



UNIVERSIDADE
VILA VELHA
ESPIRITO SANTO

BIOFILIA URBANA E SUAS MÉTRICAS

A LÓGICA ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À DRENAGEM NATURAL

IAGO LONGUE MARTINS

VILA VELHA
2022

UNIVERSIDADE VILA VELHA – ES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E CIDADE

BIOFILIA URBANA E SUAS MÉTRICAS:
A lógica algorítmico-paramétrica como ferramenta de suporte à
drenagem natural

IAGO LONGUE MARTINS

VILA VELHA
FEVEREIRO / 2022

UNIVERSIDADE VILA VELHA – ES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E CIDADE

BIOFILIA URBANA E SUAS MÉTRICAS:
A lógica algorítmico-paramétrica como ferramenta de suporte à
drenagem natural

IAGO LONGUE MARTINS

Dissertação apresentada à Universidade Vila Velha, como pré-requisito do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Cidade.

VILA VELHA
FEVEREIRO / 2022

Catálogo na publicação elaborada pela Biblioteca Central / UVV-ES

M379b Martins, Iago Longue.
Biofilia urbana e suas métricas : a lógica algorítmico-paramétrica como ferramenta de suporte à drenagem natural / Iago Longue Martins. – 2022.
188 f. : il.

Orientada: Ana Paula Rabello Lyra.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e cidade)
Universidade de Vila Velha, 2022.
Inclui bibliografias.

1. Arquitetura. 2. Planejamento urbano. 3. Arborização das cidades. I. Lyra, Ana Paula Rabello. III. Universidade Vila Velha. III. Título.

CDD 720

IAGO LONGUE MARTINS

BIOFILIA URBANA E SUAS MÉTRICAS:

**A lógica algorítmico-paramétrica como ferramenta de suporte à
drenagem natural**

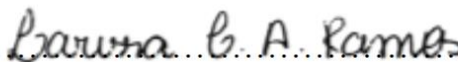
Dissertação apresentada à Universidade Vila Velha, como pré-requisito do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Cidade.

Aprovada em 11 de fevereiro de 2022,

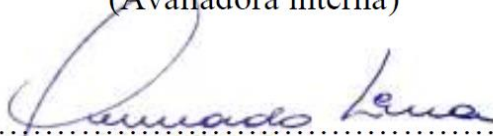
Banca Examinadora:



Prof^ª. Dr^ª. Ana Paula Rabello Lyra
Universidade Vila Velha
(Orientadora)



Prof^ª. Dr^ª. Larissa Letícia Andara Ramos
Universidade Vila Velha
(Avaliadora interna)



Prof. Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima
Universidade Federal de Juiz de Fora
(Avaliador externo)

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado do Espírito Santo (FAPES) pelo suporte recebido através da bolsa PROCAP/ME 2020 sob a vigência do Termo de Compromisso de número 026/2020.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Profa. Dra. Ana Paula Rabello Lyra, por todo o apoio oferecido ao longo desses dois anos de estudos. Obrigado pela confiança, pelas oportunidades a mim concedidas, pela autonomia para que eu explorasse as estradas desta pesquisa de acordo com meus interesses e habilidades, e, também, pelos esclarecimentos quando essas estradas se tornavam confusas demais. É muito mais fácil caminhar sabendo que, ao seu lado, há alguém que acredita nos seus sonhos e que torce para que seus passos sejam certos e você tem sido esta pessoa para mim. Muito obrigado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES, pelo suporte financeiro à realização desta pesquisa através da bolsa PROCAP/ME 2020. Mal sabíamos no começo dessa jornada que enfrentaríamos uma pandemia e, com ela, tantos problemas, de modo que a bolsa foi um elemento fundamental para que a jornada acadêmica pudesse resistir em meio ao caos.

Ao grupo de pesquisa Dignidade Urbana, em especial ao Prof. Dr. Carlos Kuster Pinheiro e a todos os colegas, pelas trocas, discussões e aprendizados em torno da área de estudos selecionada para as aplicações práticas desta dissertação. Não obstante, obrigado por facilitarem o desenrolar da minha pesquisa através do suporte com a aplicação do SIG para as análises espaciais necessárias.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade – PPGAC, por todo o conteúdo compartilhado nas aulas, pelas inspirações, pela contribuição no desenvolvimento de novas habilidades e pela ajuda na construção desta pesquisa em seus estágios iniciais. Agradeço, também, aos colegas do mestrado, especialmente, à Mariana e à Rubiene, pelo companheirismo e por tornar essa caminhada mais leve e engraçada, mesmo nos momentos de distanciamento social.

À banca avaliadora, nas pessoas da Profa. Larissa Letícia Andara Ramos e do Prof. Fernando Tadeu de Araújo Lima, pelo auxílio na construção e na execução desta pesquisa, cortando os excessos e indicando as faltas. O resultado apresentado nas páginas desta dissertação também é mérito de suas mãos e de suas jornadas.

Aos amigos, por todo o suporte fora do ambiente acadêmico, pela confiança nos meus passos e por limparem as nuvens de preocupação no céu da minha cabeça ao longo desses dois anos. Um agradecimento especial à Laís, à Lillian, ao Gustavo, à Mariana, ao Lucas e ao Mateus por se fazerem tão presentes, cada um a seu jeito.

À minha família, por sempre tornarem possível os meus sonhos, mesmo à distância. Agradeço por todo o apoio, principalmente nesses últimos anos, tão conturbados e com tantas perdas. Apesar desse contexto cinzento, sou grato por me mostrarem a resiliência do amor. Logo mais, o sol vai brilhar de novo.

A mim, no passado, por ter me disposto a vivenciar coisas que, hoje, vejo como fundamentais para que eu pudesse realizar o que estou a realizar e colher o que estou a colher.

A Deus, pela sua misteriosa dança no universo, que me empurra ao encontro de lugares, pessoas e ideias que eu sequer imaginaria possíveis.

RESUMO

MARTINS, Iago Longue, M.Sc., Universidade Vila Velha – ES, fevereiro de 2022.
Biofilia Urbana e suas Métricas: A lógica algorítmico-paramétrica como ferramenta de suporte à drenagem natural. Orientadora: Ana Paula Rabello Lyra.

Diante do aumento da concentração populacional em meio urbano, a tendência é que as cidades se tornem mais densas e complexas. Assim, devido à crescente vulnerabilidade dos espaços urbanos em decorrência das rupturas na interface cidade-natureza, aspectos como a qualidade ambiental e a resiliência urbana frente a eventos climáticos extremos ganham destaque no escopo de discussões sobre o ambiente construído. Dentre essas rupturas, destaca-se para análise a problemática na drenagem urbana. Ao tomar a biofilia urbana como subsídio conceitual para a mitigação de tal problemática e as ferramentas algorítmico-paramétricas como instrumento de planejamento e projeto, define-se que o objetivo da presente proposta, então, é o de analisar as possibilidades de aplicação de uma ferramenta algorítmico-paramétrica como suporte a projetos de intervenção urbana que utilizem áreas verdes, especialmente a arborização, como estratégia para redução da ocorrência de alagamentos. A metodologia delimitada para este trabalho abrange um híbrido de técnicas bibliográficas e experimentais. Com isso, a metodologia se subdivide em três recortes: (1) temático, (2) analítico e (3) prático, envolvendo, respectivamente, revisão de literatura no recorte temático; análise e sistematização de dados para o recorte analítico; e construção de uma ferramenta algorítmico-paramétrica para simulações projetuais no recorte prático. A delimitação espacial empregada está contida na sub-bacia do canal da Costa, no município de Vila Velha – ES: uma área sensível no município do ponto de vista de vulnerabilidade a alagamentos. Os resultados demonstram que a arborização urbana é uma importante estratégia complementar para ampliar a qualidade das intervenções visando mitigar a ocorrência de alagamentos. Ademais, a própria ferramenta algorítmico-paramétrica se mostrou bastante útil para a otimização do trabalho de concepção e análise das propostas de intervenção urbana, possibilitando uma curadoria mais aprofundada acerca de seus impactos para as dinâmicas hidrológicas urbanas.

PALAVRAS-CHAVE: Análise paramétrica. Urbanismo biofílico. Planejamento urbano. Drenagem urbana. Arborização urbana.

ABSTRACT

MARTINS, Iago Longue, M.Sc., Universidade Vila Velha – ES. February, 2022. **Urban Biophilia and its Metrics: The algorithmic-parametric logic as a tool to support natural drainage.** Supervisor: Ana Paula Rabello Lyra.

With the increasing concentration of population in urban areas, the tendency expected is the cities to become denser and more complex. Thus, due to the growing vulnerability of urban spaces as a result of the ruptures in the city-nature interface, aspects such as environmental quality and urban resilience in the face of extreme weather conditions are highlighted in the scope of discussions on the built environment. Among these ruptures, the problem of urban drainage stands out for analysis. By taking urban biophilia as a conceptual basis for the mitigation of this problem and the algorithmic-parametric tools as a planning and design strategies, it is defined that the objective of this proposal is to analyze the possibilities of applying an algorithmic-parametric tools to support urban intervention projects that use green areas, especially afforestation, as a strategy to reduce the occurrence of flooding. The methodology outlined for this work encompasses a hybrid of bibliographic and experimental techniques. It is divided into three sections: (1) thematic, (2) analytical and (3) practical, involving, respectively, a literature review in the thematic section; analysis and systematization of data for the analytical approach; and construction of an algorithmic-parametric tool for design simulations in practical approach. The spatial delimitation used is contained in the sub-basin of the Canal da Costa, in the municipality of Vila Velha – ES: a sensitive area in the municipality from the perspective of vulnerability to flooding. The results demonstrate that urban forestry is an important complementary strategy to increase the quality of interventions aimed at mitigating the occurrence of flooding. Furthermore, the algorithmic-parametric tool itself proved to be quite useful for optimizing the work of designing and analyzing urban intervention proposals, allowing for a more in-depth curation of their impacts on urban hydrological dynamics.

KEYWORDS: Parametric analysis. Biophilic urbanism. Urban planning. Urban drainage. Urban forestry.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01	Delineamento geral da metodologia	37
FIGURA 02	Esquema de ciclo hidrológico no meio natural	59
FIGURA 03	Esquema de ciclo hidrológico no meio urbano	61
FIGURA 04	Circuito de estratégias biofílicas para o verde urbano	72
FIGURA 05	Circuito de estratégias biofílicas para o reequilíbrio hidrológico	73
FIGURA 06	Esquema de seção estrutural com a indicação de pontos e suas respectivas coordenadas de alturas e distâncias acumuladas	79
FIGURA 07	Esquema de soluções formais desenvolvidas por Moretti para uma proposta de estádio	81
FIGURA 08	Circuitos dos projetos tradicional e paramétrico	86
FIGURA 09	Dinâmica de retenção pluvial pela arborização	92
FIGURA 10	Processo de criação da nova equação para o cálculo do escoamento superficial considerando a influência da arborização	93
FIGURA 11	Processo de validação da equação proposta	94
FIGURA 12	Etapas de cálculo do escoamento superficial	95
FIGURA 13	Regras para definição das faixas de avaliação do escoamento superficial a partir da métrica delineada	103
FIGURA 14	Estruturação geral da ferramenta	107
FIGURA 15	Esquema de produção do mapa de pixel	108
FIGURA 16	Combinação de algoritmos na ferramenta	109
FIGURA 17	Divisão da equação proposta em grupos de variáveis afins	112
FIGURA 18	Organização dos grupos de algoritmos da ferramenta algorítmico-paramétrica	112
FIGURA 19	Sequência de algoritmos para coleta dos dados de área total	114
FIGURA 20	Sequência de algoritmos para coleta de áreas de materiais	115

FIGURA 21	Sequência de algoritmos para coleta da área de grama	117
FIGURA 22	Sequência de algoritmos para coleta da área de solo exposto	118
FIGURA 23	Algoritmo <i>C_médio</i>	118
FIGURA 24	Algoritmo <i>Im</i>	119
FIGURA 25	Sequência de algoritmos para coleta de dados de área arborizada e para o cálculo da área fora da abrangência das copas das árvores	120
FIGURA 26	Algoritmo <i>R_arb1</i>	121
FIGURA 27	Algoritmo <i>Rt</i>	122
FIGURA 28	Algoritmo <i>Qmax</i>	123
FIGURA 29	Algoritmo <i>Qmax1</i>	123
FIGURA 30	Algoritmo <i>Qmax5</i>	124
FIGURA 31	Algoritmo <i>Métricas</i>	125
FIGURA 32	Localização da sub-bacia do Canal da Costa no sistema hidrográfico do Rio Jucu	128
FIGURA 33	Antigo curso do Rio da Costa e sua conexão ao Rio Jucu	128
FIGURA 34	Transbordamento do Rio da Costa em 1960	129
FIGURA 35	O sistema de canais pós-intervenções urbanas	131
FIGURA 36	Diferentes aspectos de seções do Canal da Costa	131
FIGURA 37	Os bairros abrangidos pela sub-bacia do Canal da Costa	132
FIGURA 38	Morfologia dos bairros Soteco e Divino Espírito Santo	133
FIGURA 39	Incidência de alagamentos na região analisada	134
FIGURA 40	Incidência de alagamentos sobre as microbacias do Canal da Costa	135
FIGURA 41	Mapeamento de fatores agravantes para a formação de alagamentos nos bairros Soteco e Divino Espírito Santo, em Vila Vellha – ES	137
FIGURA 42	Delimitação do Recorte A	138
FIGURA 43	Delimitação do Recorte B	139
FIGURA 44	Resultado da primeira intervenção sobre o recorte urbano A	149

FIGURA 45	Resultado da segunda intervenção sobre o recorte urbano A	151
FIGURA 46	Resultado da terceira intervenção sobre o recorte urbano A	153
FIGURA 47	Resultado da quarta intervenção sobre o recorte urbano A	154
FIGURA 48	Resultado da quinta intervenção sobre o recorte urbano A	155
FIGURA 49	Resultado da sexta intervenção sobre o recorte urbano A	156
FIGURA 50	Resultado da sétima intervenção sobre o recorte urbano A	157
FIGURA 51	Exemplo de pergunta contida no questionário de avaliação da experiência do usuário	160
FIGURA 52	Modelagem digital do recorte urbano selecionado	161
FIGURA 53	Gráficos da avaliação da ferramenta <i>Parametree</i> pelos usuários	164

LISTA DE TABELAS

TABELA 01	Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial (C)	62
TABELA 02	Taxa de retenção pluvial por espécie e intensidade de chuva	66
TABELA 03	Panorama multiescalar das estratégias relacionadas à biofilia urbana	71
TABELA 04	Padrão de redução da taxa de retenção pluvial pela saturação da copa	96
TABELA 05	Agrupamento de espécies por faixas similares de retenção pluvial	97
TABELA 06	Agrupamento de espécies por características físicas	97
TABELA 07	Retenção pluvial segundo agrupamento por características físicas	99
TABELA 08	Retenção pluvial de retenção pluvial segundo intensidades de precipitação	100
TABELA 09	Programação do algoritmo <i>C_asfalto</i>	115
TABELA 10	Programação do algoritmo <i>C_grama</i>	117
TABELA 11	Programação do algoritmo <i>C_soloexposto</i>	118
TABELA 12	Programação do algoritmo <i>C_médio</i>	118
TABELA 13	Programação do algoritmo <i>Im</i>	119
TABELA 14	Programação do algoritmo <i>Ax</i>	120
TABELA 15	Programação do algoritmo <i>R_arb1</i>	121
TABELA 16	Programação do algoritmo <i>Rt</i>	122
TABELA 17	Programação do algoritmo <i>Qmax</i>	123
TABELA 18	Programação do algoritmo <i>Qmax1</i>	124
TABELA 19	Programação do algoritmo <i>Qmax5</i>	124
TABELA 20	Programação do algoritmo <i>Métricas</i>	125
TABELA 21	Tempo de concentração para as microbacias destacadas	136
TABELA 22	Diagnóstico para as condições atuais dos recortes urbanos A e B	144
TABELA 23	Caracterização da cobertura do solo do recorte A	145

TABELA 24	Contribuição da arborização existente para a redução do escoamento superficial no recorte A	146
TABELA 25	Caracterização da cobertura do solo do recorte B	146
TABELA 26	Contribuição da arborização existente para a redução do escoamento superficial no recorte B	147
TABELA 27	Estratégias biofílicas aplicáveis ao recorte A	148
TABELA 28	Caracterização do recorte A após a primeira proposta de intervenção	150
TABELA 29	Contribuição da primeira proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial	151
TABELA 30	Contribuição da segunda proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial	152
TABELA 31	Contribuição da terceira proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial	153
TABELA 32	Contribuição da quarta proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial	154
TABELA 33	Contribuição da quinta proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial	155
TABELA 34	Contribuição da sexta proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial	156
TABELA 35	Contribuição da sétima proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial	157

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização do Tema	20
1.2	Identificação da Lacuna de Pesquisa	25
1.3	Problema de Pesquisa	27
1.4	Recorte Espacial	27
1.5	Objetivos	27
1.6	Justificativa	28
1.7	Metodologia	32
1.7.1	<i>Recorte Temático</i>	33
1.7.2	<i>Recorte Analítico</i>	34
1.7.3	<i>Recorte Prático</i>	36
1.8	A Estrutura da Dissertação	37
2	A CIDADE NO ANTROPOCENO	40
2.1	O Antropoceno e os Processos Urbanizantes	42
2.2	Uma Arena de Rupturas	51
3	A BIOFILIA URBANA	58
3.1	A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas	59
3.2	O Verde Urbano e os Recursos Hídricos	64
3.3	As Estratégias Biofílicas	68
4	A ABORDAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA	76
4.1	Tecnologias Algorítmico-Paramétricas Aplicadas ao Projeto	76
4.2	Interseções e Contribuições para a Pesquisa	84
5	A SÍNTESE	92
5.1	Adaptação do Método Racional	92
5.2	Modelagem da Interceptação Pluvial	95
5.3	Delineamento de Métricas	101
6	A FERRAMENTA	106
6.1	Estudo de Precedente	106

6.2	Construção dos Algoritmos	111
7	O LOCAL.....	127
7.1	Panorama Histórico da Formação do Território	127
7.2	Áreas Vulneráveis a Alagamentos.....	134
7.3	Definição dos Recortes de Intervenção	137
8	A APLICAÇÃO	142
8.1	Simulações	142
8.1.1	<i>Cenário Atual</i>	144
8.1.2	<i>Cenários Hipotéticos</i>	148
8.2	Teste de Usabilidade.....	158
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	166
	REFERÊNCIAS.....	172
	APÊNDICE A.....	186

Essa rua sem céu, sem horizontes
Foi um rio de águas cristalinas
Serra verde molhada de neblina
O olho d'água sangrava numa fonte

Alceu Valença – Espelho Cristalino



1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Tema

De acordo com a projeção do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais da Organização das Nações Unidas, existe uma tendência mundial de intensificação do fenômeno da urbanização. No caso específico do Brasil, a projeção assinala que, no ano de 2050, o país terá alcançado a marca de 92% da população vivendo em áreas urbanas, de modo que será o mais urbanizado no continente latino-americano (ONU, 2018).

Guedes et al. (2020) evidenciam que, diante do cenário de crescimento acelerado das cidades, observa-se um aumento da demanda por soluções que permitam abordagens mais apropriadas aos desafios que despontam no ambiente urbano em decorrência da ampliação de sua densidade e complexidade. Nesse sentido, a investigação de alternativas para a melhoria da qualidade ambiental das cidades é crucial para a oferta de espaços urbanos melhor qualificados ao contingente populacional que irá se concentrar nesse meio.

Outro fator que se relaciona a esse contexto é a crescente necessidade por cidades resilientes às mudanças climáticas, pois os desdobramentos no âmbito climático das excessivas intervenções antrópicas sobre o ambiente natural são cada vez mais sensíveis. As cidades despontam como um ambiente vulnerável às transformações climáticas dado o descolamento estabelecido entre os sistemas urbanos e os naturais (KRENAK, 2019), o qual é característico do chamado período Antropoceno. Segundo Artaxo (2014), a Revolução Industrial, iniciada na segunda metade do século XVIII, inaugurou um novo processo de transformações geológicas em razão do aumento populacional, bem como do uso desmedido de recursos naturais para sustentar um modelo econômico pautado em um ideal fictício de crescimento infinito (CAVALCANTI, 2012). Com isso, ao referido período caracterizado pelo aumento das implicações do desenvolvimento exponencial das atividades humanas e seus reflexos nos ecossistemas mundiais, Crutzen e Stoermer (2000) convencionaram chamar de Antropoceno.

Nesse processo, o ambiente urbano é marcado por um conjunto de rupturas na interface cidade-ambiente natural, resultantes da espacialização de um

tecido construído desassociado da base biogeofísica¹ com a qual interage (DA-SILVA-ROSA et al., 2018) ou, no caso, deveria se permitir interagir. Ferrão (2017) considera a problemática como um descompasso entre os sistemas humanos, ou sociotécnicos, e os sistemas biofísicos, expressando-se nas cidades através de problemas ambientais diversos.

Assim, para que seja possível a consolidação de cidades resilientes, é exigido que a abordagem urbana desassociada em relação aos sistemas naturais seja transformada. De acordo com Saccaro Junior e Coelho Filho (2016) a degradação dos ecossistemas que rodeiam as cidades é uma das principais causas da falta de resiliência urbana, pois são esses ecossistemas que realizam a regulação do microclima que abrange o contexto urbano. Nessa perspectiva, os autores ressaltam que as cidades, para serem resilientes, devem considerar a dinâmica de interdependência entre os sistemas naturais e os sistemas construídos, compondo uma verdadeira rede na qual cada elemento interage mutuamente e é afetado na mesma medida.

Através dessa discussão, dois pontos tornam-se evidentes: o primeiro é que, em um cenário de intensificação da urbanização, se a tendência de crescimento urbano horizontal for mantida aos moldes do que ocorre na atualidade, a dinâmica de perpetuação de rupturas na interface meio construído e meio natural comentada por Ferrão (2017) se mantém, sobretudo no que tange à degradação dos ecossistemas rurais, pois a cidade avançaria por sobre esses ecossistemas, substituindo-os por áreas construídas. Dessa forma, o objetivo de tornar as cidades um ambiente resiliente às mudanças climáticas encontra-se dificultado, como já foi apresentado por Saccaro Junior e Coelho Filho (2016).

O segundo é que se a tendência de urbanização seguir o movimento oposto do descrito anteriormente e priorizar o adensamento do espaço construído, é a questão da qualidade do ambiente urbano que ganha uma nova dimensão no rol de assuntos que permeiam a problemática. Em um ambiente excessivamente artificial, devido, em sua maior parte, a processos como a impermeabilização do solo e à priorização do veículo individual motorizado como principal modal, juntamente com a implementação de infraestruturas para este tipo de mobilidade, obtêm-se uma

¹ A base biogeofísica pode ser compreendida como o conjunto dos sistemas biológicos, geológicos e atmosféricos que caracterizam determinado local.

qualidade ambiental de baixo nível, refletida em problemas como desconforto térmico e alagamentos (GOMES; SOARES, 2004; NUCCI, 1998).

Em virtude da excessiva artificialização do espaço, observa-se também a criação de uma interface bem definida entre os contextos urbano e rural, que evidencia a desarticulação comentada por Ferrão (2017), uma vez que os ecossistemas que se encontram no meio rural são impedidos de se integrarem com aqueles, mesmo que poucos e menos complexos, que existem dentro do tecido urbano. Sobre esse assunto, Hardoy (1993) revela que o meio urbano, quando não equilibrado, acaba por interferir negativamente sobre os ecossistemas rurais através da poluição de corpos hídricos, da atmosfera e do solo em decorrência dos mais variados tipos de resíduos produzidos pelas atividades antrópicas.

Diante desses pontos levantados, surge um questionamento a respeito das possibilidades de requalificação do espaço construído visando uma maior integração com os ecossistemas naturais, ao passo que a cidade também se adensa: há algum conceito que dialoga diretamente com essas variáveis?

Dentre os diversos estudos que contemplam a tônica da melhoria da qualidade ambiental das cidades e da redução das rupturas na interface ambiente construído e ambiente natural, destaca-se a teoria biofílica. De acordo com Beatley (2011), uma cidade biofílica aprende com a natureza, reproduzindo os processos naturais e incorporando-os a seus edifícios e paisagens urbanas. Em suma, promove-se uma mudança no paradigma que rege a produção do espaço urbano: constrói-se com a natureza e não para vencê-la.

Zari (2016) ressalta que esse tipo de solução baseada em processos naturais busca imitar organismos, comportamentos orgânicos ou aspectos ecossistêmicos em termos de forma, materiais, constituição, processos ou funções, auxiliando na redução do impacto do meio urbano sobre o meio natural. Zari e Hecht (2020) apontam ainda para a integração de conhecimento ecológico e biológico na arquitetura e no desenho urbano, que apresenta o potencial de alterar a relação criada entre o meio construído e os ecossistemas, de modo que edifícios e, até mesmo, cidades se transformem em agentes colaboradores para com os ecossistemas e os sistemas sociais.

Beatley (2016) levanta uma série de possibilidades para promover a integração do espaço construído com o meio natural, entre elas, a dispersão de áreas verdes pelo tecido urbano seja pela reintrodução da vegetação ciliar junto aos corpos

hídricos, seja pela criação de florestas urbanas, ou ainda pela inserção de corredores ecológicos para reconectar a cidade e o meio rural. A implantação dessas infraestruturas verdes contribui para o reequilíbrio dos sistemas natural e construído, bem como em um melhor aproveitamento do ciclo hidrológico urbano.

Ao considerar tais infraestruturas ecológicas, o planejamento urbano passa a se relacionar diretamente com uma nova gama de variáveis, o que amplia a complexidade do cenário abrangido pelo projeto, sendo, pois, válida a implementação de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões com base em dados reais. Nesse contexto, Lima, Costa e Rosa (2020) confirmam que as ferramentas computacionais apresentam um grande potencial em contribuir na busca por soluções para problemas urbanos, uma vez que permitem um controle mais dinâmico das partes que compõem o sistema complexo que são as cidades.

Lima, Costa e Rosa (2020) ainda abordam que uma das tipologias de ferramentas computacionais que se inserem nesse escopo de possibilidades acima mencionado são as ferramentas algorítmico-paramétricas, as quais se utilizam de uma metodologia que combina questões relativas à programação com recursos computacionais de visualização em atividades criativas. Tal metodologia se vale da decomposição de uma determinada problemática em um conjunto de etapas simples e da definição de parâmetros para a elaboração digital de um modelo que se relacione com o problema observado na realidade e que se adapte a possíveis transformações em seus referidos parâmetros.

Celani (2011) classifica tal abordagem como generativa e assinala que essa metodologia não se volta à resolução de um problema particular em um contexto específico, mas, sim, em identificar componentes de uma questão que possibilitem oferecer soluções para problemas semelhantes em contextos diferentes. Assim, com o desenvolvimento de uma metodologia projetual algorítmico-paramétrica, é possível oferecer uma variedade de potenciais respostas para problemas semelhantes, alterando-se apenas o valor dado a cada um dos parâmetros envolvidos na situação, segundo as especificidades do contexto.

Diante desses aspectos, a presente dissertação se ocupa em discutir e demonstrar a aplicabilidade das ferramentas algorítmico-paramétricas como suporte ao desenvolvimento de análises e propostas para intervenção no ambiente construído a partir de uma perspectiva biofílica, buscando reconciliar os sistemas construído e natural. Como consequência, busca-se atuar na melhoria da qualidade ambiental das

idades através da sutilização do meio construído mediante maior sintonia com a natureza, seja pela reprodução de seus processos ou pela continuidade morfológica entre os tecidos construído e verde.

De acordo com os estudos de Croce (2020) e Gorski (2008), percebe-se que uma das rupturas mais expressivas no âmbito da interface cidade e natureza é a deterioração ambiental e paisagística dos rios envolvidos pelo tecido urbano. Ambos os autores expõem que tais impactos sofridos pelos cursos d'água são provenientes da implantação de intervenções de cunho sanitarista e rodoviarista, mais intensamente a partir do início do século XX. Desse modo, os rios foram desnaturalizados e abordados a partir de um viés funcionalista como elemento de drenagem e carreamento de resíduos gerados em contexto urbano, o que denuncia uma utilização desumanizada dos saberes científico-tecnológicos a serviço de outras pautas, como a econômica/capitalista, o que tem sido comumente verificado no Antropoceno.

Diante desse aspecto, defende-se a estratégia apontada por Croce (2020) de encarar as orlas fluviais urbanas como componentes dos espaços públicos, requalificando tais ambientes, de forma que os rios passem a ser elementos fundamentais para se repensar a relação estabelecida entre a natureza e a cidade, transformando as cidades em ambientes mais resilientes às intempéries. Como os rios são elementos que, de modo geral, atravessam o tecido construído, eles se configuram, também, como importantes estruturadores para a permeabilidade dos ecossistemas naturais por entre o ambiente urbano (BEATLEY, 2016), mitigando, assim, a intensa segregação morfológica existente nessa interface.

Nesse sentido, após a exposição de conceitos e fatores importantes para a contextualização da problemática, define-se que a proposta apresentada por esta dissertação contempla a análise, por meio de um dispositivo algorítmico-paramétrico aplicado ao projeto, da contribuição da arborização para os processos hidrológicos em meio urbano. A arborização foi tomada como um recorte representativo das áreas verdes e das estratégias biofílicas comentadas anteriormente por ser um elemento versátil, de fácil implantação em um ambiente urbano consolidado e, também, por reproduzir em escala reduzida o efeito de interceptação pluvial característico das infraestruturas verdes (ALVES, 2015).

1.2 Identificação da Lacuna de Pesquisa

Após a definição da temática a ser pesquisada, o foco foi direcionado à identificação da lacuna de pesquisa existente para a interseção dos campos das áreas verdes e da arborização urbana, dos processos drenantes e das ferramentas algorítmico-paramétricas aplicadas ao urbanismo. Utilizando-se do Catálogo de Tese e Dissertações da CAPES e da ferramenta de buscas Google Acadêmico, foram identificadas e selecionadas dissertações de mestrado, teses de doutorado, como, também, artigos científicos, tanto do Brasil quanto do exterior, na janela temporal contida entre os anos de 2010 e 2020, que apresentavam relação com o escopo delimitado para o presente trabalho. Para estas buscas foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “áreas verdes”, “arborização urbana”, “drenagem”, “paramétrico”, “*greenery*”, “*urban forestry*”, “*drainage systems*” e “*parametric*”.

No Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, não foram encontrados trabalhos que articulassem todos os três conceitos predefinidos. O único trabalho aderente foi o de Ribeiro (2018) voltado para o desenvolvimento de uma ferramenta algorítmico-paramétrica para identificar e avaliar o coeficiente de escoamento superficial de águas pluviais em cenários de implantação de estratégias de drenagem urbana relacionadas ao *low impact development*. Os territórios contemplados envolvem sub-bacias hidrográficas contidas em áreas de expansão da cidade de Juiz de Fora, no Estado de Minas Gerais.

A ferramenta desenvolvida pelo autor se mostra bastante relevante, uma vez que o coeficiente de escoamento superficial de águas pluviais e seu impacto na vazão de corpos hídricos são fatores que, quando em desequilíbrio, refletem em problemas como inundações, que acometem grande parte das cidades que se desenvolveram a partir de um comportamento excludente para com os rios (GORSKI, 2008). Por esse motivo, a ferramenta de Ribeiro (2018) foi selecionada como ponto de partida para o estudo e desenvolvimento da ferramenta algorítmico-paramétrica proposta nesta dissertação, contemplando a influência da arborização nas dinâmicas hidrológicas urbanas. Uma análise mais aprofundada de suas aplicabilidades e limitações será realizada no tópico **6.1 Estudo de Precedente**.

Já no Google Acadêmico, foram encontrados quatro trabalhos pertinentes para a temática delimitada para esta dissertação. Entretanto, nenhum deles combinava simultaneamente os conceitos de áreas verdes, drenagem urbana e parametria, o que evidencia uma lacuna de pesquisa para este nicho. Assim, partindo

de um panorama internacional, Berčič e Ažman-Momirski (2020) desenvolveram uma ferramenta para auxiliar no projeto de plantações agrícolas, em áreas rurais, a partir da técnica do terraceamento, permitindo uma modelagem adequada para cada tipo de solo, de cultura e de condições climáticas.

Já Chokhachian e Hiller (2020) elaboraram uma ferramenta denominada PANDO para simulação da relação existente entre condições atmosféricas, arborização e tipo de solo, de modo que seja possível avaliar a influência das copas das árvores na redução da incidência de radiação solar sobre a superfície do solo.

No Brasil, Moura et al. (2018) aplicaram a metodologia algorítmico-paramétrica para a construção de uma ferramenta de modelagem de infraestruturas verdes para rios urbanos a partir de análises topográficas e dos coeficientes de escoamento superficial. A ferramenta possibilita o resgate dos meandros em rios canalizados, de modo que estes consigam retornar a uma configuração espacial mais próxima do natural.

Por fim, Neves (2020) utilizou-se da abordagem algorítmico-paramétrica para desenvolver uma ferramenta de suporte à avaliação dos índices de áreas verdes urbanas a partir de uma análise comparativa entre densidade construída e densidade de espaços vegetados, buscando coeficientes ideais para a harmonização de ambas as densidades. Por se tratar de uma ferramenta para aplicação em tecidos urbanos já consolidados, a proposta contribui para estudos que visem a melhoria da qualidade ambiental das cidades, como é pretendido pela presente dissertação.

Após o levantamento de dissertações, teses e artigos que se vinculam com a delimitação temática para esta pesquisa, observa-se que há uma lacuna temática para pesquisas que investiguem de maneira quantitativa a contribuição da arborização para a drenagem urbana. Outro ponto evidenciado por este levantamento é o fato de que a aplicação do pensamento algorítmico-paramétrico em análises ambientais tem sido uma postura bastante recente, uma vez que na janela temporal delimitada entre os anos de 2010 e 2020, os trabalhos que contemplam o recorte temático mencionado foram publicados entre 2018 e 2020, apontando para uma possível tendência de pesquisa. Por fim, explicita-se o destaque dado ao trabalho de Ribeiro (2018) pela abordagem de uma ferramenta de cálculo de escoamento superficial em meio urbano, que servirá como base para as análises empreendidas por esta pesquisa, observando seus potenciais e possíveis lacunas para o desenvolvimento de uma ferramenta complementar.

1.3 Problema de Pesquisa

Após a identificação da lacuna de pesquisa, delimitou-se que a questão-problema que norteará as investigações a serem realizadas é:

Como as ferramentas algorítmico-paramétricas podem auxiliar na avaliação dos efeitos da arborização urbana para o reequilíbrio dos processos hidrológicos nas cidades?

1.4 Recorte Espacial

Conforme comentado na contextualização do tema, a lógica algorítmico-paramétrica depende da delimitação de parâmetros para que soluções sejam geradas, ou seja, o processo propositivo é resultante da estruturação dos elementos que compõem determinado problema. Logo, é importante definir um recorte espacial que forneça subsídio para a coleta de parâmetros para a resolução do problema de pesquisa identificado.

Assim, o recorte espacial previsto está inserido na área da sub-bacia do canal da Costa, no município de Vila Velha, no Estado do Espírito Santo. Tal sub-bacia se localiza em área urbana consolidada e se caracteriza por ser um típico exemplo dos desdobramentos negativos da urbanização sobre os corpos hídricos, como a poluição e a canalização do curso natural, transformando esses elementos em uma ruptura urbana geradora de problemas ambientais diversos, entre eles, inundações (DA-SILVA-ROSA et al., 2018).

Apesar do recorte específico, a pesquisa possui aplicabilidade em outros contextos urbanos que sofrem com a mesma problemática, respeitando-se a variação na quantificação dos parâmetros selecionados para a questão-problema, assim como relatado por Celani (2011). Com isso, a partir de um exemplo local, a presente dissertação pretende exemplificar soluções que podem ser avaliadas para execução em cenários semelhantes.

1.5 Objetivos

O objetivo geral da proposta é verificar a aplicabilidade de uma ferramenta algorítmico-paramétrica na avaliação de cenários que utilizem a arborização urbana como estratégia para reequilibrar os processos hidrológicos no meio ambiente construído. Para se alcançar tal objetivo geral, como etapas necessárias e complementares, também se delinearão os seguintes objetivos específicos:

- a) Investigar os processos envolvidos no fenômeno da urbanização contemporânea com enfoque na desarticulação da interface cidade-natureza, evidenciando a deterioração das dinâmicas hidrológicas no tecido urbano;
- b) Conhecer as estratégias abrangidas pelo conceito de biofilia para um desenho urbano sensível à água, conjugando soluções para a expansão de áreas verdes na cidade;
- c) Explorar a abordagem algorítmico-paramétrica como alternativa para um planejamento urbano mais responsivo para com questões sensíveis de ordem ambiental;
- d) Definir as estratégias de cálculo para avaliação da influência da arborização na drenagem urbana, a partir de análises dos métodos de cálculos mais aplicados no contexto da hidrologia urbana e da ferramenta algorítmico-paramétrica desenvolvida por Ribeiro (2018);
- e) Desenvolver uma ferramenta algorítmico-paramétrica de suporte à avaliação da influência da arborização urbana nas dinâmicas hidrológicas de uma sub-bacia;
- f) Levantar dados ambientais da área estudada referentes ao histórico de alagamentos e aos tipos de cobertura do solo para subsidiar os estudos hidrológicos a serem desenvolvidos;
- g) Aplicar a ferramenta em simulações projetuais como forma de compreender os desdobramentos da usabilidade da técnica na conjuntura predefinida.

