. *URBAN DRAINAGE TRENDS – A PATHWAY TOWARDS MORE SUSTAINABLE SOLUTIONS TENDENCIAS DE DRENAJE URBANO – UN CAMINO HACIA SOLUCIONES MÁS SOSTENIBLES* Marcelo Gomes Miguez* Osvaldo Moura Rezende*. *Aqua-LAC*, [S. l.], v. 4, n. 2, 2012.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P., 2016. *Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MOTA, E.; BASTOS, C. *Pavimento Permeável*. 2013. Disponível em: http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/10/AF_PavPermeavel_web.pdf. Acesso em: 28 mar. 2023.

NCUBE, S.; ARTHUR, S., 2021. *Influence of blue-green and grey infrastructure combinations on natural and human-derived capital in urban drainage planning. Sustainability (Switzerland)*, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1–18, 2021. DOI: 10.3390/su13052571.

OKUMURA, C. K., 2022. *ESTUDO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS NO EDIFÍCIO E NO LOTE, COM VISTAS À GESTÃO HÍDRICA EFICIENTE EM BACIAS URBANAS CONSOLIDADAS: A SUB_BACIA DO RIO TRAPICHEIROS, RIO DE JANEIRO*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2022.

OLIVEIRA, A. K. B. De, 2018. *O SISTEMA DE DRENAGEM COMO EIXO ESTRUTURANTE DO PLANEJAMENTO URBANO: CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ACARI*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEN, R. G., 2010. *Urbanização e mudança social no Brasil*. Rio de Janeiro: SciELO Livros, 2010. DOI: 10.7476/9788579820014.

PAULO, R. F., 2010. *O Desenvolvimento Industrial E O Crescimento Populacional Como Fatores Geradores Do Impacto Ambiental. Veredas do Direito*, [S. l.], p. 17, 2010. Disponível em: <file:///C:/Users/debor/Downloads/180-721-1-PB.pdf>.

REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G., 2018. *Urban Agglomeration and Supporting Capacity: The Role of Open Spaces within Urban Drainage Systems as a Structuring Condition for Urban Growth*. 1. ed. Rio de Janeiro: In tech, 2018.

RODRÍGUEZ, C. A. M.; TEIXEIRA, B. A. do N., 2021. *Avaliação de bacias de retenção de águas pluviais implantadas no município de São Carlos (SP), Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental*, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 143–150, 2021. DOI: 10.1590/s1413-415220190034.

- SANTOS, J. G., 2001. *Áreas Alagadiças (Wetlands) Para O Tratamento De Aquíferos Livres E Rasos Contaminados Por Nutrientes*. [S. l.], 2001.
- SAYERS, P.; YUANYUAN, L.; GALLOWAY, G.; PENNING-ROWSELL, E.; FUXIN, S.; KANG, W.; YIWEI, C.; LE QUESNE, T., 2009. *Flood risk management*. [s.l.] : UNESCO, 2009. DOI: 10.1201/9780203883020.ch114.
- SOLERA, M. L., 2020. *Guia Metodológico para Implantação de Infraestrutura Verde*. [S. l.], p. 79, 2020.
- SOUZA, C. M. de S., 2020. *Alagados flutuantes construídos: design do produto, inovações, eficiência e prestação de serviços ecossistêmicos*. [S. l.], p. 220, 2020.
- SOUZA, M. F. De; MOURA, P. M.; MENEZES, M. V. De; CHEIAS, C. De, 2013. *Custos De Manutenção De Bacias De Detenção Para Controle De Cheias Na Cidade De Belo Horizonte-Mg. Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, [S. l.], p. 1–8, 2013.
- SUSDRAIN. *Component: Rain Garden*. 2021. Disponível em: <https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/infiltration/rain-gardens.html>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- TARDIN, R., 2008. *Espaços Livres: Sistema e Projeto Territorial*. 1. ed. Rio de Janeiro.
- UACD, 2010. *Low Impace Development: A design manual for urban areas*. Fayetteville: UACDC, 2010.
- UNISDR, 2019. *UNISDR - 2018 Annual Report*. [S. l.], p. 1–4, 2019.
- VIMAL, R.; MATHEVET, R.; MICHEL, L., 2012. *Entre expertises et jeux d'acteurs: La trame verte et bleue du Grenelle de l'environnement*. *Natures Sciences Societes*, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 415–424, 2012. DOI: 10.1051/nss/2012043.
- ZIVKOVIC, J.; LALOVIC, K.; MILOJEVIC, M.; NIKEZIC, A., 2019. *Multifunctional public open spaces for sustainable cities: Concept and application*. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 205–219, 2019. DOI: 10.2298/fuace190327012z.