1.6 Justificativa

A relevância do desenvolvimento da presente pesquisa se justifica, inicialmente, pela concordância com um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável traçados pela Organização das Nações Unidas para transformar a relação indivíduo-sociedade-meio ambiente até o ano de 2030. O objetivo contemplado pela temática apresenta-se no documento com o número 11, o qual atesta como sendo necessário “tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis” (ONU, 2015).

O tópico 11.3, mais especificamente, aborda que um dos enfoques desse objetivo é “aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis, em todos os países”, e o tópico 11.6 aponta para a redução do “impacto ambiental negativo *per capita* das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros” (ONU, 2015). Ambos os tópicos se vinculam à proposta de Beatley (2011) para a biofilia urbana, pois as estratégias defendidas no escopo biofílico visam a redução do impacto do ambiente construído sobre o ambiente natural, promovendo um relacionamento mais integrado e harmonioso entre essas esferas.

No âmbito nacional, observa-se o cenário de pressão hídrica observado nas regiões mais densamente povoadas (CIRILO, 2015), nas quais a relação entre a vazão captada dos mananciais e a vazão disponível não demonstra uma situação sustentável de disponibilidade hídrica para as próximas gerações. Isso denuncia a falência do sistema de produção do espaço urbano ainda vigente na contemporaneidade. Tal problemática poderia ser revertida através da implementação de projetos que recuperem corpos hídricos em meio urbano que se encontram em estado de degradação, o que poderia facilitar o acesso a recursos hídricos dentro da própria cidade. Ademais, o aumento da permeabilidade do solo em áreas urbanas é crucial para a manutenção do equilíbrio de bacias e sub-bacias hidrográficas (ZANLUCA; SUGAI, 2014).

Outro ponto que merece destaque é a projeção para o futuro da urbanização no Brasil. De acordo com dados levantados pelo Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais da Organização das Nações Unidas (ONU, 2018), o Brasil terá atingido, no ano de 2050, a marca de 92% da população vivendo em áreas urbanas e será o país mais urbanizado no âmbito da América Latina e Caribe. Diante dessa projeção, é imprescindível cuidar do tipo de espaço urbano que será oferecido a este contingente populacional, uma vez que, se mantidas as dinâmicas observadas no contexto urbano atual, o impacto ambiental da urbanização será bastante nocivo no futuro, comprometendo os esforços despendidos em prol da sustentabilidade.

Nesse âmbito, destaca-se a Lei Federal 12.608/2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Mais especificamente no inciso VI do Artigo 5º, sobre os objetivos da lei, lê-se: “estimular o desenvolvimento de cidades resilientes e os processos sustentáveis de urbanização” e no inciso X: “estimular o

ordenamento da ocupação do solo urbano e rural, tendo em vista sua conservação e proteção da vegetação nativa, dos recursos hídricos e da vida humana” (BRASIL, 2012). Isto posto, percebe-se que a presente proposta de pesquisa se relaciona com os objetivos definidos por esta lei, de modo que aumentem a qualidade de seu ambiente construído através de uma interação mais harmoniosa entre a cidade e os recursos naturais.

Na esfera do Estado do Espírito Santo, um fenômeno que vem causando preocupação consiste nas secas prolongadas, as quais, para Carnielli (2015, p. 01), são devidas à pouca cobertura florestal e à má proteção do solo:

Quase 90% do território capixaba está desnudo. Além de recuperar a cobertura florestal, em áreas de proteção permanente, é necessário melhorar a proteção do solo, com restos de culturas e adubação orgânica, construir caixas-secas e adotar outras medidas de conservação de solo, de baixo custo, para aumentar a capacidade de retenção de água, visando a alimentar o lençol freático.

Entretanto, a recuperação da cobertura vegetal não deve se limitar apenas às áreas rurais, devendo contemplar os espaços urbanos consolidados. Com a perspectiva do aumento da concentração populacional em áreas urbanizadas, os desdobramentos desse processo tendem a se refletir no microclima do ambiente construído, contribuindo para os desequilíbrios que geram tanto secas prolongadas quanto chuvas torrenciais. Nesse aspecto, a contribuição deste trabalho está na proposição de uma ferramenta que auxilie no planejamento de intervenções que tragam melhorias para o ambiente urbano através da utilização de infraestruturas verdes para regulação do ciclo hidrológico.

Outro aspecto contemplado por essa estratégia é a mitigação da vulnerabilidade a alagamentos e inundações. De acordo com dados levantados por EMDAT (2020), os alagamentos e inundações são as tipologias de desastre que mais afetam os agrupamentos humanos, bem como são as que mais geram perdas materiais. Com a tendência de aumento da incidência de condições meteorológicas extremas em todo o globo, tais desastres também devem tornar-se usuais. Logo, é

necessário que as cidades estejam preparadas para resistir a esses eventos extremos.

Segundo dados levantados pelo IEMA (2013) a região da sub-bacia do canal da Costa foi classificada como fornecendo alto risco para inundações, dado que esse tipo de desastre ocorre na região sob uma frequência de, pelo menos, uma vez a cada cinco anos. Sendo assim, o recorte espacial aplicado à presente dissertação encontra respaldado nesta problemática, pois a busca pelo equilíbrio das dinâmicas hidrológicas no espaço construído auxilia não apenas na mitigação de alagamentos, como também de enchentes, já que o escoamento superficial oriundo da impermeabilização excessiva do solo influencia ambos os eventos mencionados.

Sob o ponto de vista das contribuições para o saber acadêmico e para o desenvolvimento das áreas de conhecimento de Arquitetura e Urbanismo e Planejamento Urbano e Regional, o trabalho se justifica, também, por sua originalidade ao propor o desenvolvimento de uma ferramenta algorítmico-paramétrica para análise das contribuições hidrológicas da arborização em bacias e sub-bacias hidrográficas contidas no tecido construído. Conforme mencionado anteriormente, no tópico referente à identificação da lacuna de pesquisa, foi encontrado um total de cinco trabalhos que se relacionam diretamente à temática delimitada para esta dissertação, porém nenhum deles articulava a questão da vegetação com a drenagem urbana especificamente. O trabalho que mais se aproxima da proposta apresentada por esta dissertação, como já mencionado, foi desenvolvido por Ribeiro (2018), cuja ferramenta algorítmico-paramétrica servirá de ponto de partida para as análises pretendidas.

Quanto ao uso do *software* Rhinoceros e o *plug-in* Grasshopper como meios para o desenvolvimento da ferramenta algorítmico-paramétrica em questão, tal escolha se justifica pela frequência na aplicação dessas interfaces digitais identificada a partir de um levantamento de trabalhos acadêmicos. Ao pesquisar as palavras-chave “*parametric*” e “*urban design*” no Portal de Periódicos da CAPES em um período limitado de 2008 a 2020, encontrou-se um total de cinco trabalhos, dos quais, após leitura de resumos para identificação de aderência ao tema e de aplicação prática das ferramentas paramétricas, apenas três restaram. Desse total, 66% utilizaram a combinação Rhinoceros e Grasshopper e 33% utilizaram o *software* Maya.

Realizando o mesmo perfil de busca na ferramenta Google Acadêmico, encontrou-se um total de 20 trabalhos, dos quais apenas dez se demonstraram

aderentes, trazendo uma aplicação prática da metodologia. Desse grupo, 80% utilizaram a combinação Rhinoceros e Grasshopper e 20% o *software* CityEngine. Speranza (2016) comenta a ampla usabilidade do Rhinoceros em associação ao Grasshopper como sendo devido à possibilidade de customização das ferramentas algorítmico-paramétricas, facilitando a criação de ferramentas específicas para cada contexto.

Por fim, ressalta-se o interesse particular do autor na investigação dos assuntos contemplados nesta dissertação. Desde a graduação, o autor estuda e experimenta as ferramentas paramétricas e algorítmico-paramétricas para modelagem digital, associando-as a outras técnicas, como as de fabricação digital. Por outro lado, a questão da sustentabilidade também é uma constante no percurso acadêmico, estando também vinculada às experimentações tecnológicas. Portanto, o autor reúne habilidades construídas ao longo do tempo despendido em contato com esse perfil de abordagens, que servirão de apoio para alcançar os objetivos delimitados para o presente trabalho.

1.7 Metodologia

Segundo a visão de Prodanov e Freitas (2013), esta dissertação apresenta uma natureza aplicada, dado que pretende produzir saberes dirigidos à aplicação prática de metodologias para a resolução de problemas específicos, em sua maioria, envolvendo verdades e interesses locais. No caso do recorte delineado para este trabalho, a aplicação da teoria em contexto prático se dá com relação à produção de uma ferramenta digital para suporte a projetos de intervenções urbanas que visem reintegrar os ambientes construído e natural.

Colocando em perspectiva os objetivos apresentados, Gil (2002) classifica a presente pesquisa como exploratória. Uma pesquisa exploratória almeja o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições sobre determinado problema. No caso desta dissertação, em específico, as explorações giram em torno do problema das rupturas morfológicas e funcionais de cunho ambiental no meio construído, de modo que se faz importante compreender as causas existentes por trás desse fenômeno para que, então, alternativas adequadas sejam criadas.

Sob a ótica dos procedimentos metodológicos, Gil (2002) indica que a pesquisa em questão compreende um híbrido entre as pesquisas bibliográfica e

experimental. Esta dissertação se vale, essencialmente, de bases bibliográficas para a composição do arcabouço teórico-conceitual de suporte para as discussões e proposições a serem realizadas, além de construir e explorar uma ferramenta algorítmico-paramétrica para utilização em intervenções urbanas mais alinhadas com as concepções biofílicas de cidade. Com base nessas definições, a metodologia planejada para a presente dissertação se divide em três recortes: temático, analítico e prático, a serem comentados e detalhados a seguir.

1.7.1 *Recorte Temático*

O recorte temático se ocupa em coletar informações relevantes para a contextualização teórico-conceitual desta dissertação. Assim, utiliza-se de uma revisão exploratória de literatura baseada em livros, artigos, dissertações e teses disponíveis na ferramenta de buscas do Google Acadêmico, assim como no Portal de Periódicos e no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, limitados à Grande Área do Conhecimento da Arquitetura e do Urbanismo, do Planejamento Urbano e Regional, da Geografia e da Engenharia Ambiental. As buscas se sucedem de acordo com o eixo temático de cada capítulo da presente dissertação, tendo por descritores os seguintes grupos de palavras-chave: (1) “Antropoceno”, “*Anthropocene*”, para a temática do Antropoceno; (2) “espaço urbano”, “rupturas”, “meio ambiente urbano” e “hidrologia urbana”, para a questão das rupturas na interface cidade-natureza; (3) “biofilia urbana”, “desenho biofílico” e “*urban biophilia*” para a questão biofílica e (4) “desenho paramétrico”, “urbano”, “*parametric*” e “*urban design*”, para a questão paramétrica. Esta etapa metodológica visa suprir os objetivos específicos “a”, “b” e “c”, fornecendo informações importantes para a fundamentação teórica sobre os processos urbanizantes contemporâneos e suas consequências, as ferramentas algorítmico-paramétricas como suporte para projetos urbanísticos e para a biofilia urbana.

Os principais autores selecionados para esta etapa são:

I) No âmbito da produção do espaço urbano no Antropoceno: Artaxo (2014), Lewis e Maslin (2015), Steffen et al. (2015), Davis (1965), Torrey (2004), Santos (2008), Gorski (2008), Engels (2010), Mostafavi (2014), Maricato (2015) e Ferrão (2017).

II) No âmbito das cidades biofílicas: Beatley (2011; 2016), Kellert (2018); Alves (2015) Pruski, Brandão e Silva (2014), Herzog (2010) e Tucci (2000);

III) No âmbito da abordagem algorítmico-paramétrica: Mitchell (1970), Kolarevic (2003), Schumacher (2008), Woodbury (2010), Frazer (2016) e Lima, Costa e Rosa (2020);

Em seguida, outros levantamentos, de perfil mais sistemático, se mostram necessários para estabelecer alguns critérios importantes para o andamento da presente pesquisa. No momento em que o estudo se volta à questão dos cálculos matemáticos estabelecidos para interpretar e analisar as dinâmicas hidrológicas, no tópico **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas**, retoma-se a busca por trabalhos, porém, dessa vez, enfatizando as metodologias de cálculo de escoamento superficial em meio urbano mais usuais. Assim, realiza-se um levantamento de trabalhos acadêmicos no Portal de Periódicos da CAPES e no Google Acadêmico através das palavras-chave “cálculo”, “escoamento superficial” e “urbano”, para as disciplinas de Ciências da Terra e Engenharias, no período entre 2010 e 2020.

Posteriormente, no tópico **5.2 Modelagem da Interceptação Pluvial**, quando a atenção se volta para a quantificação da contribuição das árvores para a redução do escoamento superficial através da retenção da pluviosidade em suas copas, mais um levantamento de trabalhos se sucede no Portal de Periódicos da CAPES e no Google Acadêmico, utilizando como descritores as palavras-chave “retenção pluvial”, “copa” e “árvores” para as disciplinas de Ciências da Terra e Engenharias.

1.7.2 *Recorte Analítico*

O recorte analítico, por sua vez, consiste em um trabalho de sistematização das informações coletadas no recorte temático. Por meio dessa sistematização, pretende-se destacar aquelas informações consideradas mais adequadas à avaliação da influência da arborização nas dinâmicas hidrológicas, além de verificar essa influência por meio da realização de uma aplicação-piloto do método de cálculo a ser proposto. Nesta etapa, é suprido o objetivo específico “d”.

Nesse sentido, inicialmente, realiza-se uma adaptação do Método Racional de cálculo de escoamento superficial, apontado tanto no subcapítulo **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas** quanto na ferramenta de Ribeiro (2018), a fim de considerar a influência da arborização nesse processo. Como será comentado mais adiante, o Método Racional leva em conta apenas aspectos referentes à

cobertura do solo, estando, pois, as feições vegetais implícitas nesse cálculo, uma vez que estas se configuram como elementos tridimensionais, estendidos para além da superfície do solo.

Conforme apontado pelos autores trabalhados no subcapítulo **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas**, a arborização altera a formação do escoamento superficial, tanto reduzindo-o quanto retardando-o, já que a sua estrutura tridimensional composta por copa e tronco retêm parte da precipitação, reduzindo o volume de água que atinge o solo. Logo, ao destacar a variável arborização no processo de cálculo, obtêm-se uma melhor visualização de sua influência nas dinâmicas hidrológicas. Em um segundo momento, para suprir a lacuna referente à especificação da taxa de retenção pluvial por diferentes espécies arbóreas, um trabalho de estimativa e sistematização desses valores é realizado, utilizando-se de dados já catalogados por estudos precedentes envolvendo a temática.

Em seguida, um conjunto de métricas é desenvolvido para qualificar a efetividade das intervenções sobre o espaço urbano visando a redução do escoamento superficial. A qualificação é delineada a partir de dois extremos fixos: a bacia hidrográfica em condição natural e a bacia hidrográfica em condição de total impermeabilização. A justificativa pela opção de ambos os extremos é a caracterização da situação de equilíbrio hidrológico, uma vez que em uma bacia em seu estado natural, a tendência é a de que as dinâmicas hidrológicas estejam em equilíbrio, enquanto que em seu estado totalmente impermeabilizado, a vazão de escoamento superficial será máxima.

Tomando esses dois extremos, divide-se o intervalo entre ambos em cinco partes iguais para caracterizar as qualificações “ótima”, “boa”, “regular”, “ruim” e “crítica” a partir do extremo da condição natural. Como cada bacia hidrográfica possui uma dinâmica hidrológica específica, a demarcação dessas qualificações respeita a uma série de proporções entre variáveis organizadas de modo a respeitar as especificidades de cada bacia. Assim, não se estabelecem valores absolutos nesse processo de qualificação.

Como última etapa do recorte analítico, toma-se para análise a ferramenta algorítmico-paramétrica desenvolvida por Ribeiro (2018) sob o enfoque do Método Racional de cálculo para o escoamento superficial. A análise é dedicada à identificação do passo-a-passo metodológico reproduzido pela ferramenta e aplicado em conjunto a esta para a realização dos diagnósticos das taxas de escoamento

superficial, bem como ao reconhecimento de lacunas e etapas metodológicas passíveis de serem aprimoradas pela presente pesquisa.

1.7.3 *Recorte Prático*

O último recorte metodológico aplicado à presente dissertação compreende as atividades práticas de confecção da ferramenta algorítmico-paramétrica e de simulação projetual realizadas através do *software* Rhinoceros em combinação com o *plug-in* Grasshopper. Conforme comentado no tópico **1.6 Justificativa**, a escolha por essa combinação de ferramentas computacionais se deve à possibilidade de customização das ferramentas algorítmico-paramétricas por meio da edição de algoritmos, facilitando a criação de ferramentas específicas para cada contexto.

Assim, em um primeiro momento, uma nova ferramenta algorítmico-paramétrica é proposta com base nas diretrizes de cálculo traçadas no recorte analítico. É utilizada a linguagem de programação visual própria da interface do Grasshopper juntamente com a linguagem de programação C# para a criação de novas funcionalidades que reproduzam operações necessárias para o correto funcionamento da equação proposta.

As simulações projetuais, por sua vez, incorporam os aprendizados e conclusões obtidas através dos estudos de precedente a partir da ferramenta algorítmico-paramétrica desenvolvida por Ribeiro (2018). Assim, substitui-se o método do mapa de pixels utilizado pelo referido autor pelo levantamento de áreas com o *software* de georreferenciamento ArcGIS, através do mapeamento de feições em imagens aéreas. A coleta de dados foi direcionada a trechos urbanos inseridos na sub-bacia do Canal da Costa, considerando o grau de vulnerabilidade a alagamentos e a estruturação do tecido urbano no local.

Após essa etapa, os dados coletados são aplicados na ferramenta algorítmico-paramétrica para se obter um diagnóstico da condição atual dos trechos urbanos selecionados para análise. Em seguida, os dados criados a partir dos cenários fictícios das simulações projetuais também são inseridos na ferramenta, de modo a investigar a efetividade da arborização e outras estratégias biofilicas na redução do escoamento superficial.

Dando sequência aos experimentos com a ferramenta, também é proposto um teste de usabilidade em oficinas realizadas junto a estudantes da Graduação em Arquitetura e Urbanismo da própria instituição, e também com membros da

comunidade externa. O intuito do teste de usabilidade é aferir o grau de facilidade na interação usuário-ferramenta, apontando possíveis ajustes para melhoramentos futuros, além de introduzir os alunos e a comunidade às tecnologias algorítmico-paramétricas, possibilitando uma integração entre pesquisa, ensino e extensão. Desse modo, o presente recorte metodológico contempla os objetivos específicos “e”, “f” e “g”, finalizando a série de objetivos almejados.

O delineamento geral da pesquisa encontra-se sintetizado na Figura 01.

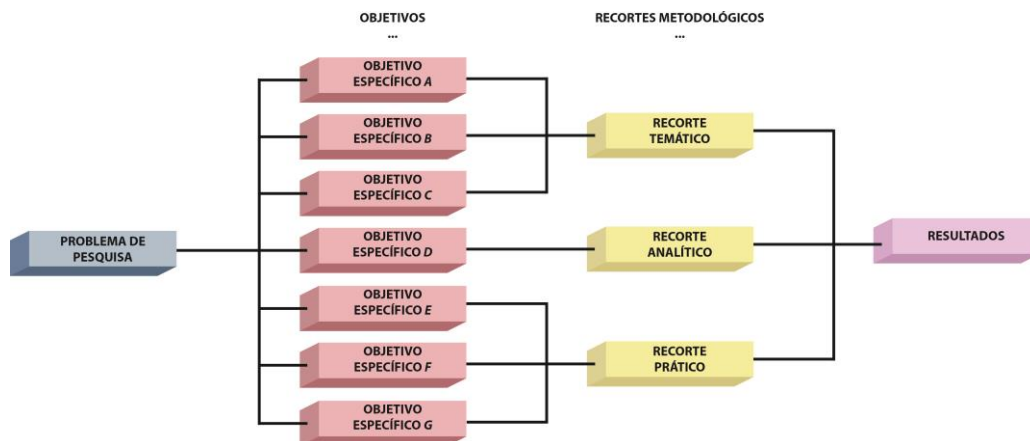


Figura 1. Delineamento geral da metodologia. **Fonte:** O autor, 2022.

1.8 A Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em oito partes, contemplando cada um dos recortes metodológicos descritos anteriormente. A primeira parte compreende a introdução do trabalho, onde se apresentam a contextualização do tema, a identificação da lacuna e do problema de pesquisa, o recorte espacial, o objetivo geral e específicos, a justificativa, a metodologia e a estruturação da dissertação. Elementos fundamentais para guiar o leitor acerca do delineamento geral do trabalho.

Na segunda parte, inicia-se o desenvolvimento do recorte metodológico teórico, através de uma investigação do processo histórico da urbanização sob a perspectiva da espacialização de rupturas na interface cidade e natureza, com destaque para a questão hídrica e para os alagamentos urbanos. Na terceira parte, a atenção se volta para as estratégias biofílicas que podem ser aplicadas para a mitigação das problemáticas identificadas.

Assim, a temática começa a ser explorada a partir da compreensão do ciclo hidrológico e como este é afetado pela urbanização, para, em seguida, analisar os

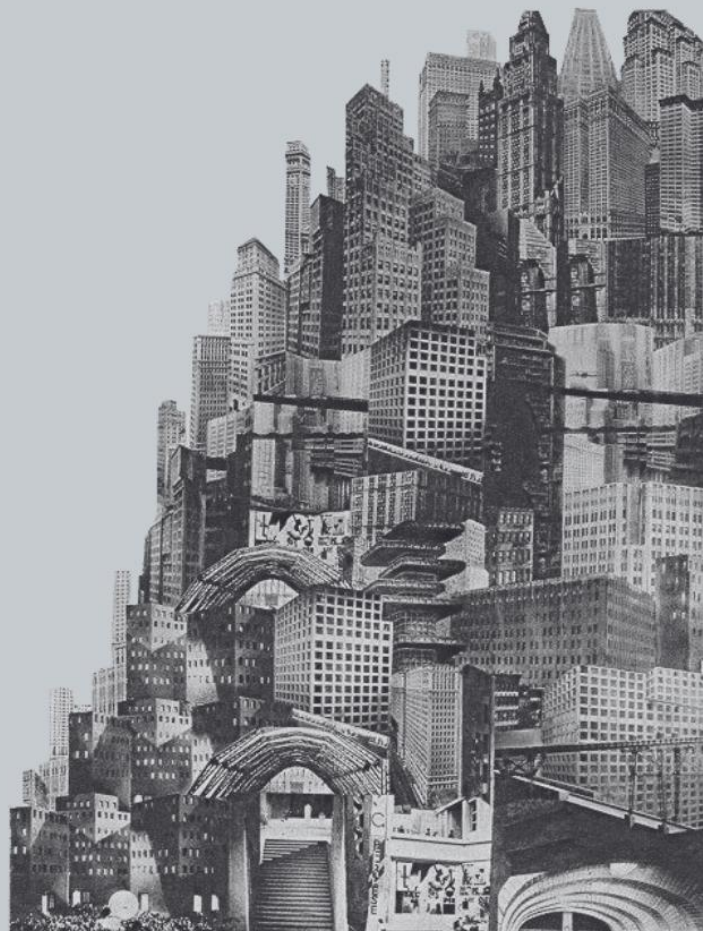
efeitos da arborização em seus processos e fluxos e como ela pode contribuir para a redução da problemática dos alagamentos; ao final, um panorama de estratégias biofilicas é apresentado de modo a ilustrar a aplicação da arborização e de outras técnicas de infraestrutura verde para a qualificação do ambiente urbano. Na quarta parte, por sua vez, as atividades relacionadas ao recorte metodológico teórico são concluídas com a abordagem das tecnologias algorítmico-paramétricas, observando suas origens, aplicabilidades e interseções com a presente pesquisa.

Na quinta parte, o recorte metodológico analítico é executado. Inicialmente, a equação para estimativa do escoamento superficial pelo Método Racional é analisada e adaptada, inserindo uma variável que expresse a interferência da arborização no referido processo. As taxas de retenção específicas para diferentes tipos arbóreos são investigadas, juntamente com o delineamento de uma sequência de métricas para avaliar qualitativamente a redução no escoamento superficial.

Na sexta parte, o recorte metodológico prático é aplicado através da produção da ferramenta algorítmico-paramétrica a partir da metodologia de cálculo de escoamento superficial. Em um primeiro momento, realiza-se um estudo da ferramenta algorítmico-paramétrica desenvolvida por Ribeiro (2018), buscando lacunas que possam orientar o desenvolvimento da ferramenta deste trabalho, intitulada *Parametree*. Em seguida, registra-se o passo-a-passo de sua programação, destacando as adaptações realizadas.

Na sétima parte, apresenta-se o panorama de formação do território destacado para a realização das atividades de perfil prático, evidenciando as transformações sofridas pelo corpo hídrico atualmente identificado como Canal da Costa, além da distribuição da vulnerabilidade à incidência de alagamentos. Após a exposição desses aspectos, são delimitados recortes mais específicos de intervenção, considerando uma sobreposição de variáveis agravantes para o contexto dos alagamentos urbanos. Na oitava parte, o recorte prático é finalizado com a aplicação da *Parametree* em um cenário urbano destacado do contexto da cidade de Vila Velha – ES. Além disso, realiza-se um teste de usabilidade com estudantes e com membros da comunidade externa para validar os procedimentos indicados na ferramenta.

2 A CIDADE NO ANTROPOCENO



2 A CIDADE NO ANTROPOCENO

Para iniciar as discussões a respeito do fenômeno da urbanização em paralelo à consolidação do período geológico dito Antropoceno, faz-se necessário, primeiramente, esclarecer: o que é o Antropoceno? Qual a origem dessa nomenclatura?

Para Artaxo (2014), o Antropoceno é uma classificação geológica cunhada na década de 1980 para classificar o período em que as atividades antrópicas passaram a interferir nas dinâmicas planetárias a nível global, o que foi impelido pela Revolução Industrial no século XVIII. A comunidade geológica, de um modo geral, concorda que a Terra está no período do Holoceno há 11.700 anos, que se caracteriza por uma relativa estabilidade climática. Entretanto, nas últimas décadas, vê-se que tal estabilidade vem sendo posta em xeque justamente como resultado das ações humanas sobre o meio, evidenciando, possivelmente, uma alteração no estado geológico do planeta.

Lewis e Maslin (2015) indicam que, a partir de 1800, com a consolidação da primeira fase da Revolução Industrial, foi possível observar um aumento expressivo na concentração de gases poluentes na atmosfera, na erosão do solo, no desmatamento e no avanço de áreas agrícolas, o que, inegavelmente, tem alterado a superfície do planeta, assim como suas dinâmicas ecológicas. A concentração de gás carbônico (CO₂) na atmosfera, por exemplo, passou de 280 ppm na era pré-industrial para 399 ppm em meados da década de 2010 (ARTAXO, 2014).

Esse aumento de 42,5% na concentração atmosférica de gás carbônico reflete em uma série de alterações climáticas decorrentes de uma maior retenção de calor no sistema Terra, contribuindo para a ocorrência de eventos climáticos extremos. Ainda de acordo com Artaxo (2014), a intervenção antrópica sobre o meio não se restringe apenas às questões atmosféricas. A humanidade também atua sobre outros aspectos planetários, como o relevo e a paisagem, de modo que a sociedade humana se transforma em uma força global que molda a Terra em associação às forças geológicas.

Lewis e Maslin (2015) sinalizam, também, a influência antrópica sobre a dispersão de espécies vegetais, animais e microbianas, que, de outro modo, dificilmente teriam se estabelecido em outros continentes, impactando na dinâmica dos ecossistemas dessas regiões. Um exemplo dado é o do chamado Intercâmbio

Colombiano: com a realização das grandes navegações e o princípio da troca comercial a nível global, houve uma difusão de espécies vegetais alimentícias, bem como animais e, até mesmo, micro-organismos causadores de doenças.

Nesse sentido, Steffen et al. (2015) indicam nove parâmetros que expõem a interferência antrópica sobre o sistema planetário, são eles: as mudanças climáticas, a perda de ozônio estratosférico, a acidificação dos oceanos, as transformações nos ciclos biogeoquímicos de nitrogênio e fósforo, a perda da biodiversidade, as mudanças no uso do solo, a pressão sobre os recursos hídricos, o aumento da carga de partículas de aerossóis na atmosfera e a introdução de substâncias novas criadas artificialmente.

Dentre os parâmetros listados, é possível notar que todos eles se vinculam, direta ou indiretamente, às atividades humanas, principalmente às econômicas, revelando a interferência das dinâmicas produtivas sobre os processos naturais. Apesar disso, a classificação do Antropoceno ainda não é reconhecida oficialmente pela comunidade geológica, uma vez que, dentre os parâmetros utilizados para a demarcação das eras, a interferência humana não é considerada (LEWIS; MASLIN, 2015). Entretanto, estudos e discussões sobre a temática seguem em uma crescente, especialmente a partir dos anos 2000, movidos pelas ideias de Crutzen e Stoermer (2000).

Independente dessas particularidades, o conceito do Antropoceno é trazido a esta dissertação por se relacionar com a problemática das rupturas na interface cidade e ambiente natural, a qual é a base das explorações propostas por este trabalho. Vale destacar que, tanto no contexto do Antropoceno quanto no do fenômeno da urbanização, a Revolução Industrial assume um papel de catalisador de transformações. Após esse evento, no século XX, a população mundial saltou de 1,65 bilhões para 6 bilhões (ARTAXO, 2014), concentrando-se em cidades, que se multiplicaram e se expandiram pela superfície do planeta, alterando drasticamente a paisagem, as dinâmicas ambientais e gerando uma alta demanda por recursos para sustentar as mais diversas atividades presentes no contexto urbano, sejam elas econômicas ou de subsistência.

Nessa conjuntura, resgata-se a expectativa de manutenção da tendência de crescimento da urbanização, a qual, até o ano de 2050, terá promovido um aumento da concentração de pessoas em ambiente urbano. No caso do Brasil, em específico, mais de 90% da população estará residindo nas cidades (ONU, 2018).

Nesse ínterim, se mantidas as práticas vigentes de intervenção sobre o meio, perpetuando a desarticulação entre os sistemas construído e natural, os problemas resultantes desse processo também serão mantidos, o que compromete o equilíbrio do sistema Terra, além da resiliência das cidades frente à intensificação de eventos climáticos extremos.

Desse modo, antes de se analisarem as possíveis soluções para os problemas urbanos de ordem ambiental relacionados às rupturas na interface cidade-natureza, faz-se importante estudar como se deu o processo de urbanização nesse período intitulado Antropoceno; quais ideários, práticas e conflitos tem regido a produção desse espaço construído; e, por fim, como essas questões se desdobram no tecido urbano sob a forma de rupturas.

Assim, este capítulo se divide em dois subcapítulos para a discussão dos tópicos supracitados. No subcapítulo **2.1 O Antropoceno e os Processos Urbanizantes**, são delineados os processos e práticas que têm regido a formação do espaço construído em seus diferentes momentos desde a Revolução Industrial, destacando, também, os conflitos que tem marcado a produção desse espaço. No subcapítulo **2.2 Uma Arena de Rupturas**, são comentadas as rupturas morfológicas e funcionais observadas a partir da desarticulação entre os processos urbanizantes e as dinâmicas ambientais, além dos problemas resultantes que afetam a qualidade ambiental das cidades.

2.1 O Antropoceno e os Processos Urbanizantes

Toma-se como ponto de partida para as discussões a serem tecidas neste subcapítulo a Revolução Industrial, evento que demarca amplas transformações tanto sob a ótica do Antropoceno quanto dos processos de urbanização, visto que ambos os fenômenos estão intrinsecamente conectados. Conforme abordado, o Antropoceno demarca o período em que as ações antrópicas passaram a atuar de maneira global, interferindo nas dinâmicas planetárias juntamente com as demais forças geofísicas. Afinal, o que são as cidades a não ser uma das mais fortes expressões dessa intervenção humana sobre o meio? Ao produzir o seu próprio espaço, com regras particulares de ordenamento e funcionamento, o homem desafia as dinâmicas naturais e, por vezes, tenta se sobrepor a elas.

Todavia, deve-se ressaltar que a Revolução Industrial não inventou as cidades. O movimento de concentração populacional no meio ambiente construído se

deu há, pelo menos, 5.500 anos, porém o número de pessoas residindo nesses espaços era extremamente pequeno, se comparado com a porção que vivia nos vastos territórios rurais. Isso se deve, em um primeiro momento, à baixa qualidade ambiental das cidades, uma vez que se observava uma carência por saneamento básico, gerando uma alta taxa de transmissibilidade de doenças. Ademais, nas cidades não havia uma produção expressiva de recursos para subsistência. Logo, o espaço urbano não era, então, percebido como um local atrativo, a não ser para fins políticos, militares e comerciais (DAVIS, 1965).

Ao olhar para esse primeiro aspecto, é possível perceber que as cidades já nascem como um espaço de ruptura para com o ambiente natural, principalmente no que tange às dinâmicas ecológicas. Expressa-se, assim, uma ruptura funcional, ou seja, um descolamento entre o sistema natural e o sistema construído através da atribuição do lugar da ação do homem e o da não-ação ou contemplação (CARVALHO, 2014).

Seguindo por essa linha de pensamento, Torrey (2004) considera que esse descolamento entre os sistemas citados anteriormente se dá pela alta demanda, em meio urbano, por alimentos, energia e água, além das transformações no uso e ocupação do solo, promovendo uma artificialização das superfícies. Sendo assim, Torrey (2004) indica que o começo desse descolamento se deu há 8.000 anos quando a intervenção humana sobre o território se iniciou por meio das atividades agrícolas, prosseguindo com o surgimento dos assentamentos urbanos. Entretanto, foi com a Revolução Industrial que estes processos adquiriram uma escala mais intensa, dada a evolução tecnológica atingida nesse período, além de se adicionar um novo aspecto à dinâmica de transformação do meio: a poluição atmosférica com a queima de combustíveis fósseis.

A partir desse momento, as cidades começaram a crescer tanto em número quanto em dimensão. Davis (1965) comenta que é com a Revolução Industrial que se inicia a urbanização das sociedades humanas, entendendo-se, aqui, o termo urbanização como o movimento de concentração dos indivíduos em meio urbano. Até o começo do século XX nenhum país poderia ser classificado como urbanizado, pois a taxa de residentes em cidades era pífia. Essa afirmação de Davis (1965) encontra respaldo em Torrey (2004), que sinaliza que, até o ano de 1800, apenas 2% da população mundial vivia em cidades. Cerca de 100 anos depois, somente a Grã-Bretanha, o berço da Revolução Industrial, era um país urbanizado e, desde então,

ao longo dos 100 anos seguintes, vários outros países foram atingindo esse patamar (DAVIS, 1965).

Nesse sentido, Torrey (2004) demonstra que o crescimento da população urbana e, também, como resultado, da mancha urbana, não se deve unicamente à fertilidade daqueles indivíduos alocados nas cidades, que era, por comparação, até mesmo inferior a dos residentes no campo. Houve um intenso fluxo migratório no sentido campo-cidade em decorrência de estímulos vinculados à oferta de trabalho. Entretanto, mesmo precisando de trabalhadores para movimentar o novo setor produtivo que se descortinava, a cidade não estava preparada para receber este contingente populacional, o que se refletiu em um processo de expansão urbana precária.

Segundo Engels (2010), as indústrias operavam em uma dinâmica centralizadora bastante peculiar: ao passo que o empreendimento industrial era centralizado sob a posse de uma parcela da elite, oferecendo uma ampla cota de poder a este segmento social, o mesmo empreendimento também demandava uma força de trabalho em grande escala, atraindo, assim, uma massa de pessoas para o local onde a fábrica estava instalada. Com isso, começavam a surgir vilas de trabalhadores nos arredores dos estabelecimentos industriais e, por esse motivo, novas demandas por artesãos, alfaiates, sapateiros, padeiros, entre outros, também apareciam, de modo que o comércio também passasse a se inserir ali. Assim, pequenos aglomerados fabris se expandiam espontaneamente em bairros mais complexos, ampliando o porte das cidades.

Dado o caráter espontâneo desse desenvolvimento urbano, frequentemente era observado um estado de degradação social e ambiental no contexto do ambiente construído. Engels (2010) se utiliza da descrição do bairro de St. Giles, em Londres, para exemplificar esse cenário bastante comum nas cidades industriais do século XIX. De acordo esse autor, o bairro, na época, era visto como:

[...] uma massa desordenada de casas de três ou quatro andares, com ruas estreitas, tortuosas e sujas, onde reina uma agitação tão intensa como aquela que se registra nas principais ruas da cidade – com a diferença de que, em St. Giles, vê-se unicamente pessoas da classe operária. Os mercados são as próprias ruas: cestos de legumes e frutos, todos naturalmente de péssima qualidade e

difícilmente comestíveis [...]. As casas são habitadas dos porões aos desvãos, sujas por dentro e por fora e têm um aspecto tal que ninguém desejaria morar nelas. [...] Por todas as partes, há montes de detritos e cinzas e as águas servidas, diante das portas, formam charcos nauseabundos (ENGELS, 2010, p. 71).

Por meio desse excerto, é possível notar o estado de má qualidade ambiental ocasionado pela ausência de infraestruturas básicas para fornecimento de água potável e recolhimento de esgoto, bem como uma superlotação das residências, o que, neste caso, potencializa a propagação de doenças. Outro ponto evidente é a falta de serviços de limpeza urbana, além de sinais da intensa poluição industrial com a menção às cinzas acumuladas nas ruas.

Não se pode deixar de mencionar o indicativo de segregação socioespacial contido no fragmento de texto supracitado no momento em que o autor comenta que apenas operários vivem nesse bairro, sob essas condições. Este ponto torna-se ainda mais evidente quando Engels (2010) ressalta que o aglomerado de St. Giles se localiza no meio da parte mais populosa da cidade de Londres, muito próximo de locais tradicionais como *Oxford Street*, *Regent Street* e *Trafalgar Square*, caracterizados por suas avenidas largas e bem iluminadas.

Nessa perspectiva, nota-se dois fenômenos que se inter-relacionam. O primeiro é a manifestação de assimetrias de poder entre diferentes agentes sociais: os proprietários dos meios de produção e os operários. Essa assimetria se materializa no tecido urbano sob a forma do segundo fenômeno, que são as rupturas morfológicas com raízes na segregação socioespacial.

Essas rupturas podem ser percebidas nos comentários de Engels (2010) ao contrapor as ruas estreitas, tortuosas e sujas de St. Giles às avenidas largas e bem iluminadas de locais próximos ao aglomerado industrial, denotando uma diferenciação no traçado urbano: algo entre o espontâneo e o planejado; entre o que não recebe cuidado para com a qualidade dos espaços públicos e o que recebe tal atenção.

Para Castells (1977), essas diferenciações nas relações de produção, consumo, troca e poder constituem a formação de uma cultura que é inerente às sociedades capitalistas, de modo que o espaço urbano se constitui em um meio da afirmação da lógica do capital, que se baseia na desigualdade. Assim, as rupturas

morfológicas decorrentes da segregação socioespacial é tão somente uma das manifestações dessa lógica capitalista em ascensão com a Revolução Industrial.

Deixando o contexto inglês, uma importante obra literária que contempla a questão da industrialização francesa é o romance *Germinal* de Émile Zola (2016), publicado inicialmente em 1885. Na ficção a respeito da condição dos operários durante a primeira fase da Revolução Industrial na França, encontra-se muitos pontos de convergência com a realidade social descrita por Engels (2010) em seus estudos de 1845, uma vez que a obra de Zola se insere no movimento literário Realista, que buscava inspiração em tópicos cotidianos da época. Porém, deseja-se destacar neste ponto a percepção de Zola (2016) sobre o impacto das indústrias no ambiente:

Tudo se aniquilava no fundo desconhecido das noites obscuras; só percebia, muito ao longe, os altos-fornos e as fornalhas de coque. Estas, baterias de cem chaminés erguidas obliquamente, alinhavam rampas de chamas rubras, enquanto as duas torres, mais à esquerda, ardiam, azuis, em pleno céu, como tochas gigantescas. Era uma tristeza de incêndio, não havia no horizonte ameaçador outros astros elevando-se a não ser esses fogos noturnos dos países da hulha e do ferro (ZOLA, 2016, p. 06).

Assim como em:

No fim do horizonte, pequenas manchas brancas indicavam as cidades: Marchiennes ao norte, Montsou ao sul e, a leste, a floresta de Vandame, ornando o espaço com a linha violácea das suas árvores despojadas. E, sob o céu lívido e de nuvens baixas daquele entardecer de inverno, aparecia todo o negrume da Voreux, toda a poeira esvoaçante da hulha que ia abater-se na planície, enodoando as árvores, saibrando as estradas, juncando a terra (ZOLA, 2016, p. 56).

Diante da descrição dessas cenas, escancara-se a agressividade da degradação ambiental que pautou o início da industrialização, assim como o alvorecer do Antropoceno. Constata-se que, nessa conjuntura, a questão do saneamento, em um primeiro momento, e da sustentabilidade não eram fatores considerados nas

dinâmicas econômico-produtivas e nas dimensões do planejamento urbano, o que, sem dúvida, afetou em grande medida o equilíbrio dos sistemas naturais.

A questão do saneamento só passa a ser contemplada com a criação do movimento do urbanismo sanitaria, que surge, então, na segunda metade do século XIX como resposta da engenharia às teorias médicas que versavam sobre os miasmas: emanações pestilentas de matéria orgânica em decomposição, geralmente, no meio de fluidos como pântanos, águas estagnadas, esgotos e no ar viciado de habitações coletivas. Essas teorias buscavam solucionar a degradação das condições de vida nas cidades resultantes do crescimento urbano descontrolado movido pela crescente industrialização (TOLEDO, 2012).

Assim, essas soluções se distribuíam por três conceitos básicos, que são a higiene, a circulação e a estética. A higiene era vista como uma solução para os problemas relacionados à propagação de doenças e de pragas urbanas, como os ratos. A circulação, por sua vez, era encarada como uma estratégia para simplificar o acesso dos trabalhadores às fábricas e, também, do escoamento da produção, observando-se, neste ponto, a preocupação com o fluxo do capital. E, finalmente, a estética como conceito-chave para o embelezamento urbano, incrementando a qualidade visual dos espaços públicos, especialmente para a fruição das camadas mais abastadas da sociedade (COSTA, 2003).

Respaladas por estes conceitos, as intervenções urbanas iniciadas ao final do século XIX promoveram intensas transformações estruturais na cidade, como através da abertura de vias mais largas e retilíneas, com a canalização de rios e com a distribuição de espaços ajardinados no meio urbano. Um exemplo marcante dessas intervenções é o Plano Haussmann aplicado no contexto da cidade de Paris, expressando, em suma, um forte apelo estético e funcionalista à questão da forma urbana (TOLEDO, 2012).

Nesse momento, devido às intervenções de caráter estruturante e racionalista comentadas anteriormente, o distanciamento entre o sistema construído e o sistema natural foi ampliado, principalmente, pela desnaturalização dos corpos hídricos em contexto urbano como forma de sanear as cidades. Gorski (2008) e Croce (2020) concordam que este fator foi crucial para a descaracterização das dinâmicas hídricas observadas no ambiente construído, causando problemas diversos como a incapacidade de manejar inundações e alagamentos. Este problema foi potencializado, posteriormente, com a adoção do veículo individual motorizado como

o principal modal de transporte, sob influência do modelo de desenvolvimento americano, que será comentado adiante. Assim, as cidades intensificaram a impermeabilização do solo e a canalização de rios acabou por facilitar a dinâmica racionalista de fluxos e a inserção de autopistas.

Já a questão da sustentabilidade é uma temática mais recente no escopo das discussões urbanas, a qual, de acordo com Kuhlman e Farrington (2010), teve o seu conceito criado e amplamente discutido a partir do Relatório de Brundtland, em 1987, que tinha por objetivo o debate acerca de possíveis soluções para a conciliação da dicotomia identificada entre o desejo por progresso e bem-estar das nações e a finitude de recursos existentes no sistema Terra. É notório que a motivação dessas discussões apresentava um profundo viés econômico pelo fato de que são as atividades produtivas que levam ao consumo e degradação de recursos e feições ambientais. Após esses questionamentos iniciais, o conceito de sustentabilidade passou a permear outros campos do conhecimento humano, passando a integrar, também, o rol de pesquisas associadas ao ambiente urbano.

Retomando o pensamento acerca dos processos urbanizantes, tem-se que, com a expansão da industrialização através de outros países, o processo de urbanização foi sofrendo alterações de acordo com as especificidades das dinâmicas socioeconômicas que se desenvolviam em cada região, ao mesmo tempo em que a marcha das intervenções antrópicas enquanto força transformadora seguia ampliando seus impactos globais. Nos Estados Unidos, por exemplo, observou-se um processo de urbanização bastante diferente do que vinha acontecendo na Europa.

Enquanto que na Europa predominava uma concepção de cidade densa e com um espraiamento urbano relativamente controlado, as cidades norte-americanas passaram por um vultoso investimento em expansão da malha viária como incentivo ao deslocamento por meio do transporte individual automotivo associada a estímulos para se viver nos subúrbios, em loteamentos maiores e em baixa densidade. Essa estratégia era um modo de se manter a indústria automobilística ativa, porém, acabou por se refletir em cidades excessivamente espraiadas e fragmentadas morfologicamente em tecidos que não coordenam dinâmicas de fluxos e usos (BEKELE, 2005).

O problema desse modelo de desenvolvimento urbano é a constante degradação dos ecossistemas rurais movida pelo avanço da mancha urbana. Mostafavi (2014) exemplifica esse cenário com o caso da metrópole de Nova Iorque,

que contém dentro de seu perímetro urbano cerca de 47.500 terrenos vazios, totalizando 6.900 hectares de áreas subutilizadas e, ainda assim, a mancha urbana avança por sobre bosques no sentido das montanhas de Pocono no Estado da Pennsylvania. Todo o montante de vazios urbanos contidos no tecido metropolitano denuncia uma gestão inadequada do espaço construído sob o preço da destruição dos sistemas naturais localizados no entorno, o que vai ao encontro das ideias trazidas por Torrey (2004) a respeito do impacto das cidades sobre o meio natural a partir da desvinculação dos sistemas natural e construído.

Apesar dessa configuração do espaço urbano ter sido observada inicialmente nas cidades norte-americanas, ela foi reproduzida em outros países a partir da replicação de processos econômicos implantados nos Estados Unidos, como a especulação imobiliária. Um dos países que adotaram este modelo foi o Brasil, incorrendo em complicações socioespaciais e ambientais semelhantes àquelas observadas no contexto americano.

A industrialização brasileira, juntamente com os demais países da América Latina, se deu de maneira tardia, ocorrendo, principalmente, a partir da década de 1950. Rangel (2005) sinaliza que a industrialização no território brasileiro seguiu uma ordem inversa àquela geral da industrialização ocorrida em países europeus e nos Estados Unidos, notadamente, em dois aspectos: o primeiro é que o incentivo à industrialização foi pautado pela substituição de importações, devido à crise internacional; o segundo é que a ordem de desenvolvimento seguiu das indústrias leves às pesadas, ou seja, iniciando pela produção de bens de consumo, passando pelo suprimento de produtos e infraestrutura. Esse processo de desenvolvimento industrial se mostrou bastante dependente de matrizes estrangeiras, uma vez que essa ordem invertida não possibilitou que o país desenvolvesse uma autonomia na elaboração de tecnologias de produção.

Contudo, antes de comentar os efeitos da industrialização sobre o território, é importante destacar a condição urbana observada previamente à consolidação desse processo. Santos (2008) demonstra que no final do período colonial, cidades como São Luís, Recife, Salvador, Rio de Janeiro e São Paulo aglutinavam 5,7% do total da população brasileira, o que correspondia a 2,85 milhões de habitantes. Nesse contexto, a cidade de Salvador já possuía um contingente populacional de 100.000 moradores, enquanto que nos Estados Unidos nenhuma cidade havia ultrapassado a

marca de 30.000 residentes. Ou seja, o grau de urbanização no Brasil já era elevado antes da industrialização.

Com a chegada do processo de industrialização, a taxa de urbanização saiu de 26,35%, em 1940, para 77,13%, em 1991 (SANTOS, 2008), o que demonstra que o efeito centralizador das indústrias, conforme abordado por Engels (2010), também foi observado em território brasileiro. Santos (2008) explica que, com a instauração do que ele classifica como meio técnico-científico, ou, em outras palavras, dos processos industriais, houve um desenvolvimento em grande escala da configuração territorial. Esta configuração territorial, de acordo com o autor, é composta por um conjunto de técnicas de engenharia que possibilitam a sobreposição do homem à natureza, o que se expressa por meio de um desenvolvimento exponencial dos sistemas de transportes, de telecomunicação e da produção de energia.

Sobre esses sistemas, Santos (2008) também comenta que, a partir de 1960, o Brasil passou por um investimento massivo em rodovias para interconexão nacional, juntamente com uma rede de estradas vicinais, sobretudo nas áreas com maior desenvolvimento socioeconômico. Em decorrência desse investimento, em 1981, haviam mais de 10 milhões de carros circulando pelo país. Um incremento de 170% se comparado com o ano de 1973.

Entretanto, a implantação do rodoviarismo como principal modal de transporte teve custos socioambientais: para Lauxen (2012), a construção de rodovias acarreta, de modo geral, na fragmentação do habitat e na perda da conectividade entre os ecossistemas; já Avena (2003) lista que os impactos decorrentes da implantação de rodovias são a extinção de espécies, danos às minorias étnicas tradicionais, além de transtornos nas dinâmicas geofísicas, como no microclima, no relevo e na hidrografia.

Com isso, é possível detectar uma das dimensões dos impactos da urbanização no território brasileiro, pois, com a priorização do rodoviarismo como modal de transporte, a descaracterização dos ecossistemas naturais extrapola a dimensão da mancha urbana e atinge, também, a parcela rural. Isso evidencia o processo de transformação da paisagem e das dinâmicas ambientais a partir da alteração do uso e ocupação do solo, conforme descrito por Torrey (2004), o que coaduna com a questão das ações humanas sobre as dinâmicas planetárias no Antropoceno.

Somando-se a esse fator, há, também, a descaracterização das feições naturais contidas no espaço intraurbano promovida pela abordagem sanitaria. Ao encarar as áreas naturalmente alagáveis como um potencial risco à saúde pública, foram promovidas uma série de intervenções urbanas visando a canalização e o tamponamento de rios que atravessavam o perímetro construído. Retificar e canalizar os rios eram práticas que permitiam a abertura de espaço para a inserção de empreendimentos imobiliários onde antes haviam meandros e várzeas. Além disso, o tamponamento dos cursos d'água possibilitava que dejetos lançados diretamente nas águas fossem ocultados, viabilizando a comercialização imobiliária em grandes parcelas de terra, sem interrupções (ANELLI, 2015), o que reverberou em desequilíbrios ambientais dentro do contexto urbano.

Desse modo, as cidades foram se transformando, desde a sua criação, em um processo de sucessivas rupturas para com o ambiente natural: rompeu-se, inicialmente, com as dinâmicas ecológicas e com as feições originais do terreno no local onde a cidade se instalava e, também, no seu entorno; em seguida, promoveram-se fragmentações morfológicas e estruturais no espaço intraurbano, levando a um aumento da complexidade da espacialização da urbe e o seu distanciamento para com a matriz biogeofísica do local. Assim, as cidades passaram de assentamentos humanos a uma verdadeira arena de rupturas.

2.2 Uma Arena de Rupturas

A partir das discussões tecidas no subcapítulo anterior, é possível perceber que o espaço urbano surge como um elemento de ruptura para com os sistemas naturais, modificando-os e, até mesmo, suprimindo-os em alguns aspectos para que a lógica racionalista de ordenamento do espaço construído seja implantada. Através da influência das dinâmicas sociais, políticas e econômicas sobre o meio, as cidades passaram a se fragmentar em porções cada vez mais complexas e discordantes, o que amplia, também, o seu distanciamento para com a matriz biogeofísica do local.

Seguindo por este limiar, o presente subcapítulo irá percorrer a temática das rupturas na interface cidade-ambiente com um olhar apurado, tendo por base as definições de rupturas ambientais conceituadas por Ferrão (2017). Ademais, traçam-se paralelos sobre as suas respectivas causas e efeitos, de modo a introduzir o campo de discussões do próximo capítulo, que visa apresentar algumas das soluções para a problemática a partir da perspectiva da biofilia urbana.

Tomando, pois, a conceituação definida por Ferrão (2017), entendem-se as rupturas ambientais como alterações profundas nas dinâmicas típicas do equilíbrio do sistema Terra, as quais são decorrentes do incremento dos processos urbanizantes observados no Antropoceno. De um modo geral, essas rupturas se espacializam afetando duas frentes distintas: as massas vegetadas e os recursos hídricos.

O autor ressalta que essas alterações nas dinâmicas naturais, tanto sobre as massas vegetadas quanto sobre os recursos hídricos, se dão por meio de quatro vias principais, sendo que, desse grupo, duas são resultantes diretas da ação da urbanização sobre o meio e as outras duas são consequências indiretas, que surgem a partir dos distúrbios provocados pelas resultantes diretas. Nesse sentido, as rupturas decorrentes da ação direta da urbanização são a artificialização e impermeabilização das superfícies e as ilhas de calor; enquanto que as rupturas de perfil indireto são o aquecimento global e o empobrecimento das relações rural-urbano.

Ferrão (2017) comenta que a artificialização e impermeabilização das superfícies são questões intimamente ligadas à ocupação do solo: ao propor novos usos e estabelecer infraestruturas construídas em determinado local, a artificialização da cobertura do solo ocorre, então, invariavelmente. Essa perspectiva encontra respaldo na teoria apresentada por Torrey (2004), que também aponta para o fenômeno das transformações no uso e ocupação do solo a partir das intervenções antrópicas sobre os sistemas naturais. Diante disso, pode-se compreender a ruptura da artificialização do solo como uma ruptura primária, que surge logo após a implantação de infraestruturas construídas no meio.

Essa ruptura é responsável pela destruição das feições naturais da base biogeofísica e de seus ecossistemas (COSTA et al., 2018), já que a cobertura original é suprimida para ceder espaço às construções. Tal condição é agravada pelas dinâmicas imobiliárias que regem a produção do espaço construído contemporâneo, as quais, através da valorização e desvalorização de determinadas parcelas do solo, promovem movimentos predatórios de expansão do tecido construído, como em uma explosão da mancha urbana a partir do antigo centro, o que se chama de espraiamento (MARICATO, 2015).

Através do espraiamento urbano, reproduz-se o binômio destruição dos sistemas naturais versus construção dos sistemas urbanos, vindo a comprometer ainda mais parcelas da base biogeofísica, conforme já ilustrado por Mostafavi (2014)

no exemplo da expansão da mancha urbana da cidade de Nova York por sobre os bosques de Pocono. Nesse ciclo vicioso que caracteriza a urbanização contemporânea, a repetição da espacialização dessa ruptura primária, relativa à artificialização da cobertura do solo associada à destruição dos ecossistemas naturais na negativa da possibilidade de integração destes aos ecossistemas urbanos (MONTE-MÓR, 1994), consolida um ambiente altamente descolado do contexto natural e, por consequência, insustentável e vulnerável a desastres (NUNES, 2015).

Agregada ao curso da artificialização do solo, a impermeabilização das superfícies também participa nesse processo de descolamento da cidade para com a sua base natural. Como consequência das características físico-químicas de determinados materiais aplicados na construção das infraestruturas urbanas, como estruturas de drenagem e arruamentos, a impermeabilização reduz a capacidade do solo de desenvolver suas funções hidrológicas, o que leva à ocorrência de problemas como alagamentos (NUNES; ROSA, 2020). Essa problemática é ampliada com a descaracterização de bacias e corpos hídricos no processo de ocupação urbana (GORSKI, 2008), prejudicando o escoamento dos fluxos hídricos superficiais oriundos dos espaços impermeáveis da cidade.

Uma outra face da problemática associada à impermeabilização do solo é o fenômeno da ilha de calor, que se configura como a segunda ruptura direta apontada por Ferrão (2017). Rocha et al. (2011) revelam que quanto maior a impermeabilização de um trecho urbano, maior a incidência do fenômeno das ilhas de calor sobre o local. Isso se dá, pois, com a utilização de materiais de baixo albedo nas edificações e na cobertura do solo, aumenta-se a retenção do calor no sistema construído, fazendo com que haja um acréscimo significativo nas temperaturas médias das cidades em relação às áreas rurais próximas. Além disso, Gartland (2010) comenta que não apenas os materiais utilizados impactam nesse aspecto, como também a forma e disposição dos edifícios no tecido construído, que podem vir a bloquear e alterar a dinâmica natural de ventos; e a poluição do ar urbano por processos industriais e automotivos, fazendo com que a atmosfera fique repleta de partículas que absorvem calor, aumentando a temperatura média de todo o sistema.

Diante disso, é possível notar o delineamento de uma questão fortemente sistêmica, em que um aspecto age sobre os demais, criando uma teia de causas e efeitos. Por exemplo, a queima de combustíveis fósseis como força motriz para os transportes automotivos (TESTA, 2015), os quais, de maneira geral, são priorizados

nas cidades, provocam a poluição atmosférica que irá contribuir para a formação das ilhas de calor. São os mesmos modais de transporte automotivo que demandam infraestruturas de mobilidade que irão atuar na impermeabilização das superfícies (LEVY, 1999), agravando a problemática das ilhas de calor e gerando, também, problemas hidrológicos, conforme já discutido acima. Assim, a mobilidade urbana apresenta-se aqui como uma questão chave para o resgate de uma vinculação equilibrada entre os sistemas construído e natural: ao priorizar modais mais eficientes e limpos, bem como infraestruturas de suporte à mobilidade urbana menos rígidas e áridas, tem-se a possibilidade de mitigar as duas rupturas analisadas até o momento.

O terceiro elemento de ruptura apontado por Ferrão (2017) é o aquecimento global. Este fator é visto, de acordo com o autor, como uma resultante dos processos de poluição oriundos do aquecimento urbano e, também, da queima de combustíveis fósseis para a produção de energia destinada ao consumo doméstico, à produção industrial e à mobilidade urbana, principalmente no caso dos automóveis. Neste ponto, ressalta-se a perturbação da estabilidade dos sistemas naturais provocadas pelas dinâmicas produtivas contemporâneas baseadas no consumo progressivo de recursos naturais, no descarte igualmente constante de resíduos e em uma matriz energética não-renovável (CAVALCANTI, 2012), comprometendo não apenas a possibilidade de existência de uma sociedade humana no futuro, como também de outros seres vivos e sistemas naturais.

Outro ponto que deve ser apontado é a participação do aquecimento global nos processos de intensificação de eventos climáticos extremos (REI et al., 2017), levando a um aumento na frequência de desastres em meio urbano envolvendo a água, como alagamentos e enchentes, o que reforça, mais uma vez, as interseções observadas entre as diferentes rupturas e problemáticas ambientais que afligem o meio urbano. Ressalta-se, ainda, nessa dinâmica de aquecimento global a questão da sobreposição de escalas, muito abordada por Mostafavi (2014) em sua análise da questão urbana: processos desencadeados dentro do domínio e escala urbana apresentam desdobramentos globais, o que reforça não só a teoria do Antropoceno, tratada aqui neste capítulo, como também o perfil sistêmico que é inerente à disciplina do urbanismo e que, por vezes, é suprimida na prática da gestão do espaço construído.

Por fim, o último elemento de ruptura considerado por Ferrão (2017) consiste no empobrecimento das relações rural-urbano. Esse processo pode ser entendido a partir de Lefebvre (1972, p. 10):

O tecido urbano se prolifera, se estende, consumindo os resquícios de vida agrária. Por tecido urbano, não se compreende, de maneira estrita, a parte construída das cidades, mas o conjunto de manifestações do predomínio da cidade sobre o campo. A partir dessa perspectiva, uma casa de campo, uma autopista ou um supermercado em pleno campo formam parte do tecido urbano. Mais ou menos denso, mais ou menos compacto e ativo, somente escapam a sua influência as regiões estancadas ou decadentes, limitadas à “natureza”.²

Através desse excerto, é possível apontar como um dos fatores que levam à espacialização de tal ruptura a própria questão do espraiamento urbano, a partir do qual a cidade expande sua área de impacto por sobre o ambiente circundante. Mostafavi (2014) comenta esse aspecto não apenas sob a perspectiva da transformação da cobertura do solo, mas também dos desdobramentos da poluição do solo pelo descarte de resíduos produzidos na cidade; da poluição de cursos d’água, que carregam para fora do ambiente urbano os efluentes ali produzidos; da poluição do ar, que ocasiona a acidificação da pluviosidade para além dos limites urbanos; bem como dos próprios distúrbios ocasionados pelas rodovias que interconectam as cidades, as quais impactam com a geração de ruídos excessivos e na segregação de ecossistemas. Desse modo, o autor destaca a necessidade de reconhecer que as ações antrópicas, independente de suas escalas, interferem nos sistemas naturais para além do espaço intraurbano, ou seja, uma alteração realizada em um elemento natural dentro da mancha urbana apresenta desdobramentos também no ambiente rural circundante.

Outro aspecto associado a essa dinâmica é a artificialização das superfícies, vislumbradas no comentário da primeira vertente de ruptura apresentada nessa seção, a qual impacta na remoção da cobertura vegetal original do terreno. Com a criação dessa dicotomia espaço artificial *versus* espaço natural, as interações

² Tradução própria.

urbano-rurais se dissolvem, ao passo que se consolidam os locais onde a natureza pode continuar instalada e onde o espaço humano deve se constituir (LEFEBVRE, 1972). Portanto, reconhecer a importância de uma abordagem ecológica para com o planejamento e gestão do espaço construído, favorecendo o reequilíbrio das relações entre os sistemas natural e construído, é uma medida importante para o resgate dessas inter-relações tão benéficas para a harmonia de ambos os sistemas (MOSTAFAVI, 2014).

Concluindo o passeio pelas rupturas supracitadas, delineiam-se três campos principais de intervenção para mitigação do descolamento entre a cidade e o meio ambiente natural: o campo da mobilidade urbana, com atenção ao perfil de combustíveis utilizados nos modais de transporte, à priorização de modais coletivos e à infraestruturas de suporte menos áridas; o campo da ocupação do solo, reforçando a implementação de infraestruturas menos artificializadas e que permitam a atuação correta das dinâmicas naturais que participam do espaço construído, como é o caso das dinâmicas hidrológicas; e, finalmente, o campo da ecologia urbana, a qual permite que os ecossistemas típicos de determinada localidade da base biogeofísica possa interagir em sintonia com os espaços antrópicos, desfazendo a ruptura identificada na interface urbano-rural.

Cada um desses campos orienta à importância da revisão do paradigma urbano, fazendo com que as cidades sejam vistas como parte integrante dos ecossistemas. Nessa perspectiva, reconhece-se que o meio urbano é impactado pelas dinâmicas que se desdobram nos ecossistemas naturais, bem como os impactam, também, e, por vezes, os desestabilizam. Com a dissolução da ideia dos locais específicos de função urbana e de função natural, abre-se espaço para que seja reconhecida a responsabilidade das ações antrópicas sobre o sistema Terra, no qual as cidades são apenas uma das peças desse quebra-cabeça.

Logo, influenciar negativamente sobre o sistema Terra, é influenciar negativamente sobre as cidades e sobre a própria sociedade humana. Assim, é através dessa visão integrativa que surgem possibilidades de redefinição dos assentamentos humanos. Uma dessas possibilidades são as cidades biofílicas: matéria central abordada pela presente dissertação, à qual são dedicadas algumas linhas de estudo e discussão no capítulo subsequente.

3 A BIOFILIA URBANA



3 A BIOFILIA URBANA

Após um panorama sobre as causas e desdobramentos das rupturas na interface cidade-natureza, as quais intensificam o distanciamento do ambiente construído para com as dinâmicas inerentes aos sistemas naturais, o presente capítulo se debruça sobre algumas das possíveis alternativas para mitigação dessas rupturas, observando-as a partir das lentes do pensamento biofílico.

Wilson (1984) foi o responsável por organizar os princípios da teoria da biofilia, a qual defende a existência de um vínculo entre os seres humanos e os sistemas naturais necessário para o bom funcionamento dos mecanismos biológicos e psicológicos dos indivíduos. O autor destaca que grande parte do desenvolvimento da espécie humana se deu em um contexto *biocêntrico*, incluindo a forma de organização atual do cérebro. Desse modo, processos que demandaram milhares de anos para se constituir dificilmente podem ser substituídos por novos modos oriundos de apenas algumas centenas de anos de contexto *tecnocêntrico*. A humanidade ainda está atrelada biologicamente ao meio natural.

Contudo, com o avançar do fenômeno da urbanização no período posterior à Revolução Industrial, por razões referentes ao deslocamento da centralidade econômica do campo para as cidades, o distanciamento entre as matrizes antrópicas e naturais passou a se intensificar, refletindo na espacialização de um tecido construído cada vez mais alheio às dinâmicas da base biogeofísica local e, também, conduzido por essas rupturas na interface cidade-natureza. Ao notar esse movimento de cisão, Beatley (2011) propõe a implementação da teoria biofílica ao contexto urbano com o intuito de reconciliar ambos os contextos e permitir a reaproximação dos moradores das cidades para com a natureza, facilitando o acesso diário às feições naturais em meio à cidade e mitigando as interferências do ambiente construído sobre as dinâmicas e processos naturais que se desenvolvem no local. Processos esses que são fundamentais para o equilíbrio de todo o ecossistema, tanto construído quanto natural.

Isto posto, a abordagem deste capítulo se inclina à compreensão da temática da biofilia urbana a partir de discussões organizadas em três subcapítulos. O subcapítulo **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas** se ocupa em compreender o funcionamento do ciclo hidrológico e suas interseções com o ambiente

urbano a partir de um olhar matemático, explicitando as inter-relações de cada variável envolvida em seus processos e fluxos, além de contextualizar as dinâmicas abrangidas pelas soluções apontadas pela teoria biofílica. Essa abordagem matemática de processos e fluxos é fundamental para embasar os conceitos e estratégias apresentados na sequência. No subcapítulo **3.2 O Verde Urbano e os Recursos Hídricos**, o foco é direcionado para a influência das massas vegetais no ciclo hidrológico, destacando o papel da arborização e como ela atua na mitigação dos alagamentos. Por fim, o subcapítulo **3.3 As Estratégias Biofílicas** lança um olhar sobre a gama de estratégias que visam implantar o conceito de biofilia urbana no ambiente construído como uma forma de mitigar o distanciamento entre cidade e natureza materializado sob rupturas diversas, ilustrando, através de aplicações diversas, como o verde urbano atua na qualificação do ambiente urbano.

3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas

As dinâmicas hidrológicas observadas no meio natural obedecem a um conjunto de leis e padrões geofísicos que visam a manutenção do equilíbrio dos ecossistemas. Tundisi (2003) comenta que as características principais dessas dinâmicas são a instabilidade e a mobilidade, de modo que, sob a influência de fatores exógenos como a energia térmica solar, a força dos ventos e a força gravitacional, a água muda de estado físico e se desloca pela biosfera, formando o que se chama de ciclo hidrológico. Nesse ciclo, a água evapora e se move pela atmosfera sob o aspecto de nuvens e vapor de água. Com a mudança de pressão e temperatura, esse volume se precipita por sobre oceanos e continentes, infiltrando no solo e escoando, também, superficialmente pelo terreno e no leito de rios, através dos quais retornam aos oceanos em um montante equivalente a 47 mil km³ por ano. O processo descrito está ilustrado na Figura 02.

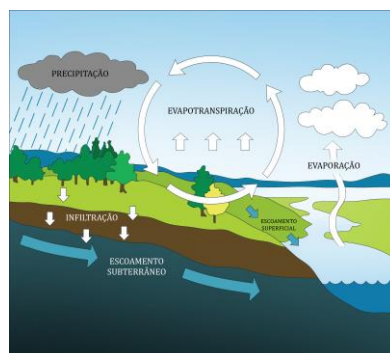


Figura 2. Esquema de ciclo hidrológico no meio natural. **Fonte:** Adaptado de SSWM (2010).

Como é possível notar na Figura 02, o ciclo hidrológico se mostra bastante equilibrado no meio natural. Devido à alta taxa de permeabilidade do solo, a água da chuva infiltra em grandes proporções, promovendo uma recarga eficiente do lençol freático. O volume excedente que não consegue infiltrar após a saturação do solo forma o escoamento superficial, que se desloca pela superfície do terreno, acumulando-se em várzeas ou seguindo seu percurso pelos corpos hídricos, pelos quais é drenado. Assim, para Pruski et al. (2014), todos os fatores que alteram a taxa de infiltração da água no solo também interferem no escoamento superficial. Desse modo, os autores subdividem os referidos fatores em dois grupos: o dos fatores agroclimáticos e o dos fisiográficos.

Os fatores agroclimáticos se referem, principalmente, à questão da cobertura vegetal do terreno. Quanto maior a disponibilidade de cobertura vegetal em um determinado local, menor a ocorrência do escoamento superficial. A influência da vegetação nas dinâmicas hidrológicas se deve à capacidade de interceptação da precipitação antes que a água atinja o solo e, também, à evapotranspiração, através da qual as plantas retiram a água do terreno e liberam na atmosfera sob a forma de vapor, de modo que, quanto maior a quantidade de plantas existentes em um local, menor será a umidade do mesmo e, conseqüentemente, maior a capacidade deste em absorver a água da chuva (PRUSKI et al., 2014).

Já os fatores fisiográficos se relacionam com as feições topográficas do terreno e com o tipo de solo. Ainda de acordo com os autores, a declividade da bacia hidrográfica interfere na vazão máxima de escoamento superficial, pois, quanto maior a declividade, também maior será o fluxo de escoamento superficial. Do mesmo modo, solos de composição mais argilosa tendem a oferecerem piores condições de drenagem, o que leva a um incremento no escoamento superficial.

Diante desses aspectos, é possível observar que, com o avanço da urbanização e a desnaturalização da cobertura do solo (TORREY, 2004), há uma desregulação do sistema hidrológico, o que faz com que um volume menor de água consiga infiltrar no solo dada a alta taxa de impermeabilização que é característica dos espaços urbanos. A impermeabilização do solo contribui, então, para um aumento na vazão do escoamento superficial. Dinâmica que leva a distúrbios ambientais na cidade, tais como alagamentos, enxurradas e, até mesmo, enchentes – quando os corpos hídricos carregam o volume excedente de água escoada e transbordam

(FRITZEN; BINDA, 2011). Esse processo de desequilíbrio no ciclo hidrológico observado em contexto urbano está ilustrado na Figura 03.

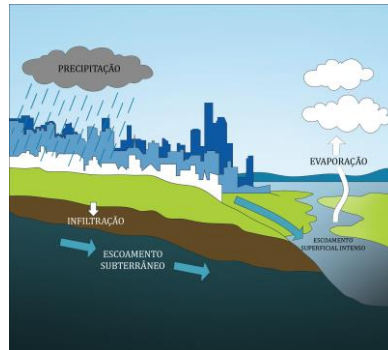


Figura 3. Esquema de ciclo hidrológico no meio urbano. **Fonte:** Adaptado de SSWM (2010).

Diante dos esquemas apresentados, percebe-se a influência do tipo de cobertura do solo nos processos de infiltração de águas pluviais no terreno, bem como da formação do escoamento superficial. Pruski et al. (2014) indicam que esses processos podem ser estimados através de um método de cálculo que relaciona o coeficiente de escoamento superficial (C) associado ao tipo de cobertura do solo, a intensidade máxima de precipitação do evento pluviométrico (i_m) e a área da bacia em análise (A). Esse método de cálculo é identificado como Método Racional e sua equação base está descrita na Figura 04.

$$Q_{max} = \frac{C \cdot i_m \cdot A}{360} \quad (1)$$

O Método Racional, de acordo com um levantamento de trabalhos acadêmicos realizado no portal de Periódicos da CAPES e no Google Acadêmico através das palavras-chave “cálculo”, “escoamento superficial” e “urbano”, para as disciplinas de Ciências da Terra e Engenharias, no período entre 2010 e 2020, compõe a estratégia mais recorrente para o cálculo de escoamento superficial, avaliando a efetividade de propostas de intervenções voltadas à mitigação de problemas de drenagem urbana em 52% dos trabalhos aderentes.

Pruski et al. (2014) explicam que, dentre os métodos existentes para estimativa do escoamento superficial, o Método Racional é o que apresenta maiores simplificações. Assim, ele é o método mais difundido, pelo fato de ser de fácil aplicação. Entretanto, os autores ressaltam que a metodologia não é indicada para

bacias muito extensas, pois os resultados obtidos tendem a sofrer desvios consideráveis. Logo, o Método Racional é ideal para o cálculo do escoamento superficial em bacias hidrográficas relativamente pequenas, em áreas urbanizadas, ou seja, sob influência de alta taxa de impermeabilidade, não ultrapassando a bacia a amplitude de 500 hectares. À vista disso, o Método Racional foi selecionado, pois o recorte geográfico delimitado corresponde a uma bacia hidrográfica localizada em área urbana, dotada de microbacias com áreas inferiores a 500 hectares.

Conforme exposto na Equação 1, a variável Q_{max} corresponde à vazão máxima de escoamento superficial, sendo calculada na unidade $m^3.s^{-1}$; C é um coeficiente adimensional de escoamento superficial característico de cada tipo de cobertura do solo; i_m é a intensidade máxima de precipitação do evento pluvial para uma duração média que seja igual ao tempo de concentração da bacia em análise, apresentada na unidade $mm.h^{-1}$; ao passo que A se refere à área da bacia hidrográfica calculada em hectares (ha). Para a definição do coeficiente de escoamento superficial (C), utilizam-se os valores adotados por Goldenfum e Tucci (1996) e Pruski et al. (2014). Tais valores são expressos na Tabela 01.

Tabela 01. Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial (C).