A.1 Apêndice A – Códigos Python desenvolvidos

```
from openpyxl import load_workbook
import json
import datetime
import collections as ct
import more_itertools as mit

wb = load_workbook(filename = PLANILHA COM AS TIPOLOGIAS DE PROJETO)
sheets = ['jardim-canteiro', 'wetland', 'det_veg', 'det_multi', 'bac_ret', 'calha_sec']
alteracoes = {}
alteracoes_sintese = {}

#COMPILA OS VALORES DE ÁREAS E PATAMARES EM FUNÇÃO DAS COTAS PARA
#PERMITIR MODELAGEM SIMULTÂNEA DE TIPOLOGIAS NA MESMA CÉLULA

for sheet in sheets:
    print (sheet)
    current_sheet = wb[sheet]
    if sheet == 'calha_sec':
        for row in current_sheet.iter_rows(2):
            area = row[1].value
            h = '1,2'
            celula_antes = row[2].value
            celula_depois = row[4].value
            if celula_antes != celula_depois:
                if celula_antes not in alteracoes.keys():
                    alteracoes[celula_antes] = {'entra': {}, 'sai': {}}
                if celula_depois not in alteracoes.keys():
                    alteracoes[celula_depois] = {'entra': {}, 'sai': {}}
                if celula_antes not in alteracoes_sintese.keys():
                    alteracoes_sintese[celula_antes] =
{'sai': {sheet: {'area': 0}}, 'entra': {sheet: {'area': 0}}}
                if celula_depois not in alteracoes_sintese.keys():
                    alteracoes_sintese[celula_depois] =
{'sai': {sheet: {'area': 0}}, 'entra': {sheet: {'area': 0}}}
                if celula_antes in alteracoes_sintese.keys() and sheet not
in alteracoes_sintese[celula_antes].keys():
                    alteracoes_sintese[celula_antes]['sai'][sheet] = {'area': 0}
                if celula_depois in alteracoes_sintese.keys() and sheet not
in alteracoes_sintese[celula_depois].keys():
                    alteracoes_sintese[celula_depois]['entra'][sheet] =
{'area': 0}
                alteracoes[celula_antes]['sai']["CS"+str(row[0].row)]
= {'area': area, 'h': h, 'celula': celula_antes, 'tipo': sheet}
                alteracoes_sintese[celula_antes]['sai']
= {sheet: {'area': area+alteracoes_sintese[celula_antes]['sai'][sheet][
'area'], 'h': h}}
```

```

        alteracoes[celula_depois]['entra']["CS"+str(row[0].row)]
    ={'area':area, 'h':h, 'celula':celula_depois, 'tipo': sheet}
        alteracoes_sintese[celula_depois]['entra'] =
    {sheet: {'area':area+alteracoes_sintese[celula_depois]['entra'][shee
t]['area'], 'h':h}}
    else:
        pass
    else:
        for row in current_sheet.iter_rows(2):
            id = row[0].value
            area = row[1].value
            h = row[2].value
            volume = row[3].value
            celula_antes = row[4].value
            celula_depois = row[5].value
            if celula_antes != celula_depois:
                if celula_antes not in alteracoes.keys():
                    alteracoes[celula_antes] = {'entra': {}, 'sai': {}}
                if celula_depois not in alteracoes.keys():
                    alteracoes[celula_depois] = {'entra': {}, 'sai': {}}
                if celula_antes not in alteracoes_sintese.keys():
                    alteracoes_sintese[celula_antes] =
    {'sai': {sheet: {'area':0}}, 'entra': {sheet: {'area':0}}}
                if celula_depois not in alteracoes_sintese.keys():
                    alteracoes_sintese[celula_depois] =
    {'sai': {sheet: {'area':0}}, 'entra': {sheet: {'area':0}}}
                if celula_antes in alteracoes_sintese.keys() and sheet not
in alteracoes_sintese[celula_antes].keys():
                    alteracoes_sintese[celula_antes]['sai'][sheet] = {'area':0}
                if celula_depois in alteracoes_sintese.keys() and sheet not
in alteracoes_sintese[celula_depois].keys():
                    alteracoes_sintese[celula_depois]['entra'][sheet] =
    {'area':0}
                    alteracoes[celula_antes]['sai'][id] = {'area':area, 'h':h,
    'volume':volume, 'celula':celula_antes, 'tipo': sheet}
                    alteracoes_sintese[celula_antes]['sai'] =
    {sheet: {'area':area+alteracoes_sintese[celula_antes]['sai'][sheet][
    'area'], 'h':h}}
                    alteracoes[celula_depois]['entra'][id] = {'area':area, 'h':h,
    'volume':volume, 'celula':celula_depois, 'tipo': sheet}
                    alteracoes_sintese[celula_depois]['entra'] =
    {sheet: {'area':area+alteracoes_sintese[celula_depois]['entra'][shee
t]['area'], 'h':h}}

#SALVA OS ARQUIVOS
with open('output_comparacao.json', 'w') as fp:
    json.dump(alteracoes, fp)
with open('output_sintese_comparacao.json', 'w') as fp:
    json.dump(alteracoes_sintese, fp)