	Superfície	C	
		Intervalo	Valor Esperado
Pavimento	Asfalto	0,700 – 0,950	0,830
	Concreto	0,800 – 0,950	0,880
	Calçadas	0,750 – 0,850	0,800
	Telhado	0,750 – 0,950	0,850
	Terreno estéril ondulado	0,600 – 0,800	0,700
	Terreno estéril plano	0,500 – 0,700	0,600
	Bloco intertravado	0,700 – 0,850	0,780
	Paralelepípedo	0,500 – 0,700	0,600
	Concreto poroso	0,001 – 0,010	0,005
	Bloco intertravado com grama	0,020 – 0,040	0,030
	Asfalto poroso	0,100 – 0,001	0,050
	Telhado verde	0,350 – 0,250	0,300
	Cobertura: grama em solo arenoso	Plano (até 2%)	0,050 – 0,100
Declividade média (de 2% a 7%)		0,100 – 0,150	0,130
Declividade alta (acima de 7%)		0,150 – 0,200	0,180
Cobertura: grama em solo argiloso	Plano (até 2%)	0,130 – 0,170	0,150
	Declividade média (de 2% a 7%)	0,180 – 0,220	0,200
	Declividade alta (acima de 7%)	0,250 – 0,350	0,300

Fonte: Adaptado de Pruski et al. (2014), Araújo et al. (2000) e Goldenfum e Tucci (1996).

Por fim, para definir a intensidade máxima de precipitação (i_m), cujo valor será necessário para a utilização do Método Racional, aplica-se a equação também indicada por Pruski et al. (2014) e expressada a seguir.

$$i_m = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad (2)$$

De acordo com o exposto pela Equação 2, vê-se que T se refere ao período de retorno da precipitação, calculado em anos. Já as variáveis K, a, b e c são parâmetros de ajuste dos dados obtidos pela estação pluviométrica, em que K é medido em mm.min^c.h.anos^a, b em minutos, e a e c são adimensionais. A variável t, por sua vez, representa a duração do evento de precipitação analisado, medido em horas. Esse valor deve ser, em média, igual ao tempo de concentração da bacia em estudo.

Em termos de inter-relações entre as variáveis, destaca-se que a vazão máxima de escoamento superficial (Q_{max}) possui uma relação de direta de proporcionalidade com o coeficiente de escoamento superficial (C), com a intensidade máxima de precipitação (i_m) e a área da bacia (A). Logo, quanto maior o valor apresentado por essas variáveis, maior será a vazão de escoamento superficial. De todo modo, é necessário apontar que a intensidade máxima de precipitação e a área da bacia hidrográfica são fatores que, apesar de sofrerem com a ação antrópica, não podem ser facilmente controlados. Sendo assim, a única variável passível de interferência direta é aquela que representa o coeficiente de escoamento superficial (C), a qual pode ter seus valores reduzidos com o aumento da disponibilidade de áreas permeáveis, cuja distribuição tende a ser suprimida com o avanço da urbanização.

Outro ponto que deve ser comentado é que o Método Racional não considera de maneira explícita a interferência da vegetação na interceptação de águas pluviais e, assim, na redução da formação do escoamento superficial. Dinâmica comentada por Pruski et al. (2014) na apresentação dos fatores agroclimáticos que agem sobre o ciclo hidrológico. Nesse sentido, esta lacuna apresenta-se como um aspecto viável de ser explorado por esta dissertação em sua etapa propositiva, realizando ajustes na equação do Método Racional com fins de tornar perceptível e avaliar a ação da interceptação pluvial na vegetação sobre o escoamento superficial.

3.2 O Verde Urbano e os Recursos Hídricos

Herzog e Rosa (2010) indicam que as infraestruturas verdes, compreendidas como uma trama composta de áreas permeáveis e vegetadas interconectadas, desempenham funções importantes sob a ótica ambiental. Dentre essas funções, destaca-se a captura de carbono atmosférico e de partículas em suspensão, a redução da sedimentação de corpos hídricos por meio do efeito agregador de suas raízes e a interceptação de águas pluviais em suas copas, reduzindo a formação do escoamento superficial. Nesse contexto, segundo o ponto de vista das autoras, as árvores são elementos importantes para a estruturação das infraestruturas verdes, dado o seu porte, sendo, portanto, capazes de oferecerem uma combinação das funções supracitadas, as quais espécies de menor porte, como gramíneas e arbustos, não conseguem contemplar simultaneamente.

Tomando por enfoque a questão da interceptação pluvial, Paz (2004) comenta que essa dinâmica se dá pela própria característica obstrutiva que a estrutura da árvore oferece durante eventos de pluviosidade. As próprias folhas, galhos e tronco acabam por reter uma parcela da água da chuva antes que esta atinja o solo e, quando esses elementos recebem a radiação solar, a parcela de água retida evapora, deixando de participar do processo de formação do escoamento superficial. A este processo também se refere como efeito esponja (FOGEIRO, 2019), pois, à semelhança de uma esponja que tem a sua estrutura porosa embebida de água, mantendo-a sem derramar, as árvores e demais elementos vegetados também conseguem reproduzir tal mecanismo.

Entretanto, a capacidade de interceptação varia de acordo com a arquitetura da copa, tamanho das folhas, da estrutura do vegetal, rugosidade do tronco, bem como, pela intensidade da chuva (CAPPIELLA; SCHUELER; WRIGHT, 2005). Isso ocorre, pois, por exemplo: (1) com uma arquitetura densa de copa, a capacidade da árvore de reter uma parcela da pluviosidade aumenta; (2) se a árvore possuir um tamanho maior de folha, a área de superfície disponível para captar a água da chuva também é maior, logo a interceptação pluvial aumenta; (3) se o tronco possui uma alta rugosidade e textura esponjosa, ele também contribui para o aumento da capacidade de retenção pluvial; e, por fim, (4) em um contexto de chuva de alta intensidade, a árvore atinge o seu patamar de saturação de interceptação mais rápido,

retendo um volume menor de chuva, logo contribuindo menos para a redução do escoamento superficial.

De modo geral, Tucci (2000) defende que em um contexto de bacia hidrográfica arborizada, as árvores conseguem reter, sob determinadas condições de intensidade de precipitação, até 25% do volume precipitado sobre essa mesma bacia. Já Silva e Santos (2018) revelam que uma única árvore consegue interceptar até 49% da água chuva que cai sobre a área compreendida por sua copa, retendo esse volume em suas folhas e tronco antes que atinja o solo. López (2016), ao analisar a interceptação pluvial em um fragmento de Mata Atlântica, constatou que o dossel arbóreo, no contexto de melhor acurácia, foi capaz de interceptar, no máximo, 38,1% da pluviosidade. Fazio (2010), por sua vez, indica que uma árvore, antes de atingir seu ponto de saturação, pode reter em sua copa mais de 300 litros de água de chuva em eventos pluviais com volumes precipitados variando entre 25 e 50 mm. Ao extrapolar esse montante ao longo de um período de um ano, a contribuição das árvores para a redução do escoamento superficial pode chegar de 2 até 7%. Porém, se a arborização for combinada com outras estratégias, como aquelas que visem aumentar a permeabilidade do solo, o escoamento superficial pode ser reduzido em 65%.

Conforme exposto, é possível apontar para uma ausência de convergência entre os dados apresentados por diferentes autores. Isso se deve ao fato desses autores terem considerado em seus estudos contextos diversos, espécies distintas de árvores, escalas variadas e diferentes unidades de medida para a retenção pluvial, o que dificulta a identificação de um coeficiente comum para este parâmetro. De todo modo, o que se pode apreender desses cenários é que a arborização interfere nos processos e fluxos compreendidos no ciclo hidrológico, sobretudo na formação do escoamento superficial. Logo, desconsiderá-la nos cálculos para estimativa do escoamento superficial constitui-se como uma imprecisão, já que a implementação da arborização enquanto estratégia para mitigação de alagamentos e inundações emerge como sendo viável segundo os dados supracitados.

Isto posto, é importante considerar, inicialmente, que as chuvas de alta intensidade trazem uma maior possibilidade para a ocorrência de alagamentos urbanos, pois, se um volume grande de chuva é precipitado em um curto espaço de tempo, a chance de uma parte significativa desse montante não infiltrar no solo e se

acumular em áreas altamente impermeabilizadas também é alta. Sendo assim, para observar a influência da interceptação pluvial da arborização na redução do escoamento superficial e, por conseguinte, na mitigação do problema dos alagamentos, é importante verificar a performance das árvores no contexto de precipitação de alta intensidade.

Logo, com vistas a compreender melhor essa performance a partir do ponto de vista de diferentes espécies arbóreas, identificando as diferenças nas capacidades de interceptação pluvial a partir das características inerentes a cada tipo arbóreo, foi realizado um compilado da taxa de retenção observada a partir do estudo de espécies e autores distintos. As taxas de retenção foram organizadas em duas intensidades de eventos pluviais: baixa intensidade ($i_m > 25$ mm/h) e alta intensidade ($25 < i_m < 79,2$ mm/h), de modo a evidenciar a interferência da saturação sobre a capacidade de interceptação pluvial, bem como mensurar o quanto de volume pluvial as árvores são capazes de reter em uma situação de chuva de alta intensidade. É importante salientar que as faixas de precipitação em milímetros para baixa e alta intensidade foram definidas a partir das experiências de mapeamento de performance realizadas pelos autores identificados na busca. Assim, 79,2 milímetros foi a intensidade máxima de precipitação identificada nesses trabalhos. Os resultados dessa busca estão expressos na Tabela 02.

Tabela 02. Taxa de retenção pluvial por espécie e intensidade de chuva.

Autor	Espécie	Retenção ($i_m < 25$ mm/h)	Retenção ($25 < i_m < 79,2$ mm/h)
Silva e Santos (2018)	<i>Alchornea triplinervia</i>	49,13%	-
	<i>Peltophorum dubium</i>	32,17%	-
	<i>Tabebuia heptaphylla</i>	34,48%	-
Alves (2015)	<i>Mangifera indica</i>	29,85%	12,63%
	<i>Pachira aquatica</i>	33,58%	12,12%
	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	20,15%	7,45%
	<i>Licania tomentosa</i>	26,12%	9,59%
Silva et al. (2009)	<i>Tipuana tipu</i>	60%	-

Fonte: Silva e Santos (2018), Alves (2015) e Silva et al. (2009).

Conforme indicado na Tabela 02, ainda há uma quantidade incipiente de espécies arbóreas mapeadas a partir da performance de retenção pluvial, o que limita

uma compreensão mais aprofundada a respeito do comportamento de variadas espécies comumente utilizadas na arborização urbana no Brasil. Ademais, nem todos os estudos foram capazes de avaliar essa performance em eventos pluviais de alta intensidade, o que explica as lacunas presentes na tabela, restringindo ainda mais essa compreensão. Apesar dessas restrições, é possível notar uma variação nas taxas de retenção de acordo com cada espécie, devido às características específicas de cada uma, o que confirma a influência da arquitetura arbórea nesse fator. Outro ponto que pode ser enfatizado é a redução da capacidade de retenção pluvial em eventos de alta intensidade de chuva, atestando a influência da intensidade de precipitação na dinâmica retratada.

Como consequência das lacunas identificadas, algumas necessidades são delineadas de modo a permitir a efetivação da presente pesquisa: (1) a identificação de uma constante que demarque o decaimento da taxa de retenção após o alcance do ponto de saturação, para que seja produzida uma estimativa da taxa de retenção em eventos pluviais de alta intensidade para aqueles estudos que não conseguiram produzir esse dado; e (2) a definição de uma taxa de retenção pluvial comum para diferentes arquiteturas arbóreas a partir de estimativas e análises comparativas, visando ampliar o universo de espécies arbóreas contempladas na presente pesquisa. Tais necessidades devem ser observadas na produção da etapa propositiva desta dissertação.

Não obstante, os valores apresentados estão em sintonia com os conceitos referentes à efetividade da arborização na redução da sobrecarga sobre os sistemas de drenagem urbana, por meio da redução do volume pluvial destinado ao escoamento superficial. Ademais, também é possível mencionar o aumento da permeabilidade do solo, a redução da velocidade das águas da chuva pelo efeito obstrutivo das copas, o que permitindo um escoamento mais lento (TROWBRIDGE; BASSUK, 2004).

Para além desses aspectos hidrológicos, é válido manifestar que a arborização urbana também é aplicável para a produção de sombra, para a redução da poluição sonora, para o aumento da qualidade do ar através da captura de partículas em suspensão e pela normalização da umidade, para a amenização da temperatura do entorno imediato, além de seus efeitos estéticos e psicológicos (GRAZIANO, 1994), como apontado pela teoria da biofilia urbana.

Apesar de todos esses benefícios, a arborização, de maneira geral, vem sendo implementada no contexto urbano de forma alheia aos mais variados parâmetros que podem ser contemplados por meio de seus serviços ecossistêmicos, o que acaba por reduzir a sua efetividade na mitigação de problemas ambientais que impactam as cidades. É importante levar o olhar para além dos efeitos estéticos e de sombreamento, que, sobremaneira, tendem a direcionar a distribuição da cobertura arbórea em projetos de intervenção urbana (STAN et al., 2018). É justamente por esse aspecto que pesquisas e intercâmbios entre a academia e os órgãos de planejamento urbano são de grande relevância para a transformação do referido cenário.

3.3 As Estratégias Biofílicas

Conforme já discutido nesta pesquisa, o padrão de planejamento e construção das cidades, principalmente ao longo do século XX – período em que a urbanização foi alimentada pelos ideais modernos de desenvolvimento baseado na industrialização e no ordenamento controlado do território –, promoveu o desaparecimento de uma vasta parcela da cobertura vegetal e alterou drasticamente a caracterização da base biogeofísica sobre a qual o ambiente urbano se desenvolve. Assim, as cidades passaram a ser fontes de muitos dos impactos causados nos ecossistemas naturais e, por esse mesmo motivo, são os espaços com maior potencial para amenizar a pegada ecológica decorrente das atividades antrópicas (HERZOG, 2013).

Segundo Farr (2013), as infraestruturas cinzas são as principais ordenadoras do espaço urbano, entretanto as funções que desempenham são unilaterais, visando apenas o correto funcionamento das dinâmicas urbanas sem considerar os impactos e desdobramentos sobre as dinâmicas naturais. Como resultado, essas infraestruturas acabam ficando limitadas a um pré-dimensionamento vinculado a uma gama de eventos calculados, os quais vêm sendo cada vez mais rapidamente superados pelas transformações oriundas do acirramento climático e das próprias modificações no território, de modo que deixam de serem eficazes contra a ocorrência de problemas de ordem ambiental. Para além dessa obsolescência, deve-se destacar que essas mesmas infraestruturas acabam por ocupar áreas que seriam naturalmente alagadas e florestadas, as quais prestariam serviços ecológicos mais complexos e multifacetados, que, se incorporados harmoniosamente às dinâmicas urbanas, seriam mais eficientes diante de eventos climáticos extremos.

É com base nesse pensamento que um conjunto de propostas e conceitos vêm sendo desenvolvidos há algum tempo com a intenção de reaproximar cidade e natureza e, assim, mitigar os efeitos de uma urbanização predatória. Desde Law Olmsted, com o seu projeto do *Emerald Necklace*, criado entre os anos de 1878 e 1895, que consistia de um grande sistema de parques e áreas livres vegetadas para requalificação de cursos d'água na cidade de Boston (BONZI, 2015); passando por Ian McHarg (1969), que, já na década de 1960, teorizava sobre a importância de projetar em harmonia com a natureza, reconhecendo os locais inapropriados para a expansão urbana, como as bacias de alagamento, e permitindo que a natureza permanecesse a exercer suas dinâmicas e processos nestes locais; e, mais recentemente, o conceito de infraestrutura verde, lançado pelo *President's Council on Sustainable Development*, no Reino Unido, no ano de 1998, o qual considera que uma infraestrutura verde deveria promover uma abordagem atenta às variáveis que interagem com o espaço construído para conservar, proteger, restaurar e gerenciar sistemas locais e regionais de vida, recursos naturais e amenidades (MELL, 2008).

O que estes conceitos e estratégias apontados possuem em comum é a utilização de soluções baseadas na natureza para promover uma reconfiguração da espacialidade urbana de forma a restituir processos e fluxos naturais que foram descaracterizados pela urbanização. Com isso, amplia-se a capacidade de resiliência urbana diante de eventos climáticos extremos, ao passo que promove uma melhor fruição e integração dos espaços livres vegetados à vivência urbana cotidiana. Tais objetivos coadunam com o escopo apontado por Beatley (2011) em sua teoria da biofilia urbana.

O autor a define como uma relação de sinergia e dependência a níveis psicológicos e biológicos entre os seres humanos e a natureza, sendo um processo inato e de grande importância para a manutenção do equilíbrio dos ciclos biológicos observados no corpo humano e, também, de práticas sociais saudáveis. Nesse aspecto, Beatley (2011) reúne sob uma mesma égide conceitos e estratégias relacionados à sustentabilidade urbana, à psicologia ambiental e à vitalidade dos espaços públicos, de modo que a sustentabilidade deixa de ser apenas um paradigma que emerge como uma postura necessária para a mitigação dos efeitos negativos da urbanização no período pós-industrial e passa a se vincular a aspectos sensíveis nos campos biológico e social.

Farr (2013) considera a biofilia como uma etapa importante para a implementação e consolidação de um urbanismo sustentável, uma vez que a conexão e o acesso das pessoas à natureza e aos sistemas naturais dentro do ambiente urbano são, ao mesmo tempo, provocadores e resultantes de uma densidade urbana benéfica, da implantação de corredores de sustentabilidade e do desenvolvimento de edificações e infraestruturas de alto desempenho.

Já Lhumeau e Cordero (2012) entendem essas relações entre ecossistemas e indivíduos, principalmente se voltadas para o espectro da resiliência urbana, como adaptação baseada em ecossistemas. Para os autores, a gestão sustentável, a conservação e a restauração de ecossistemas, visando a oferta de serviços ecossistêmicos, mantêm e aumentam a resiliência dos assentamentos humanos e reduzem a vulnerabilidade dos sistemas naturais e das pessoas. Esse ponto de vista apresenta concordância com o conceito de biofilia urbana de Beatley (2011), pois ambos extrapolam a questão sustentável dos limites da preocupação energética e da conservação ambiental para incluir a segurança e o bem-estar humanos no rol de variáveis consideradas.

Logo, a biofilia urbana compreende todos os aspectos de um urbanismo sustentável no que tange à preocupação com o desenvolvimento de uma matriz energética renovável, à conservação e recuperação de ecossistemas, à reintegração das cidades com seu contexto natural. Porém, a diferença está na finalidade: enquanto a sustentabilidade urbana é orientada ao meio ambiente e à possibilidade de sobrevivência e bem-estar das gerações futuras, a biofilia urbana integra o ser humano a todo esse contexto, preocupando-se em utilizar de todas essas transformações sugeridas para promover uma vivência urbana mais humanizada e saudável. Ou seja, há toda uma inclusão de um tom de subjetividade da experiência individual na cidade e seu equilíbrio para com os ciclos e processos naturais que englobam o ambiente urbano.

Contudo, há de se ressaltar que a defesa expressa por esta dissertação não é a da completa substituição das infraestruturas cinzas monofuncionais pelas infraestruturas verdes, mas sim da combinação de ambas as estratégias. Bonatto (2015) afirma que a utilização de infraestruturas verdes consorciadas às infraestruturas cinzas se constitui como uma alternativa viável para a drenagem urbana. Concomitantemente, tal alternativa contribui para a redução da problemática da progressiva obsolescência das infraestruturas de drenagem tradicional frente às

mudanças climáticas, além de reaproximar a cidade da natureza através de um planejamento urbano integrado ao planejamento ambiental.

Tendo isso sido compreendido, é momento de encaminhar o olhar para as estratégias que a biofilia urbana propõe para a reestruturação das cidades visando a criação de uma vinculação harmoniosa em sua interface com a natureza. Beatley (2011) entende a biofilia em um sentido multiescalar, fazendo com que as estratégias contemplem os diferentes níveis de organização urbana: da edificação ao âmbito regional. Por meio da implementação transversal dessas estratégias, garante-se que a biofilia atue em camadas no tecido construído, contribuindo cumulativamente para o reequilíbrio da ecologia e clima urbanos e para a recuperação da natureza existente através de sua integração às infraestruturas construídas. A Tabela 03 sintetiza a distribuição multiescalar das estratégias biofílicas.

Tabela 03. Panorama multiescalar das estratégias relacionadas à biofilia urbana.

	Estratégia
Edificação	Telhado verde Paredes verdes Edifícios-jardim (jardins verticais) Átrios ajardinados Uso de iluminação e ventilação naturais Uso de vidro pouco refletivo
Quadra	Arborização de calçadas <i>Pocket parks</i> Jardins de chuva Pavimentação permeável
Rua	Corredores verdes Arborização urbana em canteiro central Pavimentação permeável Biovaletas Paisagismo multissensorial e comestível Redução do espaço dedicado aos automóveis <i>Traffic calming</i>
Bairro	Renaturalização de corpos hídricos Hortas comunitárias Bacias de retenção de águas pluviais Parques urbanos Permeabilidade à iluminação e ventilação naturais Permeabilidade do tecido urbano ao pedestre e ciclista Diversificação de usos e apropriações dos espaços
Espaço Intraurbano	Espaços para educação ecológica Transporte coletivo de baixo carbono Recuperação e renaturalização de rios urbanos Vinculação de corredores ecológicos aos rios urbanos (paisagismo ciliar) Redes de conexão com os sistemas de áreas verdes intrabairros
Região	Sistemas de áreas verdes urbano-rural-urbano Recuperação e renaturalização de bacias hidrográficas

Fonte: Adaptado de Beatley (2016), Kellert (2018) e Moraes *et al.* (2020).

Como visto, as estratégias relacionadas à biofilia urbana compreendem uma extensa lista de ações complementares e interconectadas em suas diferentes escalas dentro e fora do tecido urbano. Assim, é possível notar a proposição de um sistema de ramificações cada vez mais complexas integrando a edificação ao âmbito regional. Esse sistema contempla tanto o verde urbano quanto a questão hidrológica, perpassando pela humanização dos espaços urbanos e atentando-se, também, a especificidades como o controle e reequilíbrio do microclima das cidades.

Na perspectiva do verde urbano, observa-se a criação de um circuito que inicia no contexto da edificação, com a implantação de telhados e paredes verdes ou de átrios ajardinados. Esses elementos se conectam à quadra com a arborização de calçadas, a implantação de *pocket parks* e de jardins de chuva³; e seguem pela rua através da implementação de corredores verdes, arborização em canteiro central e de demais aspectos paisagísticos. Através da rua, essas massas vegetadas se conectam a áreas maiores dentro do bairro, como parques e hortas urbanas; que, por sua vez, se integram à vegetação ciliar ao longo dos corpos hídricos. Assim, esse circuito extrapola a dimensão urbana e se conecta a áreas vegetadas no ambiente rural, bem como a sistemas de espaços verdes de outras cidades. Essas conexões permitem um fluxo gênico benéfico para biodiversidade da fauna e da flora, além de possibilitar uma distribuição e integração mais homogênea da natureza com o ambiente construído (BEATLEY, 2016). A Figura 04 apresenta um esquema do circuito de estratégias para áreas verdes.

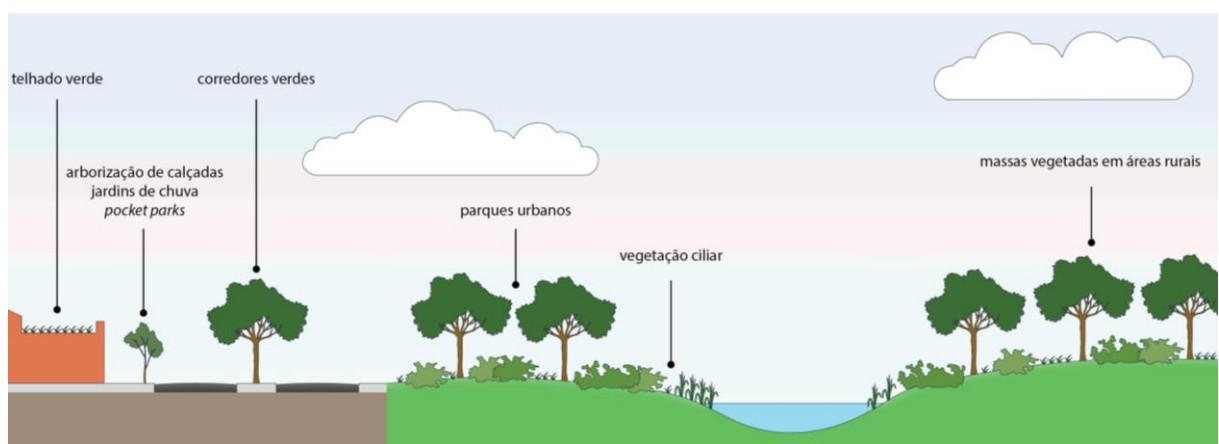


Figura 04. Circuito de estratégias biofílicas para o verde urbano. **Fonte:** O autor, 2022.

³ Canteiros, geralmente instalados nas calçadas, para auxiliar no aumento da permeabilidade de águas pluviais e, assim, reduzir a pressão sobre os sistemas de drenagem convencional.

Já na perspectiva hidrológica, o circuito proposto também se inicia na edificação, com os telhados e paredes verdes, os quais contribuem para a redução do volume de águas pluviais escoado para os sistemas de drenagem urbana. Na sequência, na dimensão da quadra, o cuidado com essa questão hídrica se apresenta na instalação dos jardins de chuva e da pavimentação permeável, além da arborização das calçadas, que, atuando em conjunto, promovem a redução do escoamento superficial. O volume de água da chuva que não é retido pela vegetação e não penetra no solo escoar através das biovaletas instaladas nas ruas e segue para espaços mais complexos na dimensão do bairro, como as bacias de retenção, e para além do bairro, atingindo os cursos d'água que permeiam a cidade. Toda essa ação conjunta de infraestruturas naturais contribui para restituir o equilíbrio das bacias hidrográficas, reduzindo a ocorrência de alagamentos, enchentes e quedas drásticas no volume de água disponível durante os períodos de estiagem longa (SILVEIRA, 2018). A Figura 05 apresenta um esquema do circuito hidrológico.

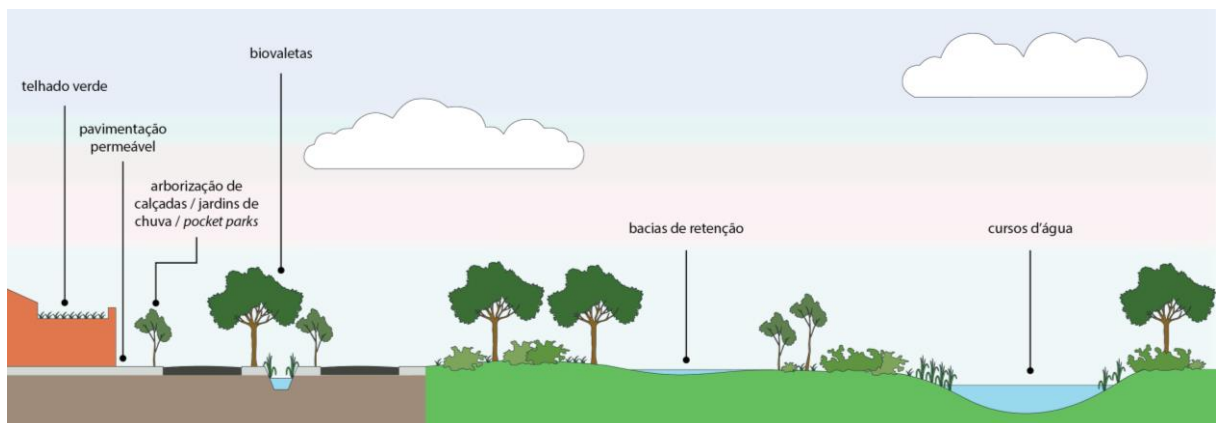


Figura 05. Circuito de estratégias biofílicas para o reequilíbrio hidrológico. **Fonte:** O autor, 2022.

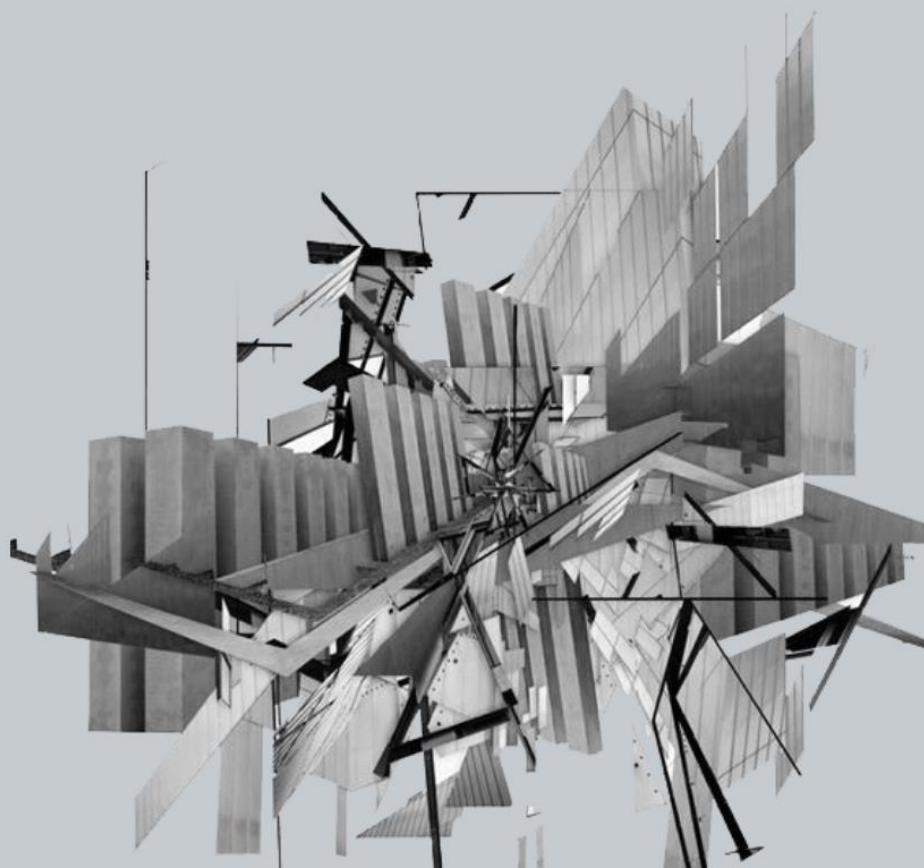
Também é possível notar a indicação de um conjunto de estratégias relacionadas ao microclima urbano, como a utilização de vidro pouco refletivo nas edificações, o que contribui para a redução das ilhas de calor. Ações voltadas para a humanização dos espaços públicos através da diminuição da disponibilidade de área dedicada a automóveis também são contempladas, envolvendo, ainda, a implantação de mecanismos de *traffic calming* e pela valorização do deslocamento pedonal ou por bicicleta, os quais permitem uma interação direta entre o indivíduo e as feições naturais.

Para que essas estratégias consigam potencializar os serviços ecossistêmicos prestados pelas infraestruturas verdes, Beatley (2011) recomenda

que a mancha urbana tenha, em média, 40% de cobertura arbórea, podendo ser menos densa em áreas centrais e mais densa em regiões periféricas do tecido urbano, mesclando-se ao entorno rural.

É importante salientar que os circuitos que contemplam as áreas verdes e o reequilíbrio do ciclo hidrológico urbano não competem entre si, ou seja, a implementação de um perfil de estratégia não anula ou impede a utilização de outro. Ambos podem ser combinados para a potencialização dos benefícios almejados no contexto urbano. À vista disso, compreende-se o caráter holístico que caracteriza a biofilia urbana, auxiliando na harmonização do ambiente construído junto ao natural, incluindo nesse processo a valorização de espaços urbanos humanizados, além da redução da pegada ecológica decorrente das dinâmicas antrópicas.

4 A ABORDAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA



4 A ABORDAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA

Este capítulo se dedica à compreensão das tecnologias algorítmico-paramétricas aplicadas à prática da Arquitetura e do Urbanismo. Lima, Costa e Rosa (2020) entendem que esse tipo de abordagem implica a necessidade de especificação de parâmetros que interagem com um contexto específico, seja ele um objeto ou um espaço urbano. Esses parâmetros irão, então, compor um conjunto codificado de regras ou relações lógicas, as quais, através de um processo de programação, irão permitir o gerenciamento de dados e a realização de operações lógicas, servindo como suporte às mais diversas tarefas.

Isto posto, o presente capítulo explora o processo de incorporação das tecnologias algorítmico-paramétricas no contexto da Arquitetura e do Urbanismo, investigando os movimentos que se sucederam nesse processo até culminar no presente estágio de transição entre práticas e ferramentais. Além disso, delineiam-se as possíveis contribuições dessas tecnologias para o desenvolvimento da presente pesquisa, fundamentando as escolhas realizadas na definição dos recortes temáticos e metodológicos.

Assim, no subcapítulo **4.1 Tecnologias Algorítmico-Paramétricas Aplicadas ao Projeto**, traça-se um panorama histórico que contempla as principais teorias, processos e experimentações desenvolvidas que fazem parte do arcabouço evolutivo das tecnologias algorítmico-paramétricas no contexto da Arquitetura e do Urbanismo. Após a realização dessa contextualização, o subcapítulo **4.2 Interseções e Contribuições para a Pesquisa** se volta para a identificação das contribuições dessa abordagem tecnológica para o presente trabalho e suas possíveis aplicabilidades nas diferentes etapas de desenvolvimento das atividades exploratórias. Para subsidiar essas discussões, serão realizados paralelos entre o objeto de interesse desta pesquisa e alguns estudos correlatos à tônica da qualidade ambiental urbana e das análises de dados no processo de desenho paramétrico.

4.1 Tecnologias Algorítmico-Paramétricas Aplicadas ao Projeto

Castells (2010) afirma que o processo de evolução das tecnologias digitais ocorre em um movimento contínuo, o qual o autor define como um *loop* cumulativo. Esse movimento é formado pela descoberta de uma inovação inicial, que possibilita a geração de novos conhecimentos e ferramentas, que irão, por sua vez, permitir o

acesso a mais conhecimentos e inovações, que levam novamente a novos saberes e suas aplicações em novas ferramentas. Assim, a revolução desencadeada pelas tecnologias digitais possui dois centros: o conhecimento e sua aplicação.

Pelo fato de o ato de projetar estar intimamente ligado ao processamento de informação, o desenvolvimento de ferramentas digitais para facilitar a coleta e a análise de dados para uma posterior implementação no projeto sob a forma de soluções é algo, sem dúvida, bastante enriquecedor (KALAY, 2006). Desse modo, as tecnologias digitais encontraram terreno fértil ao serem utilizadas como ferramentas de projeto.

Ao tomar a dinâmica descrita por Castells (2010) como guia para o estudo do desenvolvimento e aplicação das tecnologias digitais no ato de projetar, tem-se que o primeiro estágio desse desenvolvimento tecnológico ocorreu com a possibilidade do desenho digital através da utilização dos sistemas CAD (*Computer-Aided Design*) em representação bidimensional. Um exemplo dessa tecnologia são as próprias pranchetas virtuais do software AutoCAD. Com o surgimento da possibilidade de representação tridimensional dentro desse nicho de tecnologia, o segundo estágio foi, então, caracterizado pela aplicabilidade desse modelo de representação na questão da visualização de projeto, gerando simulações volumétricas e a produção de perspectivas digitais (HOWELL; BATCHELER, 2005).

O terceiro momento desse processo é marcado pelos sistemas CAD orientados ao objeto, ou OOCAD (*Object Oriented Computer-Aided Design*), os quais permitem a representação das funcionalidades e comportamentos de elementos que compõem um edifício. Nesse tipo de sistema, o BIM (*Building Information Modelling*) se consolidou como a tecnologia mais proeminente, já que possibilita a análise dos modelos simulados a partir de diferentes parâmetros. O avanço oferecido por esta tecnologia está, justamente, na questão da parametrização, pois seu processo de representação está calcado na utilização de parâmetros que irão definir a forma e as propriedades físicas dos objetos modelados, gerando, então, arquivos com modelos digitais dotados de informação construtiva (EASTMAN et al., 2014).

O quarto momento compreende o atual estágio de aplicação tecnológica, que se utiliza dos modelos algorítmico-paramétricos, os quais se empregam de algoritmos para a modelagem de formas e para a análise de variáveis que permeiam o contexto projetual, ambos cada vez mais vinculados a procedimentos autônomos, como a inteligência artificial. Shea, Aish e Gourtovaia (2005) entendem que a

parametrização alterou o papel do computador no processo de projeto, transformando a sua atuação enquanto ferramenta passiva em suporte ativo ao executar atividades nas mais diversas etapas do projeto com alguma autonomia, principalmente no caso dos sistemas generativos.

Por outro lado, é fundamental salientar que o pensamento paramétrico de projeto não é necessariamente fruto, em sua essência, da evolução tecnológica. Godoi (2018) indica que o pensamento paramétrico está presente nos processos e práticas arquitetônicas desde o Renascimento, pelo menos, quando, a partir de estudos da obra de Alberti, importante arquiteto italiano do período, foi possível apontar para o uso de parâmetros na concepção projetual. Nesse sentido, o parâmetro é compreendido como um elemento bem definido, ao qual se pode atribuir um valor, ou seja, é uma variável matematizável. Um exemplo desse perfil objetivo e matemático que caracteriza o parâmetro está no registro de uma descrição de processos projetuais de Alberti, retratada por Godoi (2018, p. 36):

[...] Faça-se de tal forma que em nenhum sítio seja menos do que um quinto da largura do espaço vazio, e em nenhum sítio mais largo do que um terço, ou onde pretenderes que as capelas sejam muito fechadas, do que metade. Nas áreas circulares, se o número das capelas for seis, darás com que tais separadores, isto é, a ossatura e a parte sólida da parede tenham metade da abertura, mas, se houver oito aberturas, farás com que a abertura e a parte sólida sejam iguais; se o número de ângulos for grande, dar-se-á um separador com um terço da largura da capela.

Por meio desse excerto, é possível compreender que Alberti estabeleceu uma série de critérios e proporções a serem seguidas, relacionando aberturas de vãos com a largura total do espaço, bem como com a distribuição da “ossatura”, ou, em outras palavras, os elementos estruturais que sustentam a composição. Logo, pode-se entender tal descrição como uma listagem de parâmetros pelo fato de apresentar uma relação entre elementos claros e quantificáveis, como “um quinto”, ou “um terço”, ou “metade”.

Mais recentemente, na década de 1970, outro exemplo de arquiteto e engenheiro que se utilizou do pensamento paramétrico de forma analógica para a

modelagem de estruturas complexas conhecidas como abóbadas gaussianas foi o argentino Eladio Dieste. De acordo com Melachos (2020), para tornar possível a execução das peças de fôrma em madeira para a moldagem da estrutura abobadada, era necessário produzir pranchas de geometria contendo tabelas e esquemas gráficos de seções transversais e longitudinais das peças estruturais com as coordenadas de cada ponto que compunha a curvatura almejada. Mais uma vez, percebe-se a aplicação de variáveis claras para balizar a execução do projeto, neste caso, sendo a altura de cada ponto e suas respectivas distâncias acumuladas, atreladas a um valor predefinido. Essa metodologia era importante para permitir uma execução perfeita de uma curvatura gaussiana, seguindo as proporções devidas, necessárias para a isostasia estrutural. A Figura 06 demonstra um desses esquemas gráficos utilizados para a interpretação e execução da modelagem estrutural concebida.

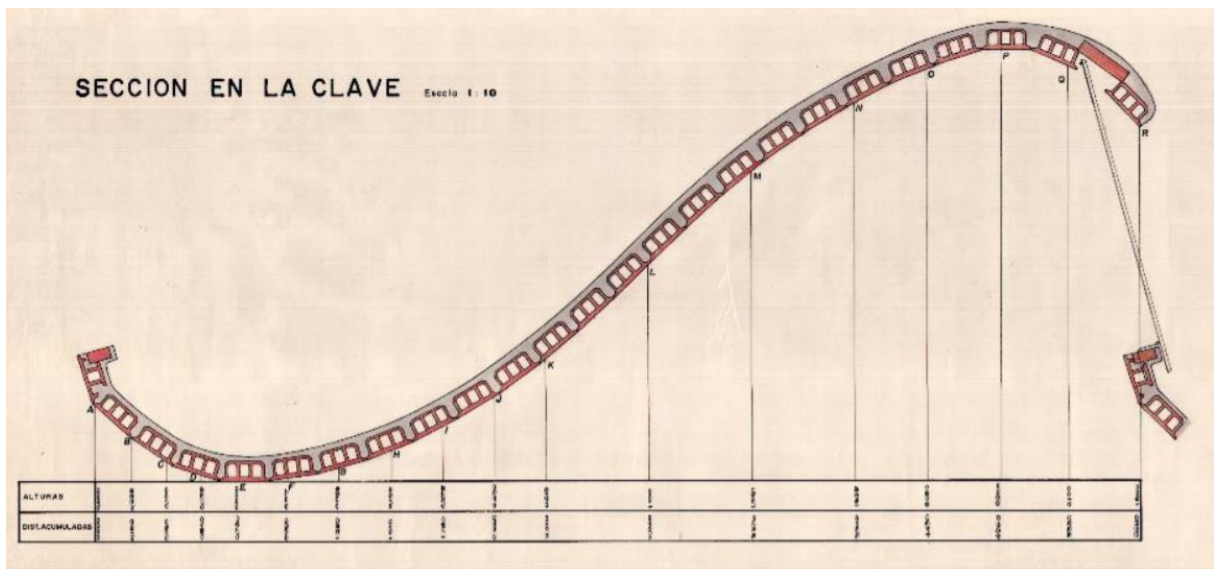


Figura 06. Esquema de seção estrutural com a indicação de pontos e suas respectivas coordenadas de alturas e distâncias acumuladas. **Fonte:** Acervo UDELAR (2017) apud. Melachos (2020, p. 193).

Com isso, esclarece-se que as bases do pensamento paramétrico já estavam lançadas nos processos e práticas da arquitetura há algum tempo. A revolução tecnológica, contudo, foi importante para automatizar e simplificar a aplicação dessa metodologia, antes muito laboriosa e restrita a um grupo de arquitetos que se aventuravam nos campos mais relacionados à técnica arquitetônica, na busca pela execução de geometrias complexas, o que demandava o domínio de métodos mais racionais de desenho.

Isso se justifica, pois, o pensamento paramétrico se assenta sobre a definição de critérios relevantes que guiarão o desenvolvimento do projeto. Assim, não se depende exclusivamente de tecnologias digitais, uma vez que o desenho baseado em critérios pode ser executado até mesmo com aparatos analógicos e manuais. O essencial nesse processo é a discriminação de parâmetros claros, aos quais podem-se atribuir valores, ou seja, um parâmetro é um elemento, necessariamente, objetivo e *matematizável*. Conforme Menges e Ahlquist (2011), a metodologia paramétrica compreende um conjunto de métodos que estabelecem relações entre formas e forças, representando essas relações através de regras associativas. Logo, as soluções obtidas obedecem a regras previamente designadas.

Woodbury (2010) considera que o pensamento paramétrico é compreendido por três características principais: pensamento abstrato, pensamento matemático e pensamento algorítmico. O pensamento abstrato permite que o pensamento paramétrico alcance uma dimensão conceitual, permitindo, assim, a identificação das variáveis que compõem determinado problema de projeto e as relações entre si. O pensamento matemático atua na aplicação de teoremas e equações delimitadas para definir a relação entre as regras definidas pelo pensamento abstrato para o processamento de soluções para o problema. Já o pensamento algorítmico é aplicado no uso de algoritmos para processar digitalmente o fluxo dado-produto, ou seja, entre a informação coletada e a solução gerada.

Por outro lado, apesar das obras de Alberti e Dieste conterem indícios de uma “protoparametrização”, com o uso de aparatos analógicos, o emprego explícito do termo paramétrico no campo da Arquitetura surgiu na década de 1940 com o arquiteto italiano Luigi Moretti. O arquiteto investigava as relações entre o objeto arquitetônico e a gama de variáveis com as quais este interagia, tentando traçar soluções formais dentro de um limite ótimo que abrangesse essas variáveis (FRAZER, 2016). Anos mais tarde, já na década de 1960, munido de um computador IBM 610, Moretti projetou uma série de estádios com fins de experimentar como as soluções formais para essa tipologia de edifício podem ser transformadas a partir da consideração de 19 parâmetros distintos, como enquadramentos visuais, custo de materiais, entre outros (DAVIS, 2013). A Figura 07 apresenta um esquema de soluções desenvolvidas por Moretti para a composição volumétrica de um estádio.

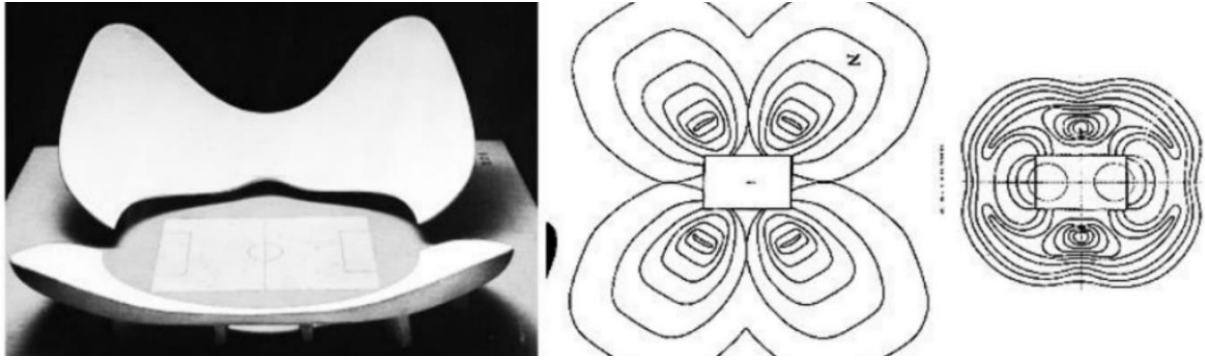


Figura 07. Esquema de soluções formais desenvolvidas por Moretti para uma proposta de estádio.

Fonte: Bucci e Mulazzani (2002, p. 114).

Nesse mesmo período, as primeiras investigações acerca do uso do computador como ferramenta para o projeto também estavam em andamento. A partir da década de 1970, os experimentos práticos passaram a ser mais frequentes dentro desse nicho. Entretanto, por se tratar de um estágio inicial, a maioria desses experimentos tomava o computador por ferramenta passiva no auxílio à execução do desenho, sem questionar a possibilidade de uma participação mais autônoma (FRAZER, 2016). No escopo geral da prática profissional da Arquitetura, ainda hoje se verifica que esse tipo de postura é um tanto quanto comum, com a utilização de ferramentas e métodos oriundos do primeiro e do segundo estágio de implementação computacional na profissão, conforme abordado no início deste subcapítulo.

As primeiras explorações envolvendo a criação de interfaces digitais para auxiliar no projeto foram realizadas a partir de 1970, abrindo espaço para uma participação mais autônoma do computador. Essas interfaces eram voltadas para o suporte na organização da disposição dos ambientes em planta baixa, com a intenção de facilitar o desenvolvimento de tarefas ditas não-criativas, por meio de um sistema semiautomático no qual o usuário inseria os dados necessários para o dimensionamento dos ambientes e sua posterior combinação. Depois, era necessário um trabalho de curadoria para o ajustamento das soluções mais adequadas (MITCHELL, 1970; EASTMAN, 1971).

Foi Stiny e Mitchell (1978) que criaram uma alternativa para uma aplicação mais direta do uso dos algoritmos na produção arquitetônica através de uma gramática da forma paramétrica. Essa pesquisa, de maneira específica, buscava reproduzir a planta da *Villa Malcontenta*, de Palladio, por meio das regras apontadas para a arquitetura clássica pelo próprio arquiteto nos *Quattro Libri*. O processo de produção da planta seguia o cumprimento de oito etapas: (1) a conformação da malha,

(2) a definição dos limites externos, (3) a disposição dos cômodos, (4) o ajuste do traçado das divisórias internas, (5) a inserção das entradas principais e inflexões das paredes exteriores, (6) a aplicação da ornamentação exteriores, (7) a disposição de janelas e portas e (8) a finalização. Para cada uma dessas etapas, existe um conjunto de regras que permitem a criação de um universo de soluções variadas, as quais, por meio de um cálculo de análise combinatória, embutida no próprio fluxograma interno dos algoritmos, permitiam enumerar todas as conformações possíveis para a *Villa Malcontenta*.

Com isso, constata-se que o movimento de assimilação dos procedimentos algorítmico-paramétricos no contexto da Arquitetura e do Urbanismo seguiu, também, a incorporação da noção diagramática, já aplicada ao pensamento cibernético, em pleno florescimento na época. Para Somol (1999), o diagrama se configura como uma abstração do real, logo atuando no continuum da forma e da palavra, do espaço e da linguagem, e se transformando, em última instância, em um instrumento muito mais performativo do que representativo. Assim, as redes e fluxos de algoritmos nada mais são do que diagramas de regras a serem combinadas e seguidas.

Nessa tônica, as experimentações em torno da parametrização seguiram por muito tempo por um viés plástico-formal, abordando a questão da gramática da forma para plantas baixas e masterplans. Ademais, a modelagem de formas arquitetônicas complexas também era explorada, muitas vezes atrelada a técnicas de prototipagem rápida, novos materiais e processos construtivos automatizados, promovendo o avanço do que se chama de fabricação digital (KOLAREVIC, 2003). A expoente desse viés de experimentações, sem dúvida, foi a arquiteta Zaha Hadid, legando uma série de contribuições para a arquitetura contemporânea, tanto do ponto de vista estético quanto sob a ótica das tecnologias da construção.

Tedeschi (2021) comenta que a diferença entre a modelagem digital convencional e a modelagem digital que explora a lógica algorítmico-paramétrica é que a segunda não está em busca de desenhar formas, mas, sim, regras. São essas regras e o fluxo lógico de dados construído a partir delas que irão definir o acervo de soluções formais a ser obtido. Com isso, observa-se que as características plásticas de um projeto passam a interagir mais intimamente com as variáveis que permeiam seu contexto do que apenas com questões relacionadas à estética. Atrela-se, assim, forma à solução.

Esse conceito de forma atrelada à solução, pode ser apontado como um legado do Manifesto Parametricista de Schumacher (2008) em defesa dessas metodologias emergentes de projeto. O manifesto visava estabelecer bases, ou, como o autor intitula, as heurísticas, para as próximas explorações acadêmicas e profissionais que contemplassem a temática da parametrização, sendo permeado por um viés formalista, que abrangia desde o objeto arquitetônico ao desenho urbano.

Apesar da preponderância de uma preocupação formal, Schumacher (2008) também aborda, ainda que difusamente, tópicos vinculados a um olhar mais humano para com a questão da conformação dos espaços urbanos, principalmente quando o autor cuida de pormenorizar a heurística da articulação de subsistemas, com a menção à gradação dos campos de usos pela trama urbana, à variação de cenários sociais calibrados por parâmetros correlacionados à dinâmica local e ao pensamento em termos de redes de interação indivíduo-ambiente.

Essa heurística apresenta indícios de um encaminhamento da abordagem algorítmico-paramétrica para além das questões formais, adentrando, então, o campo da análise paramétrica, cujo papel é o de orientar na avaliação de cenários e de performances de determinadas propostas. Essa abordagem contribui para prever os possíveis desdobramentos da execução do projeto e para a escolha das soluções que melhor se adequam ao contexto. Como abordado anteriormente, esse processo de análise e curadoria de propostas por meio da aplicação de algoritmos tem possibilitado uma atuação cada vez mais autônoma do computador, o que empodera o projetista com um ferramental arguto em sua prática.

Um caso de ferramenta algorítmico-paramétrica voltada à análise de cenários de projeto é o *CityMetrics*, idealizado por Lima (2017a). Baseando-se em um conjunto de parâmetros e normas desenvolvidas em torno da temática do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte – DOT, a ferramenta permite avaliar aspectos relacionados à densidade construída, distribuição de modais de transporte e tempo de caminhada, por exemplo, com vistas a qualificar e, até mesmo, conduzir a implementação de propostas para o DOT em recortes urbanos. Assim, como proposto por Schumacher (2008) na questão da articulação de subsistemas, Lima (2017a) aplica em sua ferramenta a calibração de cenários e a combinação de variáveis distintas, porém, interrelacionadas, para a construção de análises complexas.

À vista disso, compreende-se que a abordagem algorítmico-paramétrica nasce através da vontade de explorar as possibilidades da implementação das tecnologias digitais como suporte ao desenho. Com o avançar dos estudos, descobriu-se que para além de uma ferramenta passiva aplicável ao desenvolvimento de desenhos, o computador também pode se transformar em um importante aliado na tomada de decisões projetuais, o que se configura como uma contribuição significativa das tecnologias para o exercício profissional da Arquitetura e do Urbanismo.

Destaca-se, principalmente, a aplicabilidade dessas ferramentas na análise de cenários diversos, que está em sintonia com os objetivos programados para esta dissertação, pois esse direcionamento sintetiza de forma bastante clara a base conceitual apontada por diferentes autores sobre a capacidade algorítmica de representação virtual de relações entre variáveis que compõe um determinado problema de projeto.

Nesse sentido, as variáveis contempladas na confecção de uma ferramenta algorítmico-paramétrica podem, por exemplo, estar vinculadas a situações variadas, envolvendo desde o escopo social, passando pelo ambiental e indo até o plástico-formal. Desse modo, é possível vislumbrar não apenas a dimensão superficial do projeto, entendida como a forma, a volumetria e os traçados, mas também sua dimensão profunda, onde o projeto interage com as mais diferentes dinâmicas que compõe o espaço urbano.

Logo, pode-se afirmar que as ferramentas algorítmico-paramétricas equipam o projeto com possibilidades de simulações e análises do impacto de determinada proposta sobre um matiz extenso de dinâmicas, cuja identificação depende do crivo dos profissionais envolvidos, contribuindo para o aprimoramento progressivo da proposta projetual e criando soluções mais afinadas à realidade que se constrói no espaço urbano e social.

4.2 Interseções e Contribuições para a Pesquisa

Retomando as informações expostas no subcapítulo anterior, compreende-se que a utilização de ferramentas digitais na concepção de propostas arquitetônicas e urbanísticas permite uma maior compreensão das dinâmicas e processos que interagem com o produto projetual a ser desenvolvido. Para Makert e Alves (2016), a concepção de um projeto reflete a interação de diferentes fatores envolvidos no contexto de projeto, como a realidade sociocultural, os mecanismos de regulação

urbana e o cenário ambiental. Diferente do contexto de projeção modernista, no qual entendia-se que o próprio cenário impunha a solução ideal, constituindo, então, um panorama bastante rígido; o contexto sociocultural contemporâneo exige um processo criativo que permita alterações ao longo de seu desenvolvimento para que se torne cada vez mais afinado à complexidade de dinâmicas com as quais irá interagir. Com isso, o projetista necessita estar habilitado a gerir e a manipular informações e dados disponíveis, além de ser capaz de interpretar a identidade sociocultural e ambiental de seu contexto para que estes sejam inseridos no projeto (DE MORAES, 2010).

A rigidez característica do projeto modernista, comentada por Santos (2006) como sendo resultado da utilização da ciência e da técnica em função do capital e do poder, promoveu o surgimento de segregações. As vocações locais eram suprimidas para ceder espaço a uma ordenação racional de funções e usos sobre o território. Conforme discutido no capítulo **2 A CIDADE NO ANTROPOCENO**, essa abordagem de planejamento urbano legou não apenas rupturas do ponto de vista social e funcional, como também, e principalmente, da perspectiva ambiental, através de drásticas transformações na paisagem, com o alastramento de infraestruturas construídas desvinculadas do contexto natural antes observado na região. Sob essa mesma perspectiva, as vocações locais para o ambiente (MCHARG, 1969) continuam a serem subjugadas, cedendo lugar à concretização de interesses econômicos, por meio de intervenções pautadas em um melhor aproveitamento da ocupação do solo sob o viés financeiro. A dominância desse pensamento tende a dirimir aspectos de ordem ambiental, como a porcentagem de permeabilidade do solo, o que traz desdobramentos danosos para as dinâmicas ecossistêmicas.

Para Steinø e Obeling (2005), a justificativa para esse tipo de abordagem está no jogo de forças que compreendem a questão do planejamento urbano, das quais o poder e a influência financeira são as que mais se destacam. Nesse meio, estabelecem-se as assimetrias de poder de intervenção sobre as decisões norteadoras da transformação do ambiente urbano dada a desigualdade econômica que é característica do modelo capitalista. Assim, o interesse do grande capital de investimentos passa a se sobrepor às demais vontades e variáveis que compõem o cenário urbano. Com isso, tais autores vislumbram nas tecnologias algorítmico-paramétricas um mecanismo para tornar o planejamento urbano mais democrático, já que elas permitem uma estruturação aberta do processo criativo. Sendo assim, a incorporação sucessiva de feedbacks oriundos da consulta e participação popular

pode ocorrer de maneira facilitada, pois o modelo digital responde simultaneamente às modificações realizadas nos dados que alimentam o sistema de algoritmos que compõem a ferramenta. Contudo, a implementação desse tipo de tecnologia no processo criativo de projeto exige uma reconfiguração no fluxo de trabalho.

Retomando as concepções de Woodbury (2010), o pensamento paramétrico contemporâneo é composto de três núcleos: o pensamento abstrato, o pensamento matemático e o pensamento algorítmico. Ao transitar por esses três núcleos, o foco do projeto se desloca da solução pretendida para a própria lógica de projeto em um processo de autoanálise e autoconfiguração metodológica. Logo, o objetivo principal de uma abordagem algorítmico-paramétrica não são as soluções projetuais a serem alcançadas, mas, sim, o próprio conjunto de normas e expectativas as quais as soluções projetuais devem contemplar. De Moraes (2010) intitula de *metadesign* esse processo de projetar o método de projeto para que se alcancem resultados projetuais específicos. Nele, o objetivo principal é permitir que as soluções projetuais desenvolvidas possam ser previamente analisadas sob o escopo das condicionantes relacionadas ao contexto trabalhado, gerando, assim, propostas mais flexíveis e responsivas às demandas identificadas (FIGURA 08).

CIRCUITO TRADICIONAL DE PROJETO



CIRCUITO PARAMÉTRICO DE PROJETO

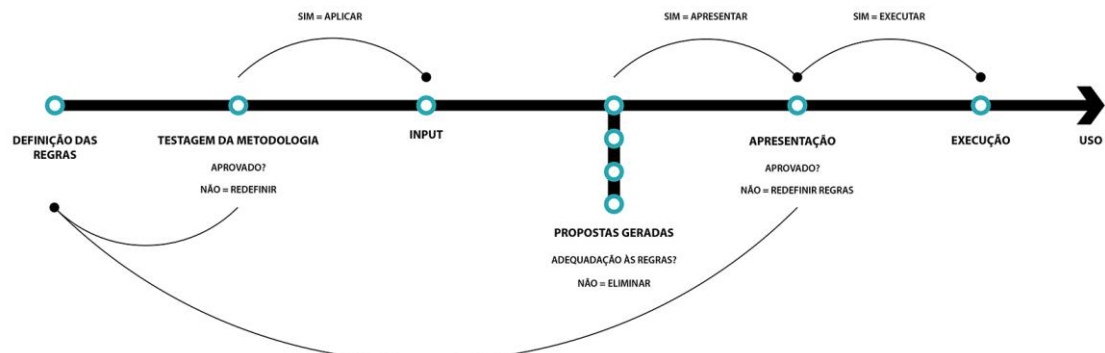


Figura 08. Circuitos dos projetos tradicional e paramétrico. **Fonte:** O autor, 2022.

Conforme exposto na Figura 08, o processo tradicional de projeto é marcado por uma rigidez, na qual a demanda por ajustes ocorre apenas após a apresentação desse projeto a um grupo de clientes ou após uma etapa de revisão ao final da conclusão da proposta; já o projeto paramétrico se caracteriza por ciclos sucessivos de *feedback* que permitem que as propostas sejam constantemente confrontadas ao conjunto predefinido de regras, gerando, então, cópias adaptadas de si mesmas. Essas cópias favorecem um processo meticuloso de curadoria, tendendo a aumentar a qualidade final da intervenção (MAKERT; ALVES, 2016).

Outro ponto importante de ser ressaltado é que quando o resultado obtido através de um processo paramétrico de projeto não se enquadra nas delimitações previstas, ao invés de o projetista intervir diretamente sobre a proposta para readequá-la, como ocorre nos métodos tradicionais de projeto, ele deve redefinir as regras de programação para torná-las condizentes com as dinâmicas almejadas para o contexto de projeto. Nesse sentido, a metodologia paramétrica de projeto estimula o desenvolvimento de uma abordagem sistêmica para com a intervenção proposta, atrelando a solução formal aos parâmetros predefinidos e à relação observada entre eles.

Devido a essa característica, Steinø e Obeling (2005) consideram que as tecnologias paramétricas de projeto são ferramentas importantes para potencializar a participação democrática no planejamento urbano. Primeiro, por trabalharem através da definição de regras para a produção de soluções, essas tecnologias permitem, por exemplo, que a população possa visualizar os impactos das transformações nos instrumentos regulatórios urbanos, e, assim, opinar sobre o processo decisório, uma vez que as dinâmicas expressas nesses instrumentos podem ser representadas a partir da relação entre variáveis e algoritmos.

Segundo, os autores consideram que, por essas tecnologias serem bastante responsivas a intervenções propostas, alterando automaticamente o resultado final quando os dados de entrada ou regras associativas são transformados, as ferramentas paramétricas podem facilitar a incorporação da opinião pública em relação a determinado aspecto urbano, traduzindo-os em um conjunto de regras associativas, que, então, seriam transcritas em parâmetros urbanísticos.

Assim, Steinø e Obeling (2005) defendem que as ferramentas algorítmico-paramétricas sejam aplicadas em atividades consultivas em oficinas, fóruns urbanos ou, até mesmo, através de consultas públicas realizadas de maneira virtual. Com isso,

amplia-se a participação popular nos processos decisórios, o que é vital para a construção de espaços urbanos que promovam interações sociais e ambientais equânimes.

Apesar de o manuseio dessas ferramentas requerer um certo grau de fluência para com a interface digital utilizada, Steinø e Obeling (2005) entendem que a atuação de um mediador para traduzir as demandas da população em algoritmos, bem como interpretar as relações associativas entre algoritmos e os resultados obtidos para que a população também possa compreendê-las; é suficiente para facilitar esse processo.

Todavia, os autores defendem ser melhor que a comunidade atinja uma autonomia digital para utilizar as ferramentas algorítmico-paramétricas, fazendo com que a interação usuário-ferramenta se dê de maneira direta. Assim, destaca-se a importância da alfabetização digital e da popularização do ensino de programação como estratégias para a ampliação da cidadania.

Nessa proposta de planejamento urbano participativo idealizada por Steinø e Obeling (2005), as ferramentas algorítmico-paramétricas serviriam de meio para apresentar ideias de atualização de condicionantes urbanísticas, como também para incorporar as sugestões oriundas da comunidade. Conseqüentemente, as ferramentas seriam uma interface entre a gestão pública e a sociedade.

Lima (2017b) concorda que as ferramentas algorítmico-paramétricas são aliadas para ampliar a participação cidadã nos processos decisórios acerca do planejamento urbano. Para além disso, o autor entende que tais ferramentas se constituem como um importante mecanismo para trazer mais especificidade ao projeto a partir do trabalho com dados provenientes de dinâmicas complexas presentes no contexto de intervenção, o que contribui para a produção de propostas melhor alinhadas às demandas existentes, como as sociais, econômicas e ambientais.

Outro fator ressaltado por Lima (2017b) é que, pelo fato dessas tecnologias possibilitarem adicionar um maior nível de detalhe ao processo de projeto e de planejamento, a escala de intervenção, conseqüentemente, também pode ser reduzida. Isso facilita a criação de intervenções mais especializadas e pertinentes ao contexto trabalhado. O autor argumenta que os processos de análise e planejamento em macroescala deixam lacunas, fazendo com que a espacialização de assimetrias se dê de maneira facilitada. O referido fenômeno ocorre justamente porque o trabalho a partir da macroescala ignora processos que se desenvolvem no plano de vivência

dos cidadãos, promovendo, então, um descolamento entre o planejamento urbano e a devida vivência desse espaço planejado.

Transportando essas construções teóricas para o contexto de pesquisa desta dissertação, observa-se que a tendência é que a implementação de uma ferramenta algorítmico-paramétrica voltada à análise de fatores hidrológicos possibilite a criação de propostas sintonizadas às dinâmicas hídricas do local. Por conseguinte, o produto da implementação dessas tecnologias seria a consolidação de um espaço urbano menos agressivo para com o ambiente natural, principalmente sob a ótica das águas urbanas.

Essa alteração na abordagem para com o espaço construído só é possível em decorrência da integração dos dados relativos aos processos e fluxos hidrológicos ao projeto e planejamento do espaço construído. Conforme Kalay (2006) indicou, o ato de projetar é, na verdade, um ato de processamento de informações na busca por respostas para uma problemática.

Desse modo, as ferramentas algorítmico-paramétricas contribuem para essa tarefa por otimizar a manipulação dos dados de projeto, poupando o projetista de processos manuais de cálculo, por exemplo. Caso contrário, seria demandado do mesmo um conhecimento estrito de especificidades de processos que extrapolam a vivência arquitetônica, como é o caso da biologia, que se atrela intimamente às questões da sustentabilidade. Assim, o projetista é liberado para atuar com mais afinco nas etapas criativas do projeto e na curadoria de informações e propostas obtidas.

No âmbito do planejamento urbano, uma ferramenta voltada para a análise de processos hidrológicos no meio urbano pode auxiliar a gestão pública a antever os desdobramentos decorrentes da atualização de índices urbanísticos, permitindo que as dinâmicas ambientais sejam trabalhadas e discutidas junto à sociedade a partir de exemplos visuais claros e, também, de dados simulados com um maior nível de detalhamento. Essa dinâmica facilita a busca pela construção de um ambiente urbano menos agressivo para com a matriz natural. Além disso, torna-se possível que tais aspectos ambientais sejam ponderados juntamente às pautas econômicas refletidas nas demandas urbanas por adensamento e expansão, por exemplo.

Quanto ao tópico da atenção à microescala, defendida por Lima (2017b), dentro do contexto do planejamento urbano sensível às águas, Bonatto (2015) considera que a base para se pensar a espacialização do tecido urbano deveria ser,

sobretudo, a bacia hidrográfica e não as zonas urbanas produzidas a partir da sobreposição de fatores sociais, econômicos e culturais, como é comumente realizado na atualidade por grande parte das prefeituras municipais.

Isso se justifica, pois, os sistemas de bacias hidrográficas podem ser compreendidos como divisões naturais do território adequadas ao percurso da água por sobre a superfície da terra. Quando se atrelam os fluxos antrópicos aos fluxos naturais, a resultante é um ambiente construído em perfeita simbiose com a sua matriz natural, o que irá refletir na redução da ocorrência de distúrbios ambientais, principalmente, aqueles sob a forma de alagamentos.

Logo, com base no suporte teórico apresentado, as ferramentas algorítmico-paramétricas podem auxiliar nesse trabalho de sobreposição de escalas entre a dimensão do zoneamento urbano tradicional e os fatores relacionados à dimensão ambiental do contexto urbano trabalhado, justamente por automatizarem tarefas de análise e processamento de dados importantes para a confecção do projeto.

Além disso, essas ferramentas podem atuar como facilitadoras do processo de mediação entre a gestão pública municipal e a sociedade, tanto pela apresentação visual e quantitativa dos desdobramentos das propostas de intervenção sobre a cidade quanto pela incorporação das demandas sociais para atualização dessas mesmas propostas. Nesse contexto ideal, a democracia, a sustentabilidade e a humanização dos espaços urbanos seriam, sem dúvida, os maiores beneficiados.

5 A SÍNTESE



5 A SÍNTESE

A abordagem deste capítulo é direcionada à avaliação dos conceitos reunidos e comentados nos capítulos anteriores, os quais contemplaram o recorte metodológico teórico. Por conseguinte, os registros contidos nesta seção visam aplicar estes conceitos na análise de metodologias existentes, de modo a contribuir com apontamentos que culminem em respectivas adequações. Logo, o presente capítulo está organizado em três partes. No subcapítulo **5.1 Adaptação do Método Racional**, a equação proposta pelo Método Racional para a estimativa de vazão do escoamento superficial é analisada e adaptada para considerar a interferência da interceptação pluvial da arborização. O **subcapítulo 5.2 Modelagem da Interceptação Pluvial** contempla as estimativas e projeções para as taxas de interceptação pluvial de diferentes arquiteturas arbóreas selecionadas para aplicação na presente pesquisa. Por fim, o subcapítulo **5.3 Delineamento de Métricas** se debruça sobre a definição de métricas para qualificar a redução do escoamento superficial no contexto urbano.

5.1 Adaptação do Método Racional

Tomando por base o cálculo do escoamento superficial máximo a partir do Método Racional, apresentado no tópico **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas**, observa-se que a influência da arborização no processo de formação do escoamento superficial não aparece de maneira clara. Na verdade, ela está sujeita às condições referentes à cobertura do solo estimadas a partir da variável C , a qual representa o coeficiente de escoamento superficial. Nesse sentido, seguindo a lógica das variáveis apontadas pelo Método Racional, percebe-se que a dinâmica de influência da arborização no escoamento superficial se dá através das relações expressas pela Figura 09.

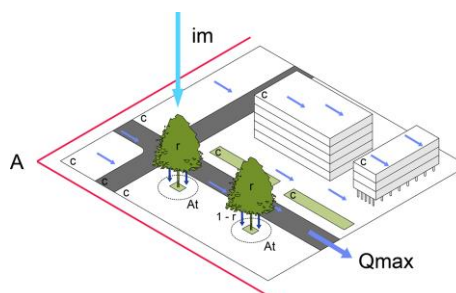


Figura 09. Dinâmica de retenção pluvial pela arborização. **Fonte:** O autor, 2022.

Conforme mostrado pela Figura 09, a árvore promove um processo diferente para o escoamento superficial na área imediatamente sob sua copa se comparada com o que ocorre no entorno. A condição do entorno é explicada corretamente pela equação do Método Racional, pois relaciona as variáveis da intensidade máxima de precipitação (i_m), do coeficiente de escoamento superficial (C) e a área da bacia de drenagem (A). Entretanto, pelo fato de a árvore possuir uma área de copa suspensa acima do solo (A_{arb}), retendo uma certa taxa (r) da pluviosidade, ocorre, então, uma redução no volume de águas pluviais que atinge o solo abaixo da área abrangida pela copa, alterando a dinâmica de formação de escoamento superficial nessa porção.

Assim, para o cálculo do fluxo de escoamento superficial, torna-se necessário discriminar as áreas da bacia hidrográfica entre as áreas cobertas, as quais coincidem com as áreas das copas das árvores (A_{arb}), e aquelas descobertas, que são toda área da bacia fora da abrangência da área de copa das árvores ($A - A_{arb}$). A porção que está sob influência da copa da árvore (A_{arb}) recebe a atuação da taxa (r) de retenção, a qual reduz a intensidade da precipitação (i_m), de modo que o que atinge o solo é o volume excedente que escapa do filtro arbóreo ($i_m - (i_m \cdot r)$), que também pode ser representado por ($i_m \cdot (1 - r)$). Isto posto, a composição da nova equação para estimativa do fluxo de escoamento superficial é descrita na Figura 10.

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot A}{360}$$

equação original do Método Racional

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot (A - A_{arb}) + C \cdot (i_m - i_m \cdot r) \cdot A_{arb}}{360}$$

discriminação entre áreas cobertas e não-cobertas por arborização

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot (A - A_{arb}) + C \cdot i_m \cdot [(1 - r) \cdot A_{arb}]}{360}$$

primeira simplificação dos fatores da equação

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot [(A - A_{arb}) + (1 - r) \cdot A_{arb}]}{360}$$

segunda simplificação dos fatores e formato final da equação

Figura 10. Processo de criação da nova equação para o cálculo do escoamento superficial considerando a influência da arborização. **Fonte:** O autor, 2022.

Para validar esta equação, é importante verificar se ao anular os valores referentes à área da arborização (A_{arb}) e à taxa de retenção pluvial (r), ou seja, em um cenário em que as árvores sejam desconsideradas ou que não existam, a fórmula

resultante seja novamente a equação original do Método Racional. Isso é importante de ser identificado, pois não é desejado que a metodologia primária de cálculo seja alterada, apenas adaptada para incluir novas variáveis. Conforme demonstrado na Figura 11, ao realizar essa verificação, confirma-se a obtenção da equação original do Método Racional ao final do processo, de modo que se pode afirmar que a equação proposta é válida e tende a apresentar um funcionamento correto.

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot [(A - A_{arb}) + (1 - r) \cdot A_{arb}]}{360}$$

↓

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot [(A - 0) + (1 - 0) \cdot 0]}{360}$$

↓

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot [(A) + 0]}{360}$$

↓

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot A}{360}$$

Figura 11. Processo de validação da equação proposta. **Fonte:** O autor, 2022.

Nessa nova equação, o valor da variável A_{arb} deve ser apresentado em hectares (ha), assim como da variável A . Já o valor de r é apresentado em decimais a partir da porcentagem indicada para aquele contexto, enquanto que o valor de i_m é expressado em mm.h^{-1} , o de C é adimensional e Q_{\max} em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, como prescrito na equação aplicada no Método Racional. O valor utilizado em A_{arb} é obtido a partir do somatório da área das copas das árvores. Para definir o valor de r , é necessário considerar a tipologia arbórea em questão, pois este é um fator inerente a uma série de características físicas de cada espécie de árvore, conforme será discutido com mais profundidade no tópico **5.2 Modelagem da Interceptação Pluvial**.

O valor utilizado para expressar i_m é obtido, por sua vez, a partir da equação demonstrada no Método Racional, no **subcapítulo 3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas**, sendo dependente de variáveis relacionadas ao período de retorno da precipitação (T), ao tempo de concentração da bacia analisada (t), além dos fatores de calibragem dos dados obtidos pela estação pluviométrica (K , a , b , c). O valor de C é encontrado através de uma média ponderada entre cada coeficiente de escoamento

específico para os materiais que encobrem o solo da bacia em estudo, detalhado por Pruski et al. (2014), e suas respectivas áreas de abrangência. As etapas desse procedimento de cálculo estão esquematizadas na Figura 12.