```

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import glob
import os
import json

def rindex(seq, value, start=None, stop=None):
    """L.rindex(value, [start, [stop]]) -> integer -- return last index of
    value.
    Raises ValueError if the value is not present."""
    start, stop, _ = slice(start, stop).indices(len(seq))
    if stop == 0:
        # start = 0
        raise ValueError('{!r} is not in list'.format(value))
    else:
        stop -= 1
        start = None if start == 0 else start - 1
    return stop - seq[stop:start:-1].index(value)

def pd_read_pattern(pattern, cela):
    files = glob.glob(pattern)
    celas = [file[rindex(file, '\\')+len('\\'):file.index(f'_{cela}.txt')]
for file in files]
    df = pd.DataFrame()
    for f in files:
        df = pd.concat([df, pd.read_csv(f, header = None)], axis = 1)
    df.columns = celas
    return df.reset_index(drop=True)

def entrada(row):

    soma = 0
    for element in row:
        soma += element if element < 0 else 0
    return soma

def saida(row):
    soma = 0
    for element in row:
        soma += element if element >= 0 else 0
    return soma

lista_celulas = [LISTAGEM DE CÉLULAS A SEREM ESTUDADAS]

with open('celulas_descarga.txt') as f:
    descarga = json.load(f)

```

```

with open('patamar_max.txt') as f:
    patamar_max = json.load(f)

for cela in lista_celulas:
    script_dir = os.path.dirname(__file__)
    results_dir = os.path.join(script_dir, f'output/finais/')

    if not os.path.isdir(results_dir):
        os.makedirs(results_dir)

        grfq =
pd.read_pattern(CAMINHO_MODELO_MODCEL\\SAIDA\\graficos\\GrfQ\\dados\\*_{c
ela}.txt, cela)

    pos_grfq = pd.DataFrame()
    neg_grfq = pd.DataFrame()

    neg_grfq['Entrada'] = grfq.apply(lambda row: -entrada(row), axis=1)
    pos_grfq['Saida'] = grfq.apply(lambda row: saida(row), axis=1)

    pos_grfq['Saida'] = pos_grfq[list(pos_grfq.columns)].sum(axis=1)
    neg_grfq['Entrada'] = neg_grfq[list(neg_grfq.columns)].sum(axis=1)

        grfz =
pd.read_csv(CAMINHO_MODELO_MODCEL\\SAIDA\\graficos\\GrfZ\\dados\\{cela}.t
xt, header=None, names=[f'Cota - {cela}'])
    grfz['Limite'] = patamar_max[cela]

    cotas_des = pd.DataFrame()

    for des in descarga[cela]:
        grfz_des =
pd.read_csv(CAMINHO_MODELO_MODCEL\\SAIDA\\graficos\\GrfZ\\dados\\{des.sp1
it(" ")[0]}.txt, header=None, names=[f'Cota Descarga - {des}'])
        cotas_des = pd.concat([cotas_des, grfz_des], axis=1)

    grfq.loc[:, :] *= -1

    fig, axes = plt.subplots(nrows=4, ncols=1)

    grfq.plot(ax=axes[0], figsize=(8, 16), sharex= True)
    grfz[f'Cota - {cela}'].plot(ax=axes[2], figsize=(8, 16), sharex= True,
legend = 'Cota (m)')
    grfz['Limite'].plot(ax=axes[2], figsize=(8, 16), sharex= True, style='-
-r', legend = 'Limite')
    pos_grfq['Saida'].plot(ax=axes[1], figsize=(8, 16), sharex= True,
legend = 'Saida')

```

```

neg_grfq['Entrada'].plot(ax=axes[1], figsize=(8, 16), sharex= True,
legend = 'Entrada')
cotas_des.plot(ax=axes[3], figsize=(8, 16), sharex= True)

plt.xlabel('Tempo')
axes[0].set_ylabel('Vazão (Q) - m³/s')
axes[1].set_ylabel('Vazão (Q) - m³/s')
axes[2].set_ylabel('Cota - m')
axes[3].set_ylabel('Cota - m')
plt.savefig(results_dir + f'{cela}.png', bbox_inches = 'tight')
plt.close()

```

```

import re
dict = {}

with open(CAMINHO_MODELO_MODCEL\\ENTRADA\\basedad.dat, 'r') as f:
    for celula in lista_celulas:
        content = f.read()
        res = re.search(f'{celula} \\d \\d \\d *((.|\\n)*?)ghc', content)
        block = res.group()
        cota_max = block.split('\\n')[-2].split(' ')[0]
        f.seek(0)
        dict[celula] = float(cota_max)

lista_ordenada = sorted(dict, key=dict.get)
lista_ordenada.reverse()

with open(CAMINHO_SAIDA, 'w') as f:
    f.write(dict)

```

```

import re

lista_celulas = [LISTAGEM DE CÉLULAS A SEREM ESTUDADAS]

dict = {c:None for c in lista_celulas}

#BUSCA E ESCREVE EM UM ARQUIVO UMA LISTAGEM DE QUAIS CÉLULAS DE RIO RECEBEM
DESCARGA DE CADA CÉLULA DE RESERVATÓRIO

with open(CAMINHO_MODELO_MODCEL\\ENTRADA\\basedad.dat, 'r') as f:
    for celula in lista_celulas:
        print(celula)
        content = f.read()
        res = re.search(f'{celula} \\d \\d \\d *((.|\\n)*?)\\n\\n', content)
        block = res.group()

```