ETAPA 01:

Identificação dos tipos de cobertura do solo, suas respectivas áreas e cálculo do coeficiente de escoamento superficial médio.

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + \dots + C_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

ETAPA 02:

Cálculo da intensidade máxima de precipitação (i_m) suportada pela bacia hidrográfica em análise, considerando determinado período de retorno (T), tempo de concentração específico da bacia (t) e as variáveis de ajuste da estação pluviométrica (K, a, b e c).

$$i_m = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c}$$

ETAPA 03:

Somatório de áreas das copas das árvores (A_{arb}) e aplicação dos valores obtidos na equação sugerida para o cálculo do escoamento superficial máximo (Q_{max}).

$$Q_{max} = \frac{C \cdot i_m \cdot [(A - A_{arb}) + (1-r) \cdot A_{arb}]}{360}$$

Figura 12. Etapas de cálculo do escoamento superficial. **Fonte:** O autor, 2022.

Através do procedimento proposto, espera-se que seja possível mensurar a contribuição da arborização para a redução do fluxo do escoamento superficial na avaliação de propostas de intervenção sobre o espaço urbano que se baseiam em estratégias biofílicas para a mitigação da problemática dos alagamentos nas cidades.

5.2 Modelagem da Interceptação Pluvial

Dando sequência ao processamento das informações reunidas na revisão de literatura para a sua posterior utilização na etapa prática deste trabalho, este subcapítulo se dedica à identificação de padrões na dinâmica de interceptação pluvial por diferentes tipologias arbóreas com o fim de suprir as lacunas apresentadas no tópico **3.2 O Verde Urbanos e os Recursos Hídricos**. Um ponto a ser revisado é a questão da variação da interceptação pluvial pela saturação da copa da árvore em um

contexto de alta intensidade de precipitação, já que nem todos os experimentos coletados pela revisão de literatura contemplaram esse cenário. Outro item a ser destacado é a sistematização das taxas de interceptação pluvial tanto para chuvas de baixa intensidade quanto de alta intensidade, para diferentes tipologias de arquitetura arbórea, ampliando o escopo de possíveis espécies abrangidas neste estudo.

Iniciando pela mensuração da interferência da saturação da copa na redução da taxa de interceptação pluvial, destaca-se, dentro do grupo de espécies cujas performances foram mapeadas, aquelas que apresentam os dados de retenção pluvial para chuvas de baixa intensidade (r_1) e de alta intensidade (r_2). Na sequência, as taxas de retenção pluvial em um cenário de chuva de alta intensidade são divididas por suas respectivas taxas de retenção pluvial para chuvas de baixa intensidade (r_2 / r_1), na busca por identificar uma constante (k) responsável por essa variação sob a influência da saturação da copa (TABELA 04).

Tabela 04. Padrão de redução da taxa de retenção pluvial pela saturação da copa.

Espécie	Retenção (r_1)	Retenção (r_2)	r_2/r_1
<i>Mangifera indica</i>	29,85%	12,63%	0,423
<i>Pachira aquatica</i>	33,58%	12,12%	0,361
<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	20,15%	7,45%	0,369
<i>Licania tomentosa</i>	26,12%	9,59%	0,367

Fonte: O autor, 2022.

Dentre as espécies analisadas, apenas a espécie *Mangifera indica* apresenta um comportamento discordante, com uma redução mais agressiva em sua taxa de interceptação pluvial pós saturação. No escopo das espécies concordantes, as variações abrangem um intervalo entre 0,361 e 0,369. Considerando a média desse intervalo, o valor para a constante de redução da retenção pluvial seria 0,365. Entretanto, como esta etapa da pesquisa consiste em um trabalho com hipóteses, demonstra-se mais prudente adotar uma constante de apenas duas casas decimais, ou seja, elevando o seu grau de abrangência. Assim, o valor adotado para a constante de redução da retenção pluvial é de 0,36.

Após definir o valor da constante, é importante verificar a ocorrência de padrões entre as taxas de interceptação pluvial de cada espécie (TABELA 05). Como nem todas as espécies identificadas apresentam valores de interceptação para chuvas de alta intensidade, a análise se deu considerando as taxas obtidas para

chuvas de baixa intensidade. Nessa etapa, observou-se a formação de dois grupos. Apenas as espécies *Tipuana tipu*, *Alchornea triplinervia* e *Caesalpinia peltophoroides* não formam grupos, pois possuem taxas de interceptação muito desviantes.

Tabela 05. Agrupamento de espécies por faixas similares de retenção pluvial.

Grupo	Espécie	Retenção (r_1) [$i_m < 25$ mm/h]	Faixa	Varição (%)
01	<i>Peltophorum dubium</i>	32,17%	32,17 – 34,48	7,18%
	<i>Tabebuia heptaphylla</i>	34,48%		
	<i>Pachira aquatica</i>	33,58%		
02	<i>Mangifera indica</i>	29,85%	26,12 – 29,85	14,28%
	<i>Licania tomentosa</i>	26,12%		
-	<i>Tipuana tipu</i>	60%	-	-
-	<i>Alchornea triplinervia</i>	49,13%	-	-
-	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	20,15%	-	-

Fonte: O autor, 2022.

O segundo agrupamento de espécies arbóreas considerou as suas respectivas características físicas (TABELA 06). Para essa análise foram elencados três fatores: a estrutura da copa, aparência das folhas e textura do tronco, com base nas classificações indicadas por IBF (2020). O processo de classificação está registrado no Apêndice A.

Tabela 06. Agrupamento de espécies por características físicas.

Grupo	Espécie	Copa	Folhas	Tronco
01	<i>Tipuana tipu</i>	Muito densa e ampla	Compostas e médias	Rugoso e esponjoso
02	<i>Peltophorum dubium</i>	Muito densa e média	Compostas e pequenas	Rugoso e firme
	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	Muito densa e média	Compostas e pequenas	Rugoso e firme
03	<i>Mangifera indica</i>	Muito densa e ampla	Unifolias e médias	Rugoso e firme
	<i>Licania tomentosa</i>	Muito densa e média	Unifolias e médias	Rugoso e firme
	<i>Pachira aquatica</i>	Muito densa e média	Compostas e médias	Rugoso e firme
04	<i>Tabebuia heptaphylla</i>	Densa e ampla	Compostas e médias	Rugoso e firme
	<i>Alchornea triplinervia</i>	Densa e ampla	Unifolias e médias	Rugoso e firme

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBF (2020).

De acordo com o agrupamento apresentado na Tabela 06, observa-se a formação de quatro grupos a partir das características físicas de cada espécie arbórea. O grupo 01 é formado apenas pela espécie *Tipuana tipu*, que distingue por sua copa muito densa e ampla; pelas características de suas folhas, de tamanho médio e organizadas de maneira composta, ou seja, agrupadas em ramos; e pelo seu tronco de textura rugosa e esponjosa, o que auxilia na retenção de um volume maior de água da chuva. Essas características justificam a sua alta taxa de interceptação pluvial.

Já o grupo 02 é composto pelas espécies *Peltophorum dubium* e *Caesalpinia peltophoroides*, caracterizadas por suas copas muito densas e de tamanho médio; por suas folhas pequenas e compostas; e por seus troncos rugosos e firmes. O grupo 03 contém as espécies *Mangifera indica*, *Licania tomentosa* e *Pachira aquatica*, as quais convergem quanto às características de seus troncos rugosos e firmes. Quanto às copas, apenas a *Mangifera indica* diverge das demais espécies por possuir um tamanho amplo. Já em relação às folhas, apenas a espécie *Pachira aquatica* se distingue das outras espécies do grupo, pois suas folhas são compostas. Contudo, apesar dessas características, suas folhas são dispostas de forma muito espaçada nos ramos, aparentando, assim, ser unifoliar, tal qual as demais espécies do grupo, promovendo uma aparência geral bastante homogênea.

O grupo 04, por sua vez, compreende as espécies *Tabebuia heptaphylla* e *Alchornea triplinervia*, as quais convergem quanto aos aspectos de suas copas densas e amplas; e de seus troncos rugosos e firmes. A divergência está nas características de suas folhas, pois as folhas da primeira são médias e compostas e as da segunda, médias e unifolares. Entretanto, assim como no grupo anterior, ambas as espécies apresentam um aspecto geral muito semelhante devido à disposição das folhas da *Tabebuia heptaphylla*, que apesar de serem compostas, são distribuídas de forma espaçada nos ramos, dando um aspecto unifoliar.

Em comparação ao agrupamento anterior, vê-se que apenas as espécies *Mangifera indica* e *Licania tomentosa* permaneceram reunidas. As demais, foram todas reorganizadas, com exceção da espécie *Tipuana tipu* que permaneceu isolada em seu grupo específico. Assim, para melhor compreender como estão relacionadas as taxas de interceptação pluvial às características físicas listadas, realizou-se um cruzamento entre ambos os agrupamentos, destacando-se a porcentagem de variação entre a menor e a maior taxa de interceptação pluvial em cada grupo.

Novamente, ressalta-se que para esta análise são consideradas apenas as intercepções em eventos pluviais de baixa intensidade por ser um dado comum a todas as espécies reunidas neste trabalho. O resultado é mostrado na Tabela 07.

Tabela 07. Retenção pluvial segundo agrupamento por características físicas.

Grupo	Espécie	Retenção (r_1)	Faixa	Varição (%)
01	<i>Tipuana tipu</i>	60%	-	-
02	<i>Peltophorum dubium</i>	32,17%	20,15 – 32,17	59,65%
	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	20,15%		
03	<i>Mangifera indica</i>	29,85%	26,12 – 33,58	28,56%
	<i>Licania tomentosa</i>	26,12%		
	<i>Pachira aquatica</i>	33,58%		
04	<i>Tabebuia heptaphylla</i>	34,48%	34,48 – 49,13	42,49%
	<i>Alchornea triplinervea</i>	49,13%		

Fonte: O autor, 2022.

Conforme mostrado na Tabela 07, observa-se que a abrangência de cada faixa de intercepção pluvial se ampliou consideravelmente, o que pode ser comprovado pela elevada porcentagem de variação entre a menor e a maior taxa de retenção. Apesar desse aspecto, verifica-se que o agrupamento por características se demonstra como uma estratégia viável, já que, apesar de possuírem atributos físicos semelhantes, o mapeamento da performance de cada espécie foi realizado por autores diferentes, em contexto distintos, desconhecendo-se, ainda, se tais espécies estavam em uma condição de maturação similar, o que influenciaria, também, nas faixas de comparação de suas taxas de retenção.

Com isso, os intervalos observados em cada grupo demonstram certa lógica e, portanto, são aceitáveis, uma vez que é alto o nível de incerteza do universo de dados reunidos. Assim, os grupos consolidados são: (1) Grupo 1, reunindo espécies de copa muito densa e ampla, com folhas compostas e médias e com tronco rugoso e esponjoso; (2) Grupo 2, com as espécies de copa muito densa e média, mas com folhas compostas e pequenas e com tronco rugoso e firme; (3) Grupo 3, com as espécies de copa muito densa e média, mas com folhas unifolias e médias e tronco rugoso e firme; e, por fim, (4) Grupo 4, reunindo espécies de copa densa e ampla, com folhas unifolias e médias e tronco rugoso e firme.

Finalmente, para definir os valores definitivos para a retenção pluvial em intensidades de precipitação baixa e alta para cada grupo de espécies, os valores ideais, ou seja, as médias, indicados a partir de cada faixa de abrangência são multiplicados pela constante (k), de valor 0,36. Os resultados são apresentados na Tabela 08.

Tabela 08. Valores de retenção pluvial segundo intensidades de precipitação.

Grupo	Característica	Retenção (r_1)		Retenção (r_2) ou ($r_1 \cdot k$)
		Faixa	Ideal	
01	Copa muito densa e ampla, folhas compostas e médias, tronco rugoso e esponjoso	60%	60%	21,60%
02	Copa muito densa e média, folhas compostas e pequenas, tronco rugoso e firme	20,15 – 32,17%	26,16%	9,42%
03	Copa muito densa e média, folhas unifoliars e médias, tronco rugoso e firme	26,12 – 33,58%	29,85%	10,75%
04	Copa densa e ampla, folhas unifoliars e médias, tronco rugoso e firme	34,48 – 49,13%	41,80%	15,05%

Fonte: O autor, 2022.

De acordo com a Tabela 08, de um modo geral, as características que mais contribuem para uma maior retenção pluvial são a presença de copa muito densa e ampla, de folhas médias e de tronco rugoso e esponjoso. Essas características coadunam com a listagem de parâmetros apresentada por Cappiella et al. (2005), a qual contemplava a estrutura da copa, a densidade de distribuição das folhas e as respectivas texturas das folhas e do tronco.

Dentre os grupos apresentados, aquele que necessita de maior prudência em relação ao uso dos valores estimados para a retenção pluvial é o de número 01, pois apenas uma espécie foi identificada como componente do grupo, devendo, pois, passar por uma análise mais aprofundada no futuro para calibragens de dados. A análise pode considerar novos estudos de performance entre espécies de perfil similar ou simulações digitais através de espécies com arquitetura arbórea semelhante.

Evidencia-se que, em casos de interesse na continuidade da presente pesquisa, os valores previstos para as taxas de retenção podem ser estendidos a espécies não contempladas por estudos de performance específica, desde que possuam características afins às listadas em cada grupo. De todo modo, reforça-se

que estudos de mapeamento da performance de interceptação pluvial são necessários para a calibragem das taxas definidas para cada grupo, contribuindo para o aprimoramento das metodologias aqui propostas e para a abrangência de grupos com outras características de copa, folha e tronco.

5.3 Delineamento de Métricas

Após definida a metodologia de cálculo para o escoamento superficial e os valores a serem adotados para a interceptação pluvial por diferentes tipologias arbóreas, este tópico se dedica ao delineamento de métricas para a avaliação dos cenários de intervenção sobre o fluxo de escoamento superficial. A intenção, por meio dessa iniciativa, é a de responder ao questionamento surgido durante o desenvolvimento da pesquisa: “o quanto de redução no escoamento superficial atende a necessidade de cada contexto?”. A investigação desse aspecto é relevante para tornar ambas a aplicação das estratégias apresentadas neste trabalho e a análise de cenários de intervenção mais objetivas e críticas.

Ao procurar embasamento na literatura científica, não foram encontrados registros que quantificassem de maneira clara a taxa de redução necessária para mitigação dos alagamentos em meio urbano. De um modo geral, o consenso entre os autores é a máxima minoração do escoamento superficial, ou seja, quanto maior for a redução, igualmente maior será o benefício para as dinâmicas hidrológicas urbanas.

Em contrapartida, Sales (2017) indica que, no caso da cidade de São Paulo, em um contexto de precipitação com período de retorno de 50 anos e tempo de duração de 10 minutos, o ideal é que o coeficiente de escoamento superficial seja reduzido em 65% para que as infraestruturas convencionais de drenagem instaladas consigam escoar o volume precipitado. Entretanto, esta taxa possui um caráter específico para as condições locais da cidade de São Paulo e sua reprodução para o cálculo do escoamento superficial em outras bacias hidrográficas pode incorrer em erros significativos, pois cada bacia hidrográfica possui um tempo de concentração específico, o que se traduz na capacidade de drenagem desta. Logo, determinadas bacias com um tempo de concentração menor do que a considerada no estudo de Sales (2017) tendem a exigir uma taxa de redução de escoamento superficial menor, enquanto bacias com um tempo de concentração maior necessitam de uma taxa de redução mais acentuada.

Diante dessas informações, identificou-se mais uma lacuna metodológica existente para a qualificação do escoamento superficial urbano com base nos impactos gerados sobre as dinâmicas hidrológicas da bacia hidrográfica em análise. Sendo assim, optou-se pelo desenvolvimento de métricas que auxiliem nesse processo de qualificação do escoamento superficial, servindo de guia para intervenções urbanas que visem mitigar a problemática dos alagamentos. Assim, as métricas delineadas para este trabalho seguem uma escala de valores que variam de 1 a 5, sendo 1 o cenário mais equilibrado para as dinâmicas de permeabilidade e formação de escoamento superficial e 5 o cenário mais crítico. Isto posto, toma-se como o cenário mais equilibrado para o escoamento superficial aquele que contempla a bacia hidrográfica em seu estado natural, livre da influência da urbanização, com solo coberto por grama e cobertura arbórea de, pelo menos, 40% da área analisada.

A opção por essa caracterização do espaço se sustenta a partir de toda a teoria abordada nesta dissertação, que demonstra os efeitos nocivos da urbanização sobre o ambiente natural, alterando suas dinâmicas hidrológicas através de transformações no uso e cobertura do solo, aqui nomeadas como rupturas primárias. Além disso, a taxa de 40% da arborização é indicada por Beatley (2011) em suas abordagens acerca da biofilia urbana, sendo aplicada neste cenário como o patamar mínimo para a caracterização da cobertura arbórea em um ambiente natural.

Já o cenário crítico se caracteriza por um contexto de bacia hidrográfica completamente inserida ao ambiente urbano, sendo este integralmente artificializado e impermeabilizado. Para fins de simulação do comportamento do escoamento superficial, é considerada a proporção de 55% da área da bacia coberta por edificações, 20% por asfalto e 25% por concreto. Essa proporção se baseia na distribuição geral empregada nas leis de parcelamento e uso do solo, que destinam cerca de 20% da área urbana para circulação, 15% para espaços livres de uso público ou privativo e 65% para loteamentos. Entretanto, nem toda área loteada é destinada à edificação, assim, transferiu-se 10% desse valor para a cobertura do solo em concreto, para simular pavimentações de jardins e quintais, compondo a proporção final indicada.

A partir do cálculo do escoamento superficial para cada um desses cenários, tem-se que o valor ótimo para o escoamento superficial é aquele obtido na simulação da bacia hidrográfica em seu estado natural e o valor crítico, o obtido no cenário urbanizado e impermeabilizado. A partir desses extremos, o intervalo entre

eles é dividido em cinco partes iguais. Quanto mais próxima da condição 1, ou seja, do coeficiente de escoamento superficial de uma bacia em seu estado natural, mais efetiva é a intervenção urbana proposta para o reequilíbrio das condições hidrológicas ou mais efetiva é a condição atual de drenagem de águas pluviais na bacia.

Pelo fato de os valores do escoamento superficial estarem atrelados às características específicas da bacia hidrográfica, não é possível delinear métricas com valores absolutos para esse tipo de avaliação de cenários, mas, sim, com proporções a partir das variáveis que interagem com os aspectos apontados. Essas proporções, por sua vez, deverão ser calculadas a partir dos valores obtidos para o escoamento superficial por meio da equação proposta no tópico **5.1 Adaptação do Método Racional**. Dessa forma, as métricas seguem um conjunto de regras que irão se adequar à especificidade dos valores apresentados por cada contexto de bacia hidrográfica, porém sempre expressando o mesmo padrão de mensuração e análise.

Sendo assim, concebendo que o fluxo de escoamento superficial para o cenário 1, tido como ótimo, é representado por $Q_{\max 1}$ e o fluxo de escoamento superficial para o cenário 5, tido como crítico, é representado por $Q_{\max 5}$, o intervalo entre esses valores é definido por $Q_{\max 5} - Q_{\max 1}$. Este intervalo deverá ser dividido em cinco partes iguais para a definição das faixas da métrica supracitada, logo cada parte é determinada por $(Q_{\max 5} - Q_{\max 1}) / 5$. O resultado dessa divisão deverá ser agregado ao extremo de menor valor, ou seja, $Q_{\max 1}$, uma vez a cada divisão de faixa, de modo a estabelecer os intervalos que compõem cada uma dessas faixas. A esquematização desse processo está ilustrada na Figura 13.

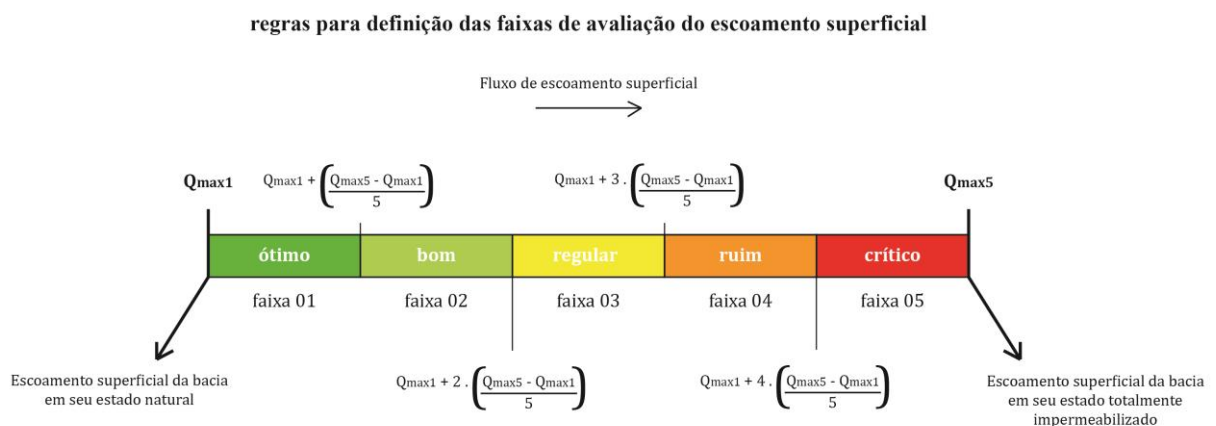


Figura 13. Regras para definição das faixas de avaliação do escoamento superficial a partir da métrica delineada. **Fonte:** O autor, 2022.

Para exemplificar o funcionamento dessas regras: se uma bacia hipotética possui valor de Q_{max1} igual a $20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e Q_{max5} igual a $80 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, verifica-se que o valor do intervalo geral, ou seja, a diferença entre ambos os valores, é de $60 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Como este intervalo geral é dividido em cinco faixas de avaliação, ao dividir 60 por 5, obtêm-se que cada faixa possui valor de $12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Assim, para definir os limites de cada faixa, soma-se $12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ao valor de Q_{max1} uma vez a cada interposição de limite de faixas. Nesse sentido, para essa bacia hipotética, a faixa 01 de escoamento superficial vai de 20 a $32 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, sendo esta a condição ótima; a faixa 02, de 32 a $44 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, configurando-se como a condição boa; a faixa 03, de 44 a $56 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, apresentando-se como a condição regular; a faixa 04, de 56 a $68 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, sendo a condição ruim; e a faixa 05, de 68 a $80 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, como a condição crítica.

Com isso, percebe-se que as regras definidas para o delineamento das métricas de avaliação, de fato, possuem a capacidade de se ajustarem à escala de variação dos cenários extremos de escoamento superficial para o contexto da bacia, pois quanto maior a variação entre esses extremos, mais abrangentes, também, serão as faixas de qualificação do contexto. Isso permite uma análise proporcional à gama de variáveis específicas da bacia e ao seu volume de escoamento superficial. Ademais, por meio dessa estratégia de delimitação das métricas, garante-se que cada bacia hidrográfica possua uma distribuição de faixas única, em sintonia com as particularidades de suas dinâmicas hidrológicas, de modo que a condição ótima ou a crítica de cada bacia seja definida a partir de suas próprias características e não a partir do emprego de um valor convencional.

6 A FERRAMENTA



6 A FERRAMENTA

Este capítulo se dedica à abordagem dos procedimentos relacionados à confecção da ferramenta algorítmico-paramétrica e de sua respectiva aplicação em simulações projetuais, atendendo à etapa metodológica prática. O nome sugerido para a ferramenta é *Parametree*, formado a partir da aglutinação das palavras em inglês “*parametric*” e “*tree*”, ou seja, “paramétrica” e “árvore”, relacionando-se à abordagem paramétrica acerca da arborização urbana, possibilitada por esta ferramenta.

Para confeccionar a ferramenta algorítmico-paramétrica proposta, antes, esta dissertação revisita a ferramenta desenvolvida por Ribeiro (2018), com fins de embasar o passo-a-passo da programação de algoritmos. Logo, o subcapítulo **6.1 Estudo de Precedente** se ocupa em registrar esse estudo acerca da ferramenta algorítmico-paramétrica desenvolvida por Ribeiro (2018) para o cálculo do escoamento superficial. Este estudo visa a identificação de lacunas que possam orientar o desenvolvimento da ferramenta proposta nesta dissertação, contribuindo com o aprimoramento do trabalho desenvolvido por aquele autor e possibilitando novas aplicabilidades. O subcapítulo **6.2 Construção dos Algoritmos**, por sua vez, apresenta o passo-a-passo da programação dos algoritmos que compõem a ferramenta algorítmico-paramétrica *Parametree*, além de sua organização geral. Essa exposição visa exemplificar como se dá o processo de conversão de uma equação em uma ferramenta digital.

6.1 Estudo de Precedente

Conforme apresentado anteriormente, a ferramenta algorítmico-paramétrica selecionada para análise nesta seção foi desenvolvida por Ribeiro (2018) em sua dissertação de mestrado. A escolha se justifica pela convergência no emprego da equação do Método Racional para o cálculo de vazão do escoamento superficial como base de cálculo e funcionamento da ferramenta. Contudo, as particularidades estão em suas respectivas aplicabilidades: enquanto esta dissertação propõe um ajuste na equação do Método Racional para explicitar a influência da retenção pluvial arbórea na formação do escoamento superficial, Ribeiro (2018) reproduziu o exato processo da equação supracitada, ou seja, o autor a transformou em uma ferramenta algorítmico-paramétrica sem alterações. Assim, o trabalho de análise a ser

empreendido neste subcapítulo auxilia na compreensão das estratégias adotadas na confecção da ferramenta precedente, com vistas à identificação de lacunas que possam orientar a realização de possíveis ajustes na produção e funcionamento dos procedimentos propostos nesta dissertação, contribuindo para o progressivo aprimoramento dos conhecimentos e técnicas abordados.

A ferramenta algorítmico-paramétrica destacada para estudo foi desenvolvida na interface do *plug-in* Grasshopper em combinação com o *software* Rhinoceros. Iniciando as análises a partir de sua estruturação geral, é possível indicar que o autor se utilizou de uma organização em cinco grupos de algoritmos: (1) um grupo especializado na coleta de dados para a determinação da área total da bacia; (2) um grupo dedicado à identificação da área de materiais que encobrem o solo e a respectiva média ponderada de seus coeficientes de escoamento; (3) um grupo voltado à identificação do tempo de concentração da bacia em análise; (4) um grupo para o cálculo da intensidade de precipitação e, finalmente, (5) um grupo para reunir todos os resultados gerados pelos grupos anteriores e calcular a vazão de escoamento superficial. A Figura 14 apresenta um esquema dessa estruturação.

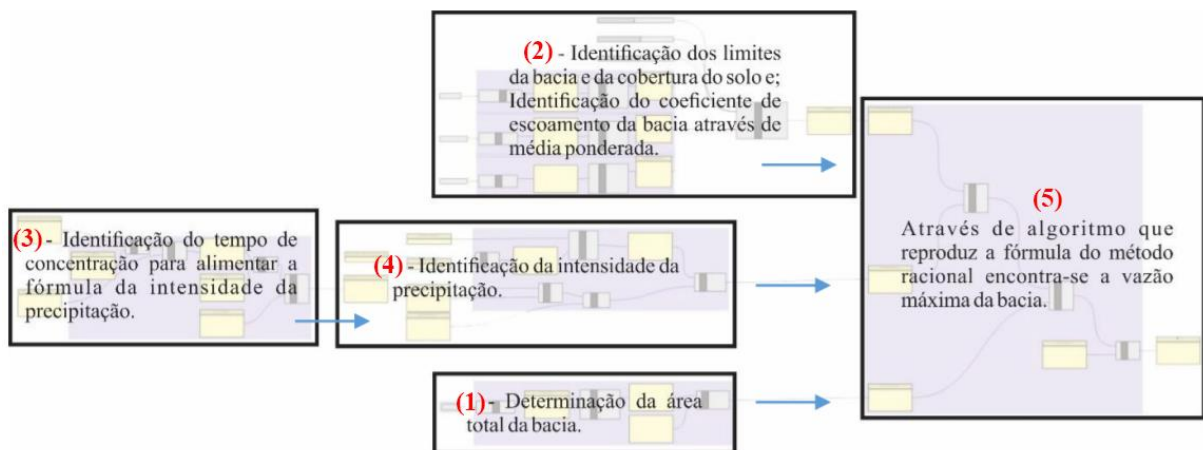


Figura 14. Estruturação geral da ferramenta. **Fonte:** Adaptado de Ribeiro (2018).

Os dados utilizados para alimentar o processo de cálculo por meio dos algoritmos foram obtidos a partir do método do mapa de pixels, utilizado por Juan et al. (2017) em um levantamento similar. O método consiste na aplicação de uma malha quadriculada por sobre uma imagem aérea para auxiliar na identificação e quantificação da área de cada material que encobre o solo. O material que ocupa a maior área dentro da quadrícula é destacado para ser representado no mapeamento. Assim, o mapa de pixels consiste em uma estimativa de materiais e áreas por

majoração, de sorte que quanto menor o tamanho da quadrícula mais aproximado da realidade é o valor obtido.

Ribeiro (2018) realizou essa etapa de mapeamento utilizando-se do *software* AutoCAD e de imagens de satélite obtidas através do Google Earth. A malha quadriculada aplicada, em um primeiro momento, era de dimensões 10 x 10 metros. Posteriormente, o autor aplicou malhas de 5 x 5 metros, obtendo um resultado mais apurado para os cálculos. A opção por uma malha quadriculada com essas dimensões se justifica pela extensão da área analisada, equivalente a 116 hectares. A Figura 15 demonstra o registro da confecção dos mapas de pixel.

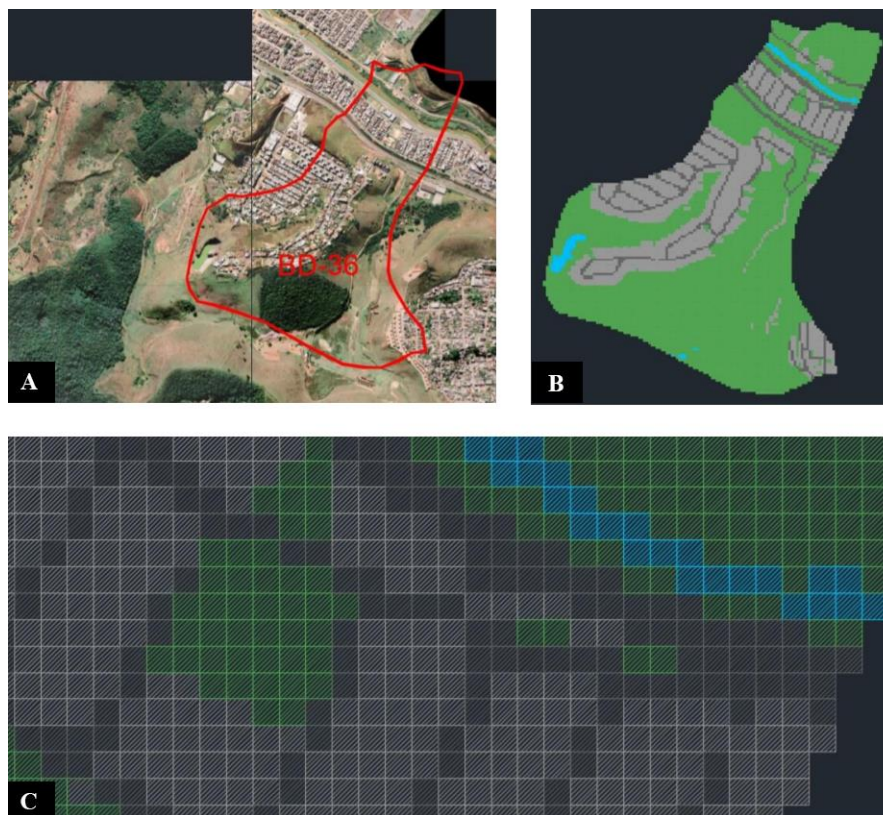


Figura 15. Esquema de produção do mapa de pixel. **Legenda:** (A) Imagem de satélite, com destaque para a bacia analisada; (B) Mapa de pixels com identificação dos materiais selecionados para análise; (C) Detalhe do mapa de pixels. **Fonte:** Adaptado de Ribeiro (2018).

Após a produção do mapeamento no AutoCAD, o arquivo contendo as quadrículas identificadas com seus respectivos materiais é exportado para o *software* Rhinoceros, possibilitando que os dados relativos às áreas de cada material sejam extraídos pela ferramenta no Grasshopper através de sua interface com o Rhinoceros. Por esse processo, compreende-se que a metodologia empregada por Ribeiro (2018) para a coleta de dados a serem utilizados pela ferramenta algorítmico-paramétrica se

constitui de um processo laborioso, segmentado em diversas etapas e dependente de diferentes programas computacionais.

Aprofundando o olhar sobre a ferramenta, identifica-se que esta se utiliza de uma combinação de algoritmos próprios das funções convencionais do Grasshopper, como o algoritmo *Geometry* para informar ao *plug-in* os elementos a serem importados do mapa de pixels para o fluxo de cálculo descrito na ferramenta; o algoritmo *Area* para o cálculo da área de cada elemento importado; o algoritmo *Mass Addition* para o somatório geral de áreas; o algoritmo *Weighted Average*, para o cálculo da média ponderada entre as áreas dos materiais e seus respectivos coeficientes de escoamento superficial. Além disso, também são empregados outros algoritmos que reproduzem operações matemáticas que compõe as demais equações que participam do Método Racional, como o algoritmo *Power* para a operação de potenciação, *Division* para divisão e *Multiplication* para multiplicação. A Figura 16 ilustra esse processo.

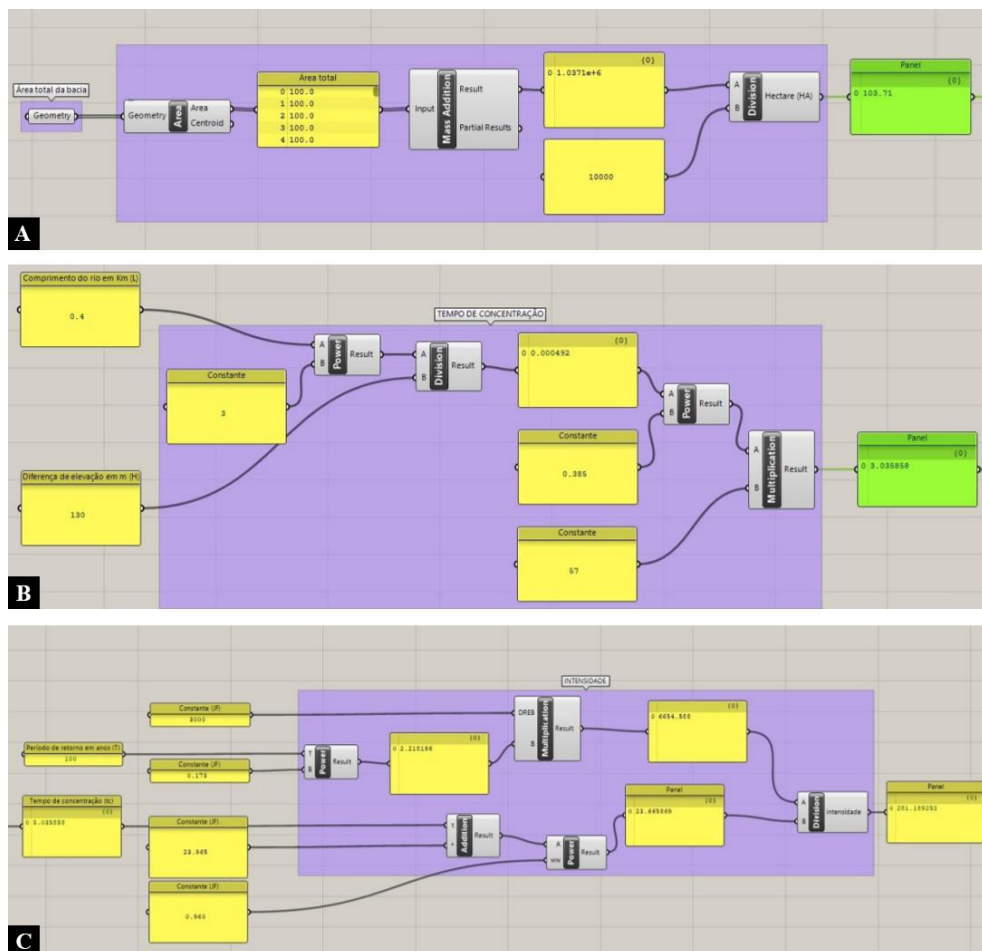


Figura 16. Combinação de algoritmos na ferramenta. **Legenda:** (A) seção do algoritmo para o cálculo da área da bacia; (B) seção do algoritmo para o cálculo do tempo de concentração da bacia; (C) seção do algoritmo para o cálculo da intensidade de chuva. **Fonte:** Adaptado de Ribeiro (2018).

A sumarizar, o autor da ferramenta em estudo aplicou algoritmos do próprio acervo disponível na interface do Grasshopper para reproduzir as operações e processos que compõem o Método Racional para estimativa do escoamento superficial. Essa estratégia, apesar de simples, não impacta negativamente na efetividade da ferramenta e nem se traduz como um fator depreciativo. Entretanto, a resultante visual dessa estratégia é uma ferramenta composta por muitas peças conectadas, uma vez que para reproduzir uma operação matemática dentro da equação, o autor necessitou de um grupo relativamente extenso de algoritmos. Como sugestão, Ribeiro (2018) poderia tê-los re combinado em algoritmos mais complexos pré-programados especificamente para desempenhar um determinado cálculo da equação, o que tenderia a simplificar o tamanho, o aspecto e o funcionamento da ferramenta. Isso é importante de ser considerado, pois nem todos os usuários, possivelmente, terão um conhecimento aprofundado sobre a ferramenta e sobre as dinâmicas de funcionamento do Grasshopper, de modo, então, que conforme mais simples o aspecto e a performance da ferramenta, mais fácil o seu manuseio por este público em específico.

Em termos do acervo de materiais contemplados pela ferramenta, Ribeiro (2018) aponta a utilização, em uma versão, de materiais e usos mais gerais, como “edificação”, “vias e calçadas”, “áreas permeáveis” e “cursos d’água”. Em uma segunda versão, o autor já traz uma discriminação entre os tipos de edificação, indicando as de uso residencial, institucional e comercial, além da inserção das feições “área de pasto” e “terrenos impermeáveis”. No total, configuram-se oito opções de materiais e usos do solo, porém ainda genéricas, as quais abrangem, em cada uma das feições, um intervalo considerável de coeficientes de escoamento superficial a depender da especificidade do material indicado. Nesse caso, o autor atribui ao usuário da ferramenta o trabalho de ajustamento de quais coeficientes seriam mais adequados de serem aplicados em dado contexto, o que poderia ser poupado com a indicação de materiais e usos mais específicos e com coeficientes de escoamento superficial predefinidos, simplificando o processo. Isso se justifica, pois, sob a influência de um grau considerável de subjetividade na aplicação dos respectivos coeficientes de escoamento superficial, a precisão do resultado final pode vir a ser afetada.

Nesse aspecto, os encaminhamentos que podem ser indicados a partir da análise empreendida no presente tópico são: (1) a possibilidade de simplificação do

processo de identificação e cálculo de área de materiais, de modo a depender de menos etapas e programas computacionais, utilizando-se, por exemplo, de mapeamentos de feições georreferenciadas no software ArcGIS importáveis diretamente para a interface do Rhinoceros; (2) o desenvolvimento de algoritmos pré-programados na interface do Grasshopper a partir da linguagem de programação C#, possibilitando a realização de cálculos mais complexos e reduzindo a quantidade de etapas e elementos necessários à obtenção do resultado final, o que simplificaria a aparência e o funcionamento da ferramenta; (3) a indicação de materiais mais específicos, associados a seus respectivos coeficientes de escoamento superficial, reduzindo a necessidade de intervenção do usuário sobre esse processo; e (4) a criação de métricas para facilitar a avaliação da redução do escoamento superficial em meio urbano a partir das estratégias implementadas. Além disso, deverão ser realizados ajustes no Método Racional para tornar possível a consideração da influência da arborização na redução do fluxo de escoamento superficial através da interceptação pluvial

De todo modo, reconhece-se o pioneirismo da proposta de Ribeiro (2018) em seu esforço por tornar possível a aplicação digital, através de uma ferramenta algorítmico-paramétrica, do Método Racional para estimativa do fluxo de escoamento superficial. As lacunas identificadas neste estudo fazem parte de limitações técnicas e conceituais que se apresentam diante de novos conceitos, as quais integram o processo de criação e aprendizagem, abrindo possibilidades para o progressivo aprimoramento de metodologias e expansão de suas aplicabilidades.

6.2 Construção dos Algoritmos

Seguindo a lógica utilizada por Ribeiro (2018) para a confecção da ferramenta algorítmico-paramétrica, o primeiro passo adotado para a transformação da equação atualizada do Método Racional no mecanismo digital da ferramenta *Parametree* é o seu ordenamento a partir de grupos de variáveis. Esses grupos de variáveis, posteriormente, irão compor os conjuntos funcionais da ferramenta, reunindo algoritmos que desempenham funções afins. A Figura 17 demonstra a organização das variáveis aplicada à equação atualizada do Método Racional, dividindo-a em quatro grupos distintos: o do coeficiente de escoamento superficial, o da intensidade máxima de precipitação, o dos fatores de arborização e o do escoamento superficial máximo.

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_m \cdot [(A - A_{arb}) + (1 - r) \cdot A_{arb}]}{360}$$

■ escoamento superficial máximo
 ■ coeficiente de escoamento superficial
 ■ intensidade máxima de precipitação
 ■ fatores de arborização

Figura 17. Divisão da equação proposta em grupos de variáveis afins. **Fonte:** O autor, 2022.

Após o agrupamento das variáveis, estas, por sua vez, foram traduzidas em um conjunto de algoritmos na interface digital do Grasshopper. Essa conversão se deu através da programação, utilizando-se dos algoritmos originais do próprio acervo do Grasshopper e da confecção de algoritmos próprios por meio da linguagem C#. Essa linguagem de programação foi escolhida, primeiro, pelo fato de que, juntamente com a linguagem VB (Visual Basic), é disponibilizada na interface do Grasshopper como opção de *scripting* para customização de algoritmos. Além disso, é uma linguagem de fácil aplicação, permitindo a criação de algoritmos de forma consideravelmente intuitiva.

Assim, foram criados não apenas os algoritmos relacionados às operações entre as variáveis da equação atualizada para o Método Racional, como também aqueles que expressam a implementação das métricas para qualificação do volume de escoamento superficial obtido para o contexto da bacia hidrográfica analisada. A Figura 18 demonstra o resultado da organização dos algoritmos de acordo com os grupos funcionais discriminados na equação atualizada para o Método Racional.

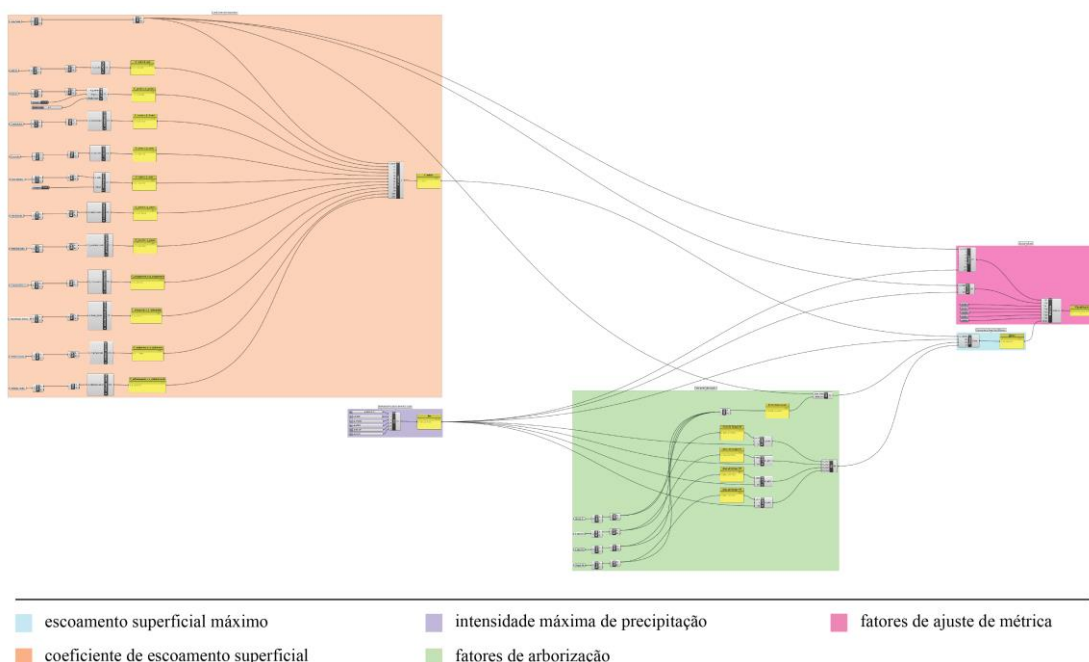


Figura 18. Organização dos grupos de algoritmos da ferramenta. **Fonte:** O autor, 2022.

Antes de aprofundar no passo-a-passo da programação de algoritmos, é importante compreender a utilização do mecanismo da Linguagem de Programação Visual (LPV), empregada na correlação de algoritmos. Essa correlação se apresenta na Figura 18 sob a aparência de fios, interconectando cada algoritmo.

Lima (2017a) considera que a LPV seja uma estratégia que permite a manipulação de algoritmos graficamente, sem a necessidade de especificá-los textualmente, através do que se chama de *scripting*. Desse modo, com a implementação de uma interface simplificada, que apresenta de maneira visual a correlação entre algoritmos e seus respectivos fluxos de dados, a LPV acaba por aproximar planejadores, arquitetos e designers do universo da programação. Universo este, que, por envolver vertentes de pensamento abstrato e matemático, conforme abordado por Woodbury (2010), tende a inibir profissionais habituados a um processo de pensamento fortemente criativo e visual.

Nesse sentido, a ferramenta *Parametree* se vale tanto da LPV quanto da programação textual em C# para expressar as regras e relações entre variáveis contidas na equação atualizada do Método Racional. A programação textual em C# constitui-se como etapa necessária para a criação customizada de algoritmos para desempenhar operações específicas que participam da referida equação, enquanto a LPV é aplicada na correlação entre algoritmos programados pelo autor ou já contidos no acervo de algoritmos do Grasshopper, permitindo o fluxo e processamento de dados até a obtenção do resultado final: a vazão de escoamento superficial e sua classificação de acordo com as métricas propostas.

Isto posto, a apresentação do processo de programação de algoritmos se inicia pelo grupo funcional para estimativa do coeficiente de escoamento superficial. Nesse grupo, solicita-se ao usuário da ferramenta que seja inserida a área total da bacia ou do recorte urbano analisado. Esse dado de área é coletado por meio do algoritmo *Area*, que já compõe o acervo de algoritmos originais do *plug-in* Grasshopper, a partir do modelo digital inserido previamente na interface do *software* Rhinoceros. Neste ponto, é importante clarificar uma questão: o Grasshopper é um *plug-in* desenvolvido para possibilitar o desenho algorítmico e, dentre os *softwares* aos quais pode ser associado, o Rhinoceros é um dos mais utilizados para este tipo de trabalho associativo. Quando ambas as interfaces são associadas, o Grasshopper consegue atuar na coleta de dados contidos em modelos inseridos na interface do Rhinoceros e na modelagem de soluções para a mesma interface. Isso justifica o fluxo descrito

anteriormente quando da obtenção dos dados de área com base em modelos digitais na interface do Rhinoceros.

Para a obtenção da área total do modelo analisado é importante desconsiderar no processo de coleta a área da copa das árvores, pois se encontram acima do nível do solo, sobrepostas a ele. Assim, evita-se que partes da área do recorte urbano em estudo sejam computadas duas vezes: a área do solo abaixo da copa e a área da copa. Esses dados de área, por sua vez, são somados pelo algoritmo *Mass Addition*, também disponível no acervo de algoritmos originais do *plug-in*. Assim, obtém-se a área total da bacia hidrográfica ou recorte urbano analisado. A Figura 19 ilustra essa sequência de algoritmos.



Figura 19. Sequência de algoritmos para coleta dos dados de área total. **Fonte:** O autor, 2022.

Deve-se lembrar que, de um modo geral, os projetos e modelos urbanos digitais são dimensionados a partir de unidades de área em metros quadrados (m²) e as áreas utilizadas para o cálculo do escoamento superficial no Método Racional são dimensionadas em hectares (ha). Logo, é necessário que a ferramenta converta os dados de área de metros quadrados para hectares, multiplicando esses valores por 0,0001. A conversão dos dados de área total da bacia ou recorte urbano será realizada mais adiante, quando seu valor necessitar de processamento para a obtenção de resultados no fluxo da equação.

Na sequência, são inseridas as áreas de cada material que forma as feições de uso e cobertura do solo. A ferramenta *Parametree* é equipada para considerar uma diversidade de 11 materiais: asfalto, concreto, grama, edificações, solo exposto, paralelepípedo, intertravado, intertravado com grama, concreto poroso, asfalto poroso e telhado verde, o que permite tanto a representação de um espaço urbano convencional quanto a testagem de soluções mais sustentáveis para o espaço construído.

O processo de coleta dos dados de área desses materiais segue o mesmo princípio descrito para a área total da bacia ou recorte urbano: as áreas de cada geometria referente aos respectivos materiais são coletadas a partir do modelo inserido no Rhinoceros através do algoritmo *Area*. Posteriormente, esses dados são somados pelo algoritmo *Mass Addition*, gerando o quantitativo total de área para cada

material. Os dados da área de cada material são processados, então, por um algoritmo programado que irá converter a área de metros quadrados para hectares, multiplicando-a por 0,0001. Além disso, multiplica-se esse valor pelo coeficiente de escoamento superficial específico do material, de acordo com a tabulação apresentada na Tabela 01, no subcapítulo **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas**.

Com essa sequência de algoritmos, realiza-se a etapa de cálculo descrita por $C_n \times A_n$, referente à multiplicação dos coeficientes de escoamento superficial de cada material por sua respectiva área, o que, ao ser dividido pela área total analisada, leva à obtenção do coeficiente de escoamento superficial médio. A Figura 20 demonstra a aplicação da sequência de algoritmos para a coleta de dados da área de asfalto. A Tabela 09 exemplifica a programação do algoritmo direcionado à conversão das unidades de área e à multiplicação da área de material pelo seu coeficiente de escoamento, identificado como $C_{asfalto}$. No caso desse material, o coeficiente de escoamento superficial específico é 0,83.

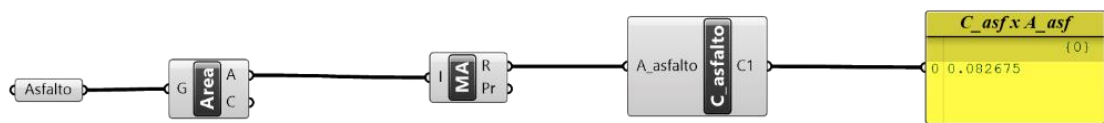


Figura 20. Sequência de algoritmos para coleta da área de materiais. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 09. Programação do algoritmo $C_{asfalto}$.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área de material ($A_{asfalto}$);	
Coefficiente de escoamento superficial específico ($C_{asfalto}$);	{ $C1 = (A_{asfalto} * 0.0001) * 0.83;$ }
Produto de $C \times A$ ($C1$)	

Fonte: O autor, 2022.

Todos os algoritmos referentes à coleta dos dados de área dos materiais seguem o padrão descrito de sequenciamento e programação, com exceção dos materiais “grama” e “solo exposto”. Esses materiais, conforme indicado na Tabela 01, no subcapítulo **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas**, possuem uma variação no coeficiente de escoamento superficial a depender do tipo de solo e da declividade do terreno.

Conforme abordado por Goldenfum e Tucci (1996), se a grama está instalada em um terreno argiloso, há uma tendência de se produzir um volume maior de escoamento superficial, pois este é um tipo de solo que atinge o ponto de saturação muito mais rápido em eventos de chuva, se comparado aos solos arenosos, por

exemplo. Da mesma forma, quanto maior for a declividade do terreno, maior é a componente da força que leva o volume de água a escoar superficialmente do que a penetrar no solo. Assim, gera-se, também, um volume maior de escoamento superficial, apesar da grama ser considerada um tipo permeável de cobertura do solo.

Tendo em vista esses aspectos, além da área do terreno coberta por grama e seu respectivo coeficiente de escoamento superficial, também deve-se inserir no algoritmo de cálculo um parâmetro relacionado ao tipo de solo e outro, à declividade do terreno. Com isso, para indicar se o solo é argiloso ou não, insere-se ao algoritmo uma variável chamada “Argiloso” que irá trabalhar com dados booleanos, ou seja, com classificações de verdadeiro ou falso.

Esses dados de classificação são oferecidos pelo algoritmo *Boolean Toggle*, já contido no acervo de algoritmos genéricos do Grasshopper, o qual, através da indicação do usuário, demarca as expressões “*True*” para verdadeiro e “*False*” para falso. Desse modo, caso o solo seja argiloso, o usuário da ferramenta clica no algoritmo *Boolean Toggle* e escolhe a opção “*True*”. Caso seja arenoso, o usuário deverá escolher a opção “*False*”. Assim, a ferramenta será capaz de entender qual faixa de coeficiente de escoamento superficial para o solo deverá ser trabalhada.

Quanto à declividade do terreno, inclui-se ao algoritmo programado a variável “Declividade”, a qual irá receber os dados de porcentagem da inclinação do terreno. De acordo com Goldenfum e Tucci (1996), o escoamento superficial varia seguindo um padrão de três faixas de inclinação de terreno: a primeira faixa abrange terrenos planos ou com inclinação inferior a 2%; a segunda, com inclinação variando entre 2% e 7%; e por fim, a terceira, com inclinação se estendendo para mais de 7%.

O dado de inclinação é oferecido ao algoritmo através de um *Slider* numérico, no qual o usuário indica qual a porcentagem a ser adotada para análise do terreno. Dessa forma, o algoritmo é capaz de combinar todos os dados, por meio de suas regras pré-programadas, e encontrar a taxa do coeficiente de escoamento superficial ideal para as condições do solo sobre o qual a grama está instalada. A Figura 21 demonstra a aplicação da sequência de algoritmos supracitada e a Tabela 10, a programação do algoritmo *C_grama*, construído para o cálculo do escoamento superficial da grama, obedecendo às regras de faixas de escoamento superficial para os tipos e inclinações do solo.

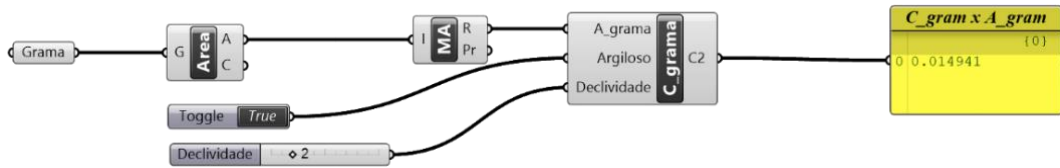


Figura 21. Sequência de algoritmos para coleta da área de grama. Fonte: O autor, 2022.

Tabela 10. Programação do algoritmo *C_grama*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área de material (<i>A_grama</i>);	if (<i>Argiloso</i> == true && <i>Declividade</i> <= 2)
Coefficiente de escoamento superficial específico (<i>C_grama</i>);	{ <i>C2</i> = (<i>A_grama</i> * 0.0001) * 0.15;}
Produto de C x A (<i>C2</i>);	if (<i>Argiloso</i> == true && <i>Declividade</i> > 2 && <i>Declividade</i> <= 7)
Declividade;	{ <i>C2</i> = (<i>A_grama</i> * 0.0001) * 0.20;}
Tipo de solo (<i>Argiloso/Arenoso</i>)	if (<i>Argiloso</i> == true && <i>Declividade</i> > 7)
	{ <i>C2</i> = (<i>A_grama</i> * 0.0001) * 0.30;}
	if (<i>Argiloso</i> == false && <i>Declividade</i> <= 2)
	{ <i>C2</i> = (<i>A_grama</i> * 0.0001) * 0.08;}
	if (<i>Argiloso</i> == false && <i>Declividade</i> > 2 && <i>Declividade</i> <= 7)
	{ <i>C2</i> = (<i>A_grama</i> * 0.0001) * 0.13;}
	if (<i>Argiloso</i> == false && <i>Declividade</i> > 7)
	{ <i>C2</i> = (<i>A_grama</i> * 0.0001) * 0.18;}

Fonte: O autor, 2022.

Já em relação ao solo exposto, o fator que impacta na variação do fluxo de escoamento superficial é a condição da superfície do solo: se plana ou ondulada. Em uma dinâmica bastante similar ao que acontece com o comportamento do escoamento superficial diante da declividade do terreno para solos cobertos com grama, se a área de solo exposto possui uma superfície ondulada, a componente do vetor de força que atua sobre a formação do escoamento superficial é maior do que aquela que incide sobre a penetração no solo. Obtém-se, então, um maior fluxo de escoamento superficial do que seria observado em solos planos (GOLDENFUM; TUCCI, 1996).

Para indicar o tipo de condição de superfície ao algoritmo programado para o cálculo do coeficiente de escoamento superficial do solo exposto (*C_soloexposto*), utiliza-se, também, o algoritmo *Boolean Toggle*, do acervo de algoritmos genéricos do Grasshopper, com a determinação das classificações de “*False*” ou “*True*”. Esse tipo de dado booleano é inserido ao algoritmo através da variável de nome “Plano”. Se a superfície do solo for, de fato, plana, o usuário deve selecionar a opção “*True*” no algoritmo *Boolean Toggle*. Caso seja ondulado, o mesmo deve selecionar a opção “*False*”, para que o algoritmo compreenda o tipo de faixa de coeficiente de escoamento superficial que deve ser trabalhado. A Figura 22 e a Tabela 11 demonstram os procedimentos para a obtenção dos dados de área relativos à superfície de solo exposto.

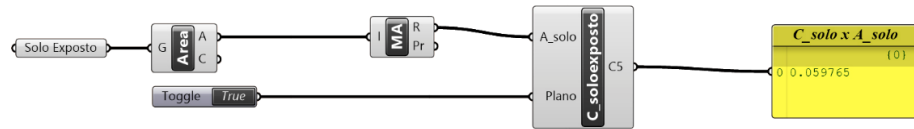


Figura 22. Sequência de algoritmos para coleta da área de solo exposto. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 11. Programação do algoritmo *C_soloexposto*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área de material (A_solo);	
Coefficiente de escoamento superficial específico (C_solo);	if (Plano == true) {C5 = (A_solo * 0.0001) * 0.60;}
Produto de C x A (C5);	if (Plano == false) {C5 = (A_solo * 0.0001) * 0.70;}
Tipo de superfície (Plano/Ondulado)	

Fonte: O autor, 2022.

Após a obtenção e o manejo dos dados de área e de coeficiente de escoamento de cada material contemplado pela ferramenta *Parametree*, a última tarefa executada dentro do grupo de algoritmos voltados para o cálculo do coeficiente de escoamento superficial é o cálculo do coeficiente de escoamento superficial médio da área. Esse cálculo é feito pela divisão do somatório dos produtos da área de cada material com seu respectivo coeficiente de escoamento pela área total analisada. O algoritmo *C_médio* foi programado para realizar esse procedimento, reunindo todos os resultados obtidos pelos algoritmos anteriores, processando a área total analisada e convertendo-a para hectares. Por fim, calcula-se a média do coeficiente de escoamento superficial. A Figura 23 e a Tabela 12 ilustram o algoritmo e sua respectiva programação.



Figura 23. Algoritmo *C_médio*. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 12. Programação do algoritmo *C_médio*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área da bacia ou recorte urbano analisado (A_total);	
Produtos de C x A (C _n)	{C = (C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6 + C7 + C8 + C9 + C10 + C11) / (A_total * 0.0001);}
Coefficiente médio de escoamento superficial (C)	

Fonte: O autor, 2022.

O próximo grupo de algoritmos a ser contemplado é aquele voltado ao cálculo da intensidade máxima de precipitação. Esse grupo é formado apenas pelo

algoritmo programado para a realização do referido cálculo e os algoritmos de *Slider* numéricos para a inserção dos dados das variáveis K, a, b, e c, de calibragem dos dados climáticos coletados pela estação pluviométrica; da variável T, do período de retorno da precipitação; e da variável t, do tempo de concentração da bacia em análise. Todas essas variáveis compõem a equação para estimativa da intensidade máxima de precipitação, conforme apresentado na Figura 14, no tópico **5.1 Adaptação do Método Racional**. A Figura 24 demonstra a composição desse grupo e a Tabela 13, a programação da equação da intensidade máxima de precipitação no algoritmo *Im*.

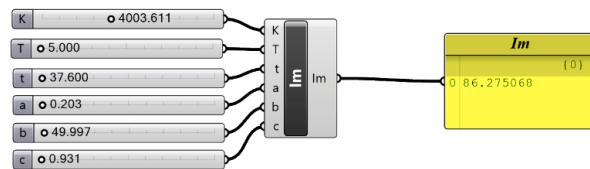


Figura 24. Algoritmo *Im*. Fonte: O autor, 2022.

Tabela 13. Programação do algoritmo *Im*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Fatores de calibragem da estação pluviográfica (K, a, b e c); Período de retorno da precipitação (T) Tempo de concentração (t) Intensidade máxima de precipitação (Im)	$\{Im = (K * (Math.Pow (T, a))) / (Math.Pow (t + b, c));\}$

Fonte: O autor, 2022.

O outro grupo contemplado na ferramenta é o dos fatores de arborização. Esse grupo abrange os cálculos da área arborizada por conjunto de espécies, da área total arborizada, da área da bacia ou recorte de estudo livre de arborização e da taxa total de retenção pluvial. A obtenção da área arborizada por conjunto de espécies se dá através da utilização dos algoritmos *Area* e *Mass Addition*, assim como realizado na coleta de dados de área de materiais de cobertura do solo. O procedimento segue o delineamento proposto no tópico **5.2 Modelagem da Interceptação Pluvial**, considerando as características gerais das espécies arbóreas, como tamanho e densidade da copa, tamanho e tipologia de folhas e textura do tronco.

Após a coleta dos dados de área, a informação segue por dois caminhos dentro do grupo de algoritmos. O primeiro é a somatória geral da área arborizada. Tal resultado é alcançado pela soma das áreas arborizadas dos quatro conjuntos identificados, o qual é processado, novamente, pelo algoritmo *Mass Addition*. Em seguida, o resultado desse somatório geral é subtraído do valor da área total da bacia ou recorte de estudo, proveniente do grupo de algoritmos especializados no

coeficiente de escoamento superficial, para, então, encontrar a quantidade de área existente fora do alcance das copas das árvores. Esse montante é identificado na ferramenta pela variável Ax, calculada pelo algoritmo de mesmo nome. Ressalta-se, mais uma vez, a necessidade da conversão das unidades de área de metros quadrados para hectares dentro do algoritmo programado, multiplicando os valores por 0,0001. O caminho de algoritmos supracitado é ilustrado na Figura 25 e a programação do algoritmo Ax é indicada na Tabela 14.

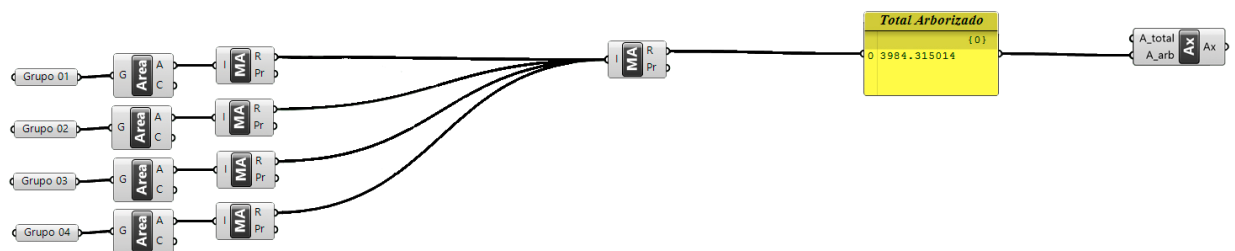


Figura 25. Sequência de algoritmos para coleta de dados de área arborizada e para o cálculo da área fora da abrangência das copas das árvores. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 14. Programação do algoritmo Ax.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área da bacia ou recorte urbano analisado (A_total);	
Área total arborizada (A_arb)	{Ax = (A_total – A_arb) * 0.0001;}
Área total livre de arborização (Ax)	

Fonte: O autor, 2022.

Antes de apontar para o segundo caminho percorrido pelos dados de área arborizada dentro de algoritmos dos fatores de arborização, é importante esclarecer que a variável Ax não compõe, explicitamente, a equação revisada do Método Racional. Como explicado, ela representa a subtração da área arborizada da área total analisada, indicada na equação por $A - A_{arb}$. Porém, para facilitar a transmissão de dados na ferramenta de um algoritmo para outro, achou-se conveniente expressar o resultado dessa etapa de cálculo através de uma variável, condensando a sua comunicação. Sendo assim, não há alteração no funcionamento da equação proposta nesta dissertação, apenas ajustes de representação de dados na confecção da ferramenta, visando uma melhor organização de suas funções.

O segundo caminho percorrido pelos dados de área arborizada por conjunto de espécies é o do cálculo do fator de retenção pluvial. Conforme comentado nos subsídios teóricos, a taxa de interceptação pluvial varia de acordo com a intensidade da precipitação. Isso se deve à dinâmica de saturação da estrutura da árvore, pois uma vez atingida a taxa de saturação, ocorre uma queda na capacidade de retenção pluvial, de modo que o volume excedente escorre pelas folhas e troncos

até atingir o solo. De acordo com a pesquisa realizada por Alves (2015), já abordada no subcapítulo **3.2 O Verde Urbano e os Recursos Hídricos**, a variação nas taxas de interceptação pluvial foi observada em duas faixas distintas de intensidade de precipitação: eventos de precipitação com intensidade de até 25 mm/h e eventos com intensidade de 25 a 79,2 mm/h. Nesse contexto, as chuvas de intensidade variando até 25 mm/h foram consideradas por aquela autora como chuvas de baixa intensidade e aquelas com intensidade variando entre 25 e 79,2 mm/h foram classificadas como chuva de alta intensidade. Com isso, foi na faixa de chuvas de alta intensidade em que se notou uma queda de cerca de 36% na taxa de interceptação pluvial, segundo a comparação de dados realizada nesta dissertação, no tópico **5.2 Modelagem da Interceptação Pluvial**.

Logo, é necessário que o algoritmo detecte em qual faixa de intensidade de precipitação está o evento pluviométrico simulado pela ferramenta para que a correta taxa de interceptação pluvial seja considerada no cálculo. Os algoritmos *R_arb*, programados para estimar a taxa de interceptação pluvial de cada grupo arbóreo e para a realização da etapa de multiplicação entre as áreas de arborização e as respectivas taxas de retenção [$A_{arb} \times (1 - r)$], necessitam, então, as variáveis de área arborizada, a taxa de retenção e a intensidade máxima de precipitação. O algoritmo *R_arb1*, utilizado como exemplo dessa série de algoritmos, está ilustrado na Figura 26 e a programação de suas regras internas é indicada na Tabela 15. Ressalta-se que a multiplicação dos fatores por 0,0001 segue a necessidade de conversão das unidades de área de metro quadrado para hectare.



Figura 26. Algoritmo *R_arb1*. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 15. Programação do algoritmo *R_arb1*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área arborizada do grupo 01 (<i>A_arb1</i>);	if ($Im \leq 25$)
Taxa de retenção pluvial (<i>r</i>);	{ $r = 0.6$;}
Intensidade máxima de precipitação (<i>Im</i>);	if ($Im > 25$)
Fatores de arborização do grupo 01 (<i>R_arb1</i>)	{ $r = 0.216$;}
	{ $R_arb1 = ((A_arb1 * 0.0001) * (1 - r));$ }

Fonte: O autor, 2022.

Novamente, a variável *R_arb* também não compõe o acervo de variáveis explícitas na equação proposta nesta pesquisa. Contudo, à luz da justificativa

empregada na construção do algoritmo A_x , a variável R_{arb} foi definida para representar a expressão contida na equação $[A_{arb} \times (1 - r)]$. Assim, para evitar que os dados sejam transmitidos de algoritmo para algoritmo sob a forma de operações matemáticas, convencionou-se representá-los sob a forma de variáveis, sem, entretanto, alterar o funcionamento da equação original proposta neste estudo.

O último algoritmo que participa do grupo dos fatores de arborização é o responsável pela soma dos produtos da área de arborização de cada conjunto arbóreo pelas taxas de retenção pluvial. Esse algoritmo foi nomeado de R_t (FIGURA 27; TABELA 16), considerando a questão da retenção total da arborização, e utiliza como variáveis necessárias para a realização de sua função os resultados obtidos pelos algoritmos R_{arb} .

Seguindo pela mesma linha de raciocínio comentada anteriormente, a variável R_t não compõe a equação revisada do Método Racional, porém foi adotada para representar a soma dos produtos das áreas dos conjuntos arbóreos pelas taxas de retenção pluvial, alcançando a área total arborizada e a retenção total. O processo de conversão das operações em variáveis, conforme já indicado, não prejudica o funcionamento da equação, apenas facilita a comunicação de dados e a programação dos algoritmos na ferramenta.



Figura 27. Algoritmo R_t . **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 16. Programação do algoritmo R_t .

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Fatores de arborização do grupo (R_{arb_n})	{ $R_t = R_{arb1} + R_{arb2} + R_{arb3} + R_{arb4};$ }
Fatores de arborização total (R_t)	

Fonte: O autor, 2022.

O penúltimo grupo de algoritmos a ser contemplado é aquele voltado ao cálculo da vazão de escoamento superficial. Esse grupo é formado apenas pelo algoritmo programado para a realização do referido cálculo, necessitando, para isso, das variáveis $C_{médio}$, Im , A_x e R_t , obtidas através do trabalho executado pelos algoritmos descritos ao longo deste subcapítulo.

Conforme abordado anteriormente, as variáveis A_x e R_t representam, respectivamente, as expressões $[A - A_{arb}]$ e $[A_{arb} \times (1 - r)]$ contidas na equação

revisada do Método Racional. Nesse sentido, para facilitar o processo de programação do algoritmo, que se vale da escrita de regras com base nos dados de entrada das variáveis, optou-se por substituir as expressões supracitadas pelas variáveis com o intuito de facilitar o *scripting* e a comunicação de dados entre os algoritmos. O algoritmo *Qmax* está indicado na Figura 28 e sua programação está descrita na Tabela 17.



Figura 28. Algoritmo *Qmax*. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 17. Programação do algoritmo *Qmax*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Coeficiente médio de escoamento superficial (C_médio);	{Qmax = (C_médio * Im * (Ax + Rt)) / 360;}
Intensidade máxima de precipitação (Im);	
Área total livre de arborização (Ax);	
Fatores de arborização total (Rt)	

Fonte: O autor, 2022.

Por fim, o último grupo de algoritmos da ferramenta *Parametree* compreende a qualificação das dinâmicas de vazão do escoamento superficial com base nas métricas definidas no tópico **5.3. Delineamento de Métricas**. Assim como realizado no referido tópico, é necessário delimitar os limites inferior e superior da escala de métricas. O limite inferior é representado pela variável *Q1*, a qual estima o fluxo de escoamento superficial da bacia ou recorte de bacia analisado sob condições naturais, ou seja, com grama recobrindo o solo e com cobertura arbórea de, pelo menos, 40% da área total. Como a arborização é um fator importante nesse cálculo, também deve-se atentar para a influência da intensidade da precipitação sobre a capacidade de retenção pluvial, permitindo que o algoritmo identifique quais taxas de retenção devem ser utilizadas. O algoritmo *Qmax1*, que desempenha esse cálculo, é representado na Figura 29 e sua programação é descrita na Tabela 18.

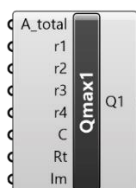


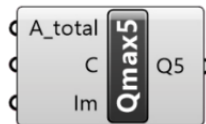
Figura 29. Algoritmo *Qmax1*. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 18. Programação do algoritmo *Qmax1*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área da bacia ou recorte urbano analisado (<i>A_total</i>);	if (<i>Im</i> <= 25)
Taxa de retenção por grupo (<i>r_n</i>);	{ <i>r1</i> = 0.6; <i>r2</i> = 0.2616; <i>r3</i> = 0.2985; <i>r4</i> = 0.418;}
Coeficiente médio de escoamento superficial (<i>C</i>);	if (<i>Im</i> > 25)
Fatores de arborização total (<i>Rt</i>);	{ <i>r1</i> = 0.216; <i>r2</i> = 0.0942; <i>r3</i> = 0.1075; <i>r4</i> = 0.1505;}
Intensidade máxima de precipitação (<i>Im</i>)	{ <i>C</i> = 0.15;}
Limite mínimo de escoamento superficial (<i>Q1</i>)	{ <i>Rt</i> = (<i>A_total</i> * 0.0001 * 0.1 * ((1 - <i>r1</i>) + (1 - <i>r2</i>) + (1 - <i>r3</i>) + (1 - <i>r4</i>)));}
	{ <i>Q1</i> = (<i>C</i> * <i>Im</i> * ((<i>A_total</i> * 0.0001) - <i>Rt</i>) + (<i>Rt</i>)) / 360;}

Fonte: O autor, 2022.

O limite superior, por sua vez, é representado pela variável *Q5*, a qual estima o fluxo de escoamento superficial da bacia ou recorte de bacia analisado sob condições de total urbanização e impermeabilização do solo. Para essa estimativa, considera-se que o solo tenha 55% de sua área coberta por edificações, 20% por asfalto e 25% por concreto, sendo que o coeficiente de escoamento superficial adotado para as edificações é de 0,85, para o asfalto é 0,83 e para o concreto é 0,88. O algoritmo *Qmax5*, que desempenha esse cálculo, e sua programação são apresentados, respectivamente, na Figura 30 e na Tabela 19.

**Figura 30.** Algoritmo *Qmax5*. Fonte: O autor, 2022.**Tabela 19.** Programação do algoritmo *Qmax5*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
Área da bacia ou recorte urbano analisado (<i>A_total</i>);	{ <i>C</i> = ((0.55 * 0.85) + (0.20 * 0.83) + (0.25 * 0.88));}
Coeficiente médio de escoamento superficial (<i>C</i>);	
Intensidade máxima de precipitação (<i>Im</i>);	{ <i>Q5</i> = (<i>C</i> * <i>Im</i> * (<i>A_total</i> * 0.0001)) / 360;}
Limite máximo de escoamento superficial (<i>Q5</i>)	

Fonte: O autor, 2022.