```
descargas = re.findall('\d* F|R)', block)
f.seek(0)
dict[celula] = descargas

with open(CAMINHO_SAIDA, 'w') as f:
    f.write(dict)
```

A.2 Apêndice B – Tabela final com as medidas de otimização

Célula	Otimização
161	Aumento dos diâmetros para 50cm e rebaixamento de 1m
155	Aumento dos diâmetros para 50cm
108	Já otimizado
165	Elevação de 0,8m e remoção de um dos orifícios (subutilizado)
107	Aumento dos diâmetros para 70cm e rebaixamento de 2m
99032	Aumento dos diâmetros para 70cm, rebaixamento de 2m e adição de um orifício intermediário
146	Já otimizado
9301	Aumento dos diâmetros para 60cm e rebaixamento de 1m
167	Aumento dos diâmetros para 60cm e rebaixamento de 1m
133	Aumento dos diâmetros para 70cm e rebaixamento de 2m
143	Aumento dos diâmetros para 50cm
142	Elevação de 0,7m (subutilizado)
136	Já otimizado
135	Elevação de 0,9m (subutilizado)
99035	Aumento dos diâmetros para 70cm e rebaixamento de 1m
98	Aumento dos diâmetros do fundo para 55cm e o do meio para 50cm
97	Aumento dos diâmetros do fundo para 55cm e o do meio para 50cm
20028	Aumento dos diâmetros para 70cm e rebaixamento de 0,5m
183	Aumento dos diâmetros para 55cm(fundo) e 50cm(meio) e rebaixamento de 1m
104	Aumento dos diâmetros para 65cm(fundo) e 60cm(meio) e rebaixamento de 1m
30015	Redução dos diâmetros para 50cm
29006	Aumento dos diâmetros para 55cm(fundo) e 50cm(meio)
29004	Aumento dos diâmetros para 70cm, rebaixamento de 1m
298	Elevação de 1m
229	Já otimizado
224	Já otimizado
210	Aumento dos diâmetros para 60cm e rebaixamento de 1m
197	Já otimizado
99029	Já otimizado
20021	Aumento dos diâmetros para 70cm, rebaixamento de 2m e adição de um orifício intermediário e um no fundo
199	Aumento dos diâmetros para 55cm
66	Já otimizado
99031	Já otimizado
30017	Aumento dos diâmetros para 80cm, rebaixamento de 2,5m e adição de três orifícios em patamares
20019	Aumento dos diâmetros para 80cm, rebaixamento de 2,5m e adição de três orifícios em patamares
20004	Aumento dos diâmetros para 50cm
4501	Aumento dos diâmetros para 60cm

30012	Já otimizado
4401	Elevação de 1,25m
8702	Aumento dos diâmetros para 80cm
99003	Aumento dos diâmetros para 70cm, rebaixamento de 2m e adição de um orifício intermediário e um no fundo
11406	Já otimizado
3802	Elevação de 1m
30026	Aumento dos diâmetros para 70cm, rebaixamento de 2m e adição de um orifício intermediário e um no fundo
3602	Já otimizado
3502	Aumento dos diâmetros para 60cm
3402	Aumento dos diâmetros para 60cm e adição de 1 orifício intermediário e um no fundo
3302	Elevação de 0,5m
3301	Elevação de 0,5m
3201	Aumento dos diâmetros para 70cm e rebaixamento de 1m
11403	Aumento dos diâmetros para 70cm(fundo) e 85cm (meio), adição de um orifício no fundo e rebaixamento de 1m
7902	Elevação de 0,5m
2902	Elevação de 0,9m
11101	Aumento dos diâmetros para 80cm, adição de 1 orifício no fundo e 1 no meio e rebaixamento de 1m
2001	Elevação de 0,6m
1801	Já otimizado
30052	Aumento dos diâmetros para 60cm
1701	Elevação de 0,6m
1402	Já otimizado
1103	Aumento dos diâmetros para 60cm
502	Elevação de 1m
7001	Aumento dos diâmetros para 80cm, adição de um orifício no meio e rebaixamento de 0,5m
802	Elevação de 0,25m
7301	Elevação de 1m