Após essa etapa, divide-se o intervalo existente entre ambos os limites em cinco partes iguais. Quanto mais próximo do limite inferior, melhor a condição do fluxo de escoamento superficial na bacia ou recorte de bacia analisado. Assim, a partir desse limite inferior são distribuídas as classificações “ótimo”, “bom”, “regular”, “ruim” e “crítico” para cada uma das partes delimitadas. Para classificar o fluxo de escoamento superficial encontrado, o algoritmo deve, então, considerar os limites identificados, as cinco classificações textuais apontadas e a taxa de escoamento superficial obtida. A Figura 31 apresenta a configuração dessa sequência de

algoritmos, enquanto a Tabela 20 exemplifica a programação aplicada para a criação do algoritmo *Métricas*.

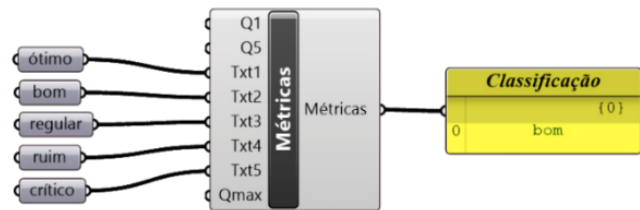


Figura 31. Algoritmo *Métricas*. Fonte: O autor, 2022.

Tabela 20. Programação do algoritmo *Métricas*.

Variáveis envolvidas	Scripting em C#
	if (Qmax > Q1 && Qmax <= (Q1 + ((Q5 - Q1) / 5)) {Métricas = Txt1;}
Limite mínimo de escoamento superficial (Q1);	if (Qmax > (Q1 + ((Q5 - Q1) / 5)) && Qmax <= (Q1 + 2 * ((Q5 - Q1) / 5))
Limite máximo de escoamento superficial (Q5);	{Métricas = Txt2;}
Classificação "ótimo" (Txt1);	if (Qmax > (Q1 + 2 * ((Q5 - Q1) / 5)) && Qmax <= (Q1 + 3 * ((Q5 - Q1) / 5))
Classificação "bom" (Txt2);	{Métricas = Txt3;}
Classificação "regular" (Txt3);	if (Qmax > (Q1 + 3 * ((Q5 - Q1) / 5)) && Qmax <= (Q1 + 4 * ((Q5 - Q1) / 5))
Classificação "ruim" (Txt4);	{Métricas = Txt4;}
Classificação "crítico" (Txt5);	if (Qmax > (Q1 + 4 * ((Q5 - Q1) / 5)) && Qmax <= Q5)
Escoamento superficial identificado (Qmax)	{Métricas = Txt5;}

Fonte: O autor, 2022.

Através da combinação dessa série de algoritmos a ferramenta *Parametree* é capaz de realizar todas as operações de cálculo necessárias para a obtenção do fluxo de escoamento superficial, além de encontrar a qualificação ideal para determinado contexto a partir das métricas delineadas nesta dissertação.

7 0 LOCAL



7 O LOCAL

Este capítulo se dedica em projetar os conceitos e definições reunidas na discussão teórica desta dissertação sobre o recorte geográfico delimitado para a realização das atividades práticas. Assim, o subcapítulo **7.1 Panorama Histórico da Formação do Território** inicia a abordagem através de uma breve análise da área compreendido pela sub-bacia hidrográfica do Canal da Costa, em Vila Velha – ES, com enfoque no histórico de ocupação do território e nas transformações sofridas pelo curso d'água.

O subcapítulo **7.2 Áreas Vulneráveis a Alagamentos** se debruça na identificação das regiões abrangidas pelos bairros Soteco e Divino Espírito Santo que mais são afetadas pela dinâmica recorrente de alagamentos. A partir dessas análises, o subcapítulo **7.3 Definição dos Recortes de Intervenção** apresenta os recortes destacados da delimitação prévia para a área de estudos, compreendida pelos bairros Soteco e Divino Espírito Santo, em Vila Velha – ES, baseando-se na sobreposição de variáveis agravantes para a problemática dos alagamentos urbanos.

7.1 Panorama Histórico da Formação do Território

A sub-bacia do Canal da Costa é uma das sub-bacias hidrográficas que compõem o sistema hidrográfico da bacia do Rio Jucu. Esta bacia está completamente inserida nos limites geográficos do Estado do Espírito Santo e ocupa uma área equivalente a 2.221 km². Ao longo de seu percurso hídrico, a bacia do Rio Jucu abarca os municípios de Vila Velha, Viana, Cariacica, Guarapari, Marechal Floriano e Domingos Martins. Ou seja, dependendo da abrangência desta bacia dentro dos limites municipais citados, toda ou grande parte das dinâmicas hidrológicas observadas nesses municípios compreende um sistema maior, que é a própria bacia do Rio Jucu (SARTÓRIO, 2018).

Essa abrangência do sistema hidrográfico do Rio Jucu se deve à presença de dois afluentes principais: o Rio Jucu Braço Norte e o Rio Jucu Braço Sul. Ambos os braços se encontram na divisa dos municípios de Viana e Domingos Martins, formando, então, um único corpo hídrico que deságua no litoral do município de Vila Velha (SARTÓRIO, 2018). A Figura 32 ilustra essa composição descrita para a bacia hidrográfica do Rio Jucu.

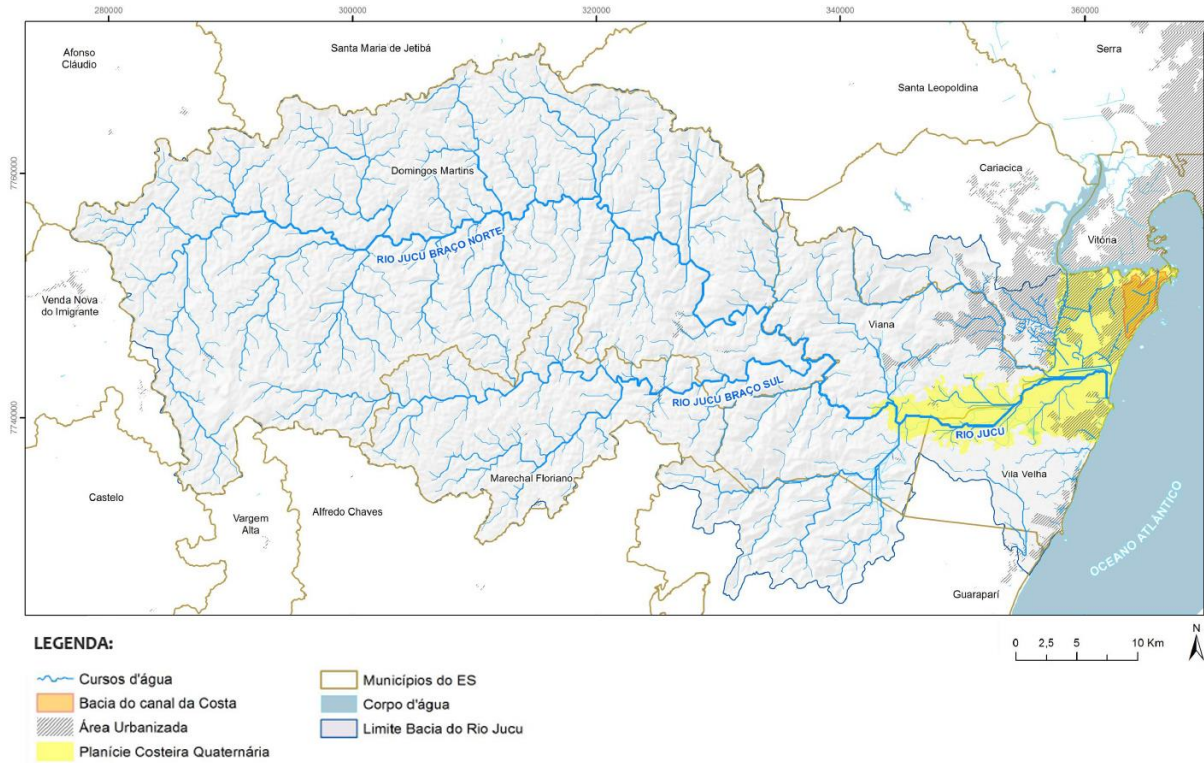


Figura 32. Localização da sub-bacia do Canal da Costa dentro do sistema hidrográfico do Rio Jucu. **Fonte:** Adaptado de Sartório (2018).

Em seu estado natural, o Canal da Costa era um rio, conhecido como Rio da Costa, e que estava diretamente conectado ao corpo principal do Rio Jucu (FIGURA 33). Por conter, originalmente, um percurso marcado pela formação de meandros, o que caracteriza um processo de perda de velocidade no fluxo de escoamento hídrico, o Rio da Costa passava por períodos recorrentes de transbordamentos em épocas chuvosas, inundando a planície sobre a qual se assentava (SARTÓRIO, 2018). A Figura 34 exemplifica um desses episódios de transbordamentos.

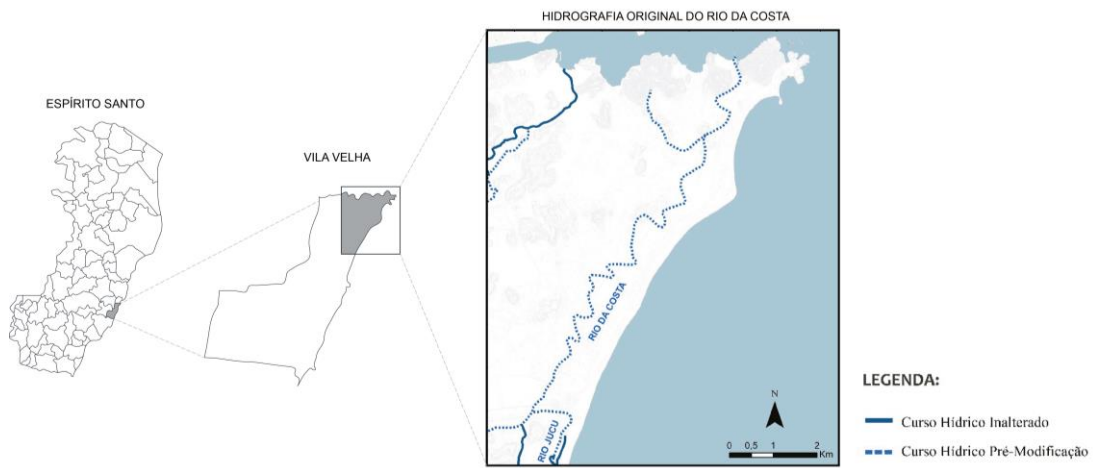


Figura 33. Antigo curso do Rio da Costa e sua conexão ao Rio Jucu. **Fonte:** Elaborado pelo autor com base em PMVV (2019) e Sartório (2018).



Figura 34. Transbordamento do Rio da Costa em 1960. **Fonte:** Adaptado de IJSN (1960).

Esse cenário de alta capilaridade hídrica, no qual rios, riachos e lagoas eram elementos marcantes na paisagem, permaneceu praticamente intocado por um longo período quando se considera que as primeiras ocupações na região de Vila Velha foram iniciadas em 1535, em decorrência da colonização portuguesa (DA-SILVA-ROSA et al., 2018).

O Espírito Santo se manteve em uma condição de isolamento econômico até a primeira metade do século XX, principalmente pela carência de infraestruturas que permitissem uma maior integração com as demais regiões brasileiras. A economia era majoritariamente baseada na produção primária, ou seja, vinculada ao setor agrícola, e apresentava avanços anuais incipientes, se comparados às dinâmicas econômicas dos demais estados da região sudeste, que já haviam iniciado seu processo de industrialização. Assim, não se observava, ainda, em terras capixabas o cenário de explosão urbana já em curso em outras cidades brasileiras (SIQUEIRA, 2009).

Os principais modais de integração comercial existentes no estado, no período posterior a 1910, eram a Estrada de Ferro Leopoldina, que conectava Vitória ao Rio de Janeiro, e a Estrada de Ferro Vitória-Minas, que permitia uma conexão entre Vitória e o Estado de Minas Gerais. Devido a essa interconexão de modais oriundos de diferentes localidades, o Porto de Vitória começou a apresentar certa relevância internacional por escoar a produção de dois importantes polos comerciais do país (SIQUEIRA, 2009).

O porto alcançou ainda mais projeção com a construção do novo cais para a exportação do minério de ferro proveniente de Minas Gerais, instalado na margem da Baía de Vitória pertencente ao município de Vila Velha. Esse cais, conhecido por Cais de Paul, foi ativado em 1963, e, juntamente com o capital prospectado com a construção e ativação do Porto de Tubarão, em Vitória, foi responsável pela geração de recursos que seriam então aplicados como subsídio para a expansão industrial no Estado (IJSN, 1987).

A partir desse momento, plantas industriais passaram a ser alocadas nos municípios que hoje compõem a Região Metropolitana da Grande Vitória, como Viana, Cariacica, Serra e Vila Velha, aproveitando da infraestrutura logística já instalada, e promovendo, também, um processo de expansão da matriz urbana nessas localidades. Tal expansão foi potencializada pelo êxodo rural, pois, após a erradicação dos cafezais ditos antieconômicos – no começo da década de 1960, em decorrência da superprodução de café –, houve uma grande liberação de mão de obra, que enxergou na industrialização uma possibilidade de reinserção no mercado de trabalho urbano (IJSN, 1987).

Com isso, a cidade de Vila Velha vivenciou um crescimento considerável de sua população, sendo o segundo município da Região Metropolitana da Grande Vitória que mais cresceu de acordo com esse aspecto a partir da década de 1970. Acompanhando a tônica do crescimento populacional, observou-se que a malha urbana de Vila Velha se expandiu, avançando por sobre a sub-bacia do Rio da Costa e por sobre áreas livres localizadas em propriedades fundiárias ainda controladas por famílias influentes da região (SARTÓRIO, 2018).

Foi esse processo de expansão da malha urbana por sobre a sub-bacia do Rio da Costa que forçou a realização de sucessivas intervenções de viés sanitarista no local visando aumentar a drenagem do solo, dado que esta era uma região recorrentemente alagável e vista como imprópria para moradia.

Logo, a estratégia implementada pelo poder público foi a de retificação e canalização dos corpos hídricos que compunham a paisagem local (MATTOS, 2013), promovendo drásticas mudanças nos processos e fluxos hidrológicos observados na localidade: o próprio Rio da Costa foi transformado em um canal sem conexão com o Rio Jucu, com o qual se ligava, o que rompeu a inter-relação observada entre a bacia principal e a sub-bacia. Após essa mutilação hídrica, a sub-bacia do, agora, Canal da Costa figura como um sistema alienígena, deslocado de seu contexto, e repleto de

cicatrizes. A Figura 35 apresenta a conformação atual do sistema de canais de originários a partir da sub-bacia do Rio da Costa.



Figura 35. O sistema de canais pós-intervenções urbanas. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base em PMVV (2019) e em Sartório (2018).

Atualmente, o Canal da Costa é caracterizado por apresentar seções tamponadas e trechos ocupados por edificações. Nas seções em que o canal é exposto e livre de edificações, seu leito é artificializado e bastante estreito, estrangulado pela presença de vias de circulação de veículos no seu entorno (SOUZA FILHO, 2019). A Figura 36 apresenta um esquema de seções e características observadas no Canal da Costa.



Figura 36. Diferentes aspectos de seções do Canal da Costa. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base em Souza Filho (2019).

A sub-bacia hidrográfica conformada após essa série de modificações na estruturação e morfologia do corpo hídrico passou a se assentar no território que praticamente coincide com a Regional Administrativa 01 de Vila Velha, abrangendo um total de 20 bairros (FIGURA 37).

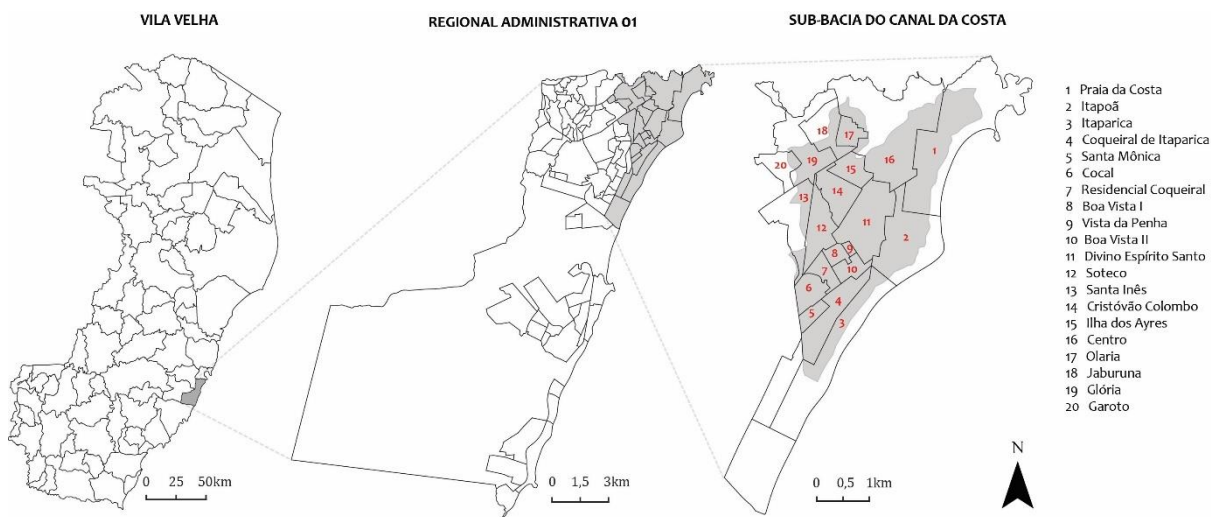


Figura 37. Espacialização da sub-bacia do Canal da Costa. **Fonte:** Adaptado de Sartório (2018).

Dentre os bairros que compõem o circuito de fluxos hidrológicos da sub-bacia do Canal da Costa, aqueles que foram destacados para um estudo mais aprofundado nesta dissertação são os bairros Divino Espírito Santo e Soteco, identificados na Figura 37, respectivamente, pelos números 11 e 12.

A partir do trabalho historiográfico realizado por Celante, Sathler e Da-Silva-Rosa (2015) através do compilado de relatos de memórias de antigos moradores do município de Vila Velha, observa-se que a ocupação da região dos bairros Soteco e Divino Espírito Santo é bastante recente, se comparada à história de ocupação do município – por muito tempo restrita à região do Centro e do atual bairro Garoto. Segundo esses relatos, a localidade do bairro Soteco era uma das poucas dentro da extensão do município de Vila Velha que não alagava, configurando-se, portanto, como uma área preferencial para ocupação. Apesar disso, até meados da década de 1960, apenas cerca de 12 famílias moravam na região. Embora diminuto, o número é proporcionalmente considerável, dado que a população total de Vila Velha não era, também, muito numerosa no período.

O processo de ocupação no bairro Soteco começou a se intensificar a partir de 1950, com a construção do conjunto habitacional do IBES (Instituto do Bem Estar

Social) às margens da Rodovia Carlos Lindemberg. A infraestrutura instalada para a consolidação do conjunto habitacional facilitou o acesso aos povoamentos existentes no entorno, os quais se mantinham em condição de isolamento pela ausência de vias pavimentadas interconectando tais localidades à região central do município. Nesse mesmo período, a região do bairro Divino Espírito Santo ainda era ocupada por uma fazenda, chamada de Fazenda da Toca, que abrigava um extenso alagado perene (CELANTE; SATHLER; DA-SILVA-ROSA, 2015).

Com a expansão dos portos em Vitória e a instalação das indústrias, já citada anteriormente neste tópico, a população residente em Vila Velha sofreu um intenso processo de crescimento, principalmente, após a conclusão da Terceira Ponte, ao final da década de 1980, interconectando as cidades de Vila Velha e Vitória. Nesse ínterim, a ocupação do bairro Soteco se consolidou e as obras de drenagem e aterramento dos espaços alagados junto à costa permitiram o loteamento e a edificação em bairros como o Divino Espírito Santo (CELANTE; SATHLER; DA-SILVA-ROSA, 2015) ao custo da destruição e descaracterização da paisagem hídrica.

Por meio desse apanhado histórico, percebe-se que o bairro Soteco foi ocupado antes do Divino Espírito Santo tanto por ser uma área propícia à instalação de assentamentos, por não estar inserida nas zonas de alagamento do Rio da Costa, quanto por estar mais próximo das infraestruturas de mobilidade disponíveis à época. Somente após o início das intervenções sobre o Rio da Costa, que o bairro Divino Espírito Santo pode começar a abrigar as primeiras edificações. Isso demonstra que o bairro está naturalmente condicionado a um contexto de vulnerabilidade à desastres de ordem hídrica. Os sinais morfológicos desses diferentes momentos de ocupação podem ser percebidos ainda na atualidade (FIGURA 38).

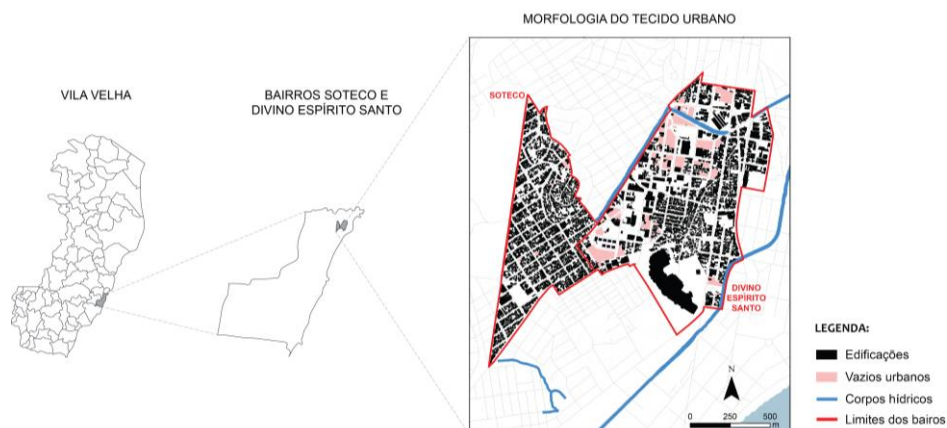


Figura 38. Morfologia dos bairros Soteco e Divino Espírito Santo. **Fonte:** O autor, 2022.

Conforme indicado na Figura 38, o tecido urbano se apresenta de forma bastante consolidada no bairro Soteco, havendo uma baixa concentração de vazios urbanos, além de um ordenamento regular na estruturação do ambiente construído. Em contrapartida, no bairro Divino Espírito Santo, percebe-se o oposto: uma concentração maior de vazios urbanos associada à instalação de grandes infraestruturas edificadas, constituindo um ambiente construído repleto de contrariedades.

7.2 Áreas Vulneráveis a Alagamentos

Para avançar na delimitação das áreas de intervenção, é necessário conhecer as dinâmicas de alagamentos nos bairros destacados. Assim, as manchas de alagamentos registradas pela gestão pública municipal de Vila Velha foram sobrepostas aos limites dos bairros Soteco e Divino Espírito Santo. O resultado desse processo está registrado na Figura 39.

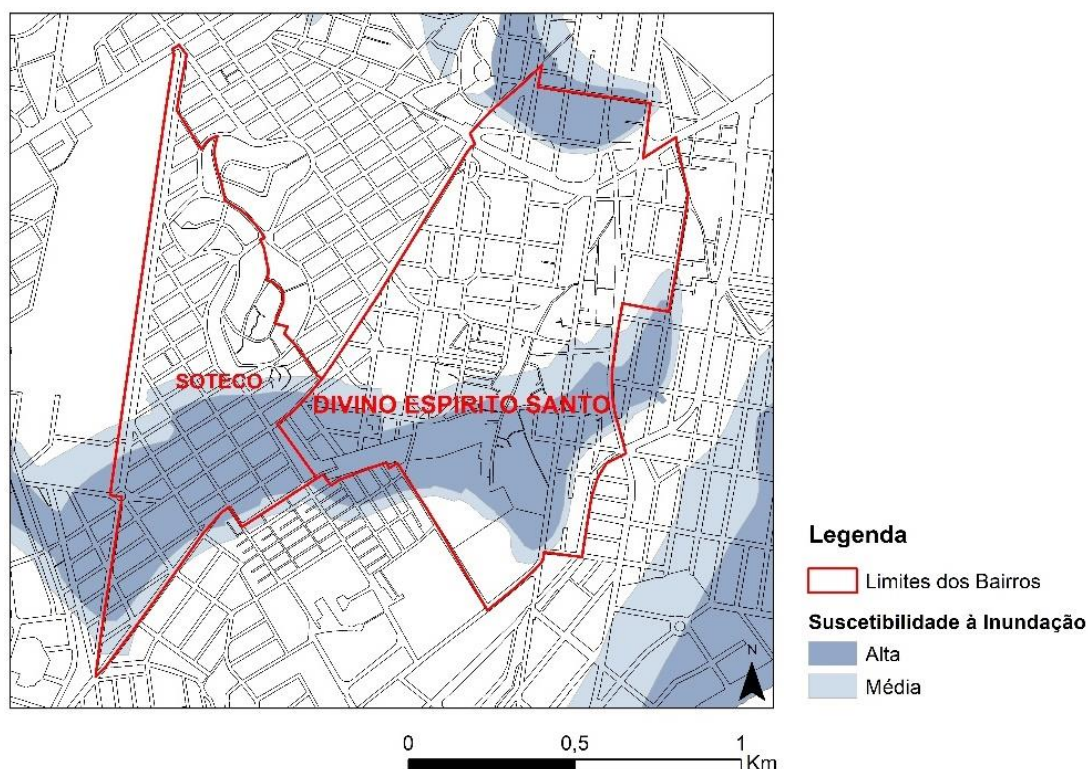


Figura 39. Incidência de alagamentos na região analisada. **Fonte:** Elaborado pelo autor com base em PMVV (2019).

De acordo com a Figura 39, percebe-se que 43,48% da área selecionada para análise sofre com a problemática dos alagamentos. Desse montante, 31,42% da

área dos bairros destacados se situa sobre manchas de alta recorrência de alagamentos e 12,06% em manchas de média ocorrência. Tais classificações foram realizadas a partir de um levantamento empreendido pela Prefeitura Municipal de Vila Velha para atualização do Plano Diretor em 2019. Contudo, esclarece-se que não há uma indicação objetiva dos critérios utilizados para diferenciar a alta e a média ocorrências de alagamentos.

De todo modo, confirma-se que a área em questão é bastante vulnerável a desastres envolvendo a água, muito em decorrência dos processos de desnaturalização do território. Outro ponto que merece destaque é a condição de ocorrência de alagamentos no bairro Soteco, onde, antes, de acordo com o apanhado histórico realizado no tópico anterior, era uma área preferencial para ocupação justamente por estar fora do circuito de inundações do Rio da Costa, confirmando a ação danosa da urbanização sobre o território.

Realizando, então uma sobreposição entre os territórios compreendidos pelos bairros Soteco e Divino Espírito Santo e as microbacias hidrográficas do Canal da Costa, observa-se que os bairros se assentam sobre um total de nove microbacias, sendo identificadas na Figura 40 pelos números 06, 08, 10, 11, 12, 13, 15, 16 e 23.

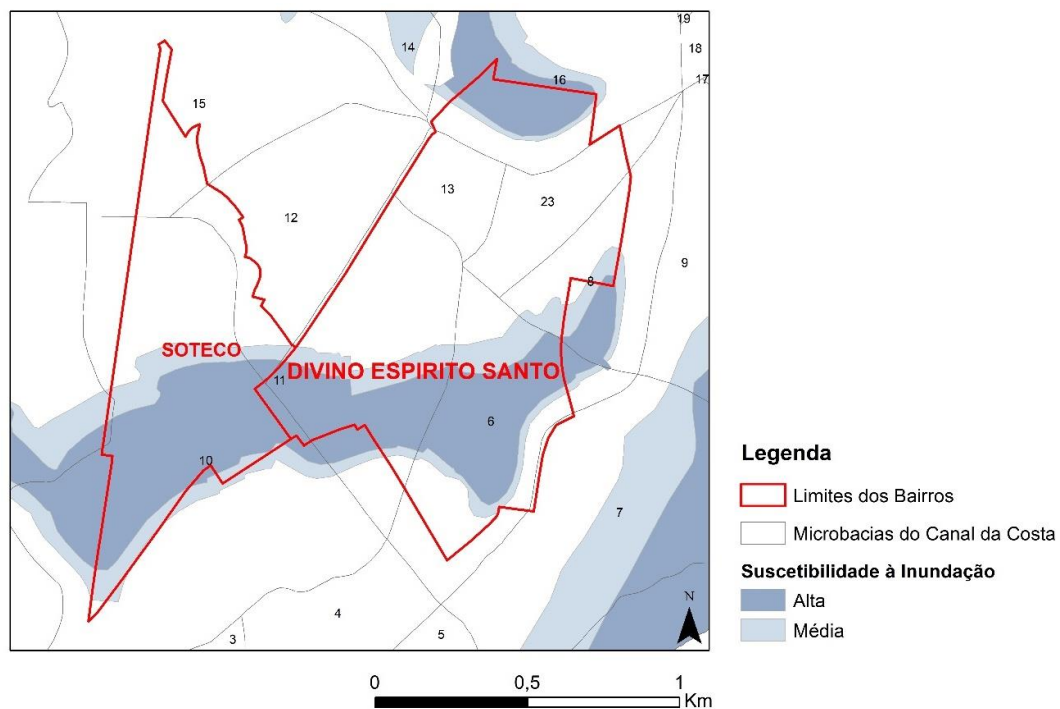


Figura 40. Incidência de alagamentos sobre as microbacias do Canal da Costa. **Fonte:** Elaborado pelo autor com base em PMVV (2019).

A Tabela 21 organiza esse conjunto de microbacias a partir do tempo de concentração indicado por Passamani (2016) para o sistema hidrográfico do Canal da Costa.

Tabela 21. Valores do tempo de concentração para as microbacias destacadas.

Microbacia	Tempo de concentração (min)
15	43,86
16	37,60
10	37,08
6	27,36
23	26,39
12	25,27
11	24,63
8	21,28
13	17,80

Fonte: Adaptado de Passamani (2016).

Vê-se que a microbacia identificada pelo número 15 é a que possui o maior tempo de concentração. Logo, ela é a menos eficiente no conjunto de microbacias sobre as quais os bairros em análise estão assentados. Sendo assim, a microbacia 15 é bastante suscetível à ocorrência de alagamentos dada a dinâmica de escoamento observada. Entretanto, como observado na Figura 40, a porção dessa microbacia que faz parte do limite dos bairros selecionados não compõe o conjunto de áreas alagáveis.

A segunda microbacia com maior tempo de concentração é aquela identificada pelo número 16 e, de acordo com os dados levantados pela Prefeitura Municipal de Vila Velha, é possível indicar que esta é uma microbacia bastante afetada por áreas alagáveis de alta e média recorrência. O mesmo se observa em relação à terceira microbacia com maior tempo de concentração, a de número 10. Porém, em relação a esta existe um agravante: o tecido urbano é consolidado de maneira bastante adensada na região, de modo que os alagamentos tendem a gerarem perdas materiais a um nível muito mais intenso do que em outras localidades dentro da porção analisada. Essa informação pode ser atestada na Figura 38, apresentada no subcapítulo anterior **6.1 Panorama Histórico da Formação do Território**.

O que difere as microbacias 11, 06 e 08 do contexto identificado é a presença de vazios urbanos e de infraestruturas identificadas como enclaves fortificados⁴, o que reduz a densidade de ocupação do tecido urbano. Com isso,

⁴ Enclaves fortificados são elementos construídos que, geralmente, ocupam uma vasta parcela do solo e que possuem natureza introspectiva por priorizar o uso privativo em detrimento do público, ao passo

apesar de também sofrerem com uma alta incidência de alagamentos, de acordo com os padrões delimitados pela PMVV, é possível apontar para uma situação de gravidade menor quanto à condição de perdas materiais causadas por alagamentos em decorrência da baixa densidade de ocupação do solo.

7.3 Definição dos Recortes de Intervenção

Tomando como ponto de partida as análises realizadas no subcapítulo anterior, tem-se que as microbacias identificadas na Figura 41 pelos números 10 e 16 reúnem condições críticas para a problemática dos alagamentos urbanos. Isto posto, os recortes a serem destacados irão contemplar ambas as microbacias mencionadas.

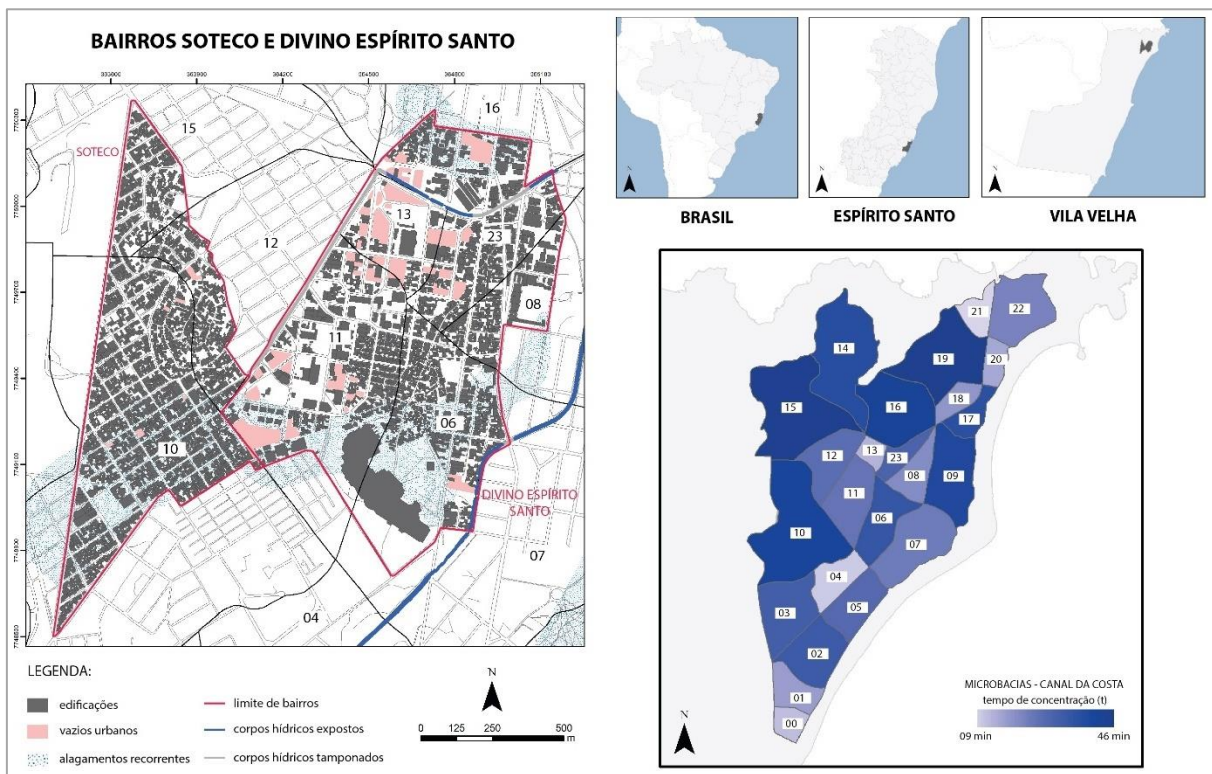


Figura 41. Mapeamento de fatores agravantes para a formação de alagamentos nos bairros Soteco e Divino Espírito Santo, em Vila Velha – ES. **Fonte:** Elaborado pelo autor com base em PMVV (2019) e Passamani (2016).

Como defendido por Bonatto (2015), a bacia hidrográfica deveria ser a unidade primordial para o planejamento urbano, pois ela caracteriza uma marcação territorial natural para o percurso hídrico. Ao combinar a espacialização do tecido

que também contribuem para a desvalorização de seu entorno através da alocação de “arquiteturas defensivas”, como muros, grades, arames e circuitos de segurança.

construído com os processos e fluxos hidrológicos, obtém-se como resultante um espaço urbano mais resiliente a desastres ligados à água, pelo fato de estar em simbiose com as dinâmicas hídricas que se desenvolvem no ambiente natural.

Ao observar a divisão dos bairros, percebe-se que há um descompasso entre a determinação dos locais destes e o posicionamento das microbacias do sistema hidrográfico do Canal da Costa por sobre o território. Esse descompasso reforça a ideia de que o planejamento urbano, como é comum de se observar (BONATTO, 2015), tem ignorado as feições hidrográficas quanto à espacialização urbana. Em decorrência disso, consolidam-se as vulnerabilidades observadas através da ocorrência de alagamentos.

Assim, para obter a delimitação final do recorte de estudo, realizou-se uma interseção dos limites dos bairros Soteco e Divino Espírito Santo com as microbacias hidrográficas 10 e 16. No caso da microbacia 10, pelo fato de ela abranger um contexto morfológico bastante diverso, contendo uma parte espacializada sobre um terreno plano e outra, sobre um pequeno maciço, optou-se por concentrar as intervenções sobre a região plana desta microbacia mais afetada pelas manchas de alagamentos. A delimitação do recorte de intervenção A (em vermelho), localizado na microbacia 10, segue a estratégia esquematizada na Figura 42.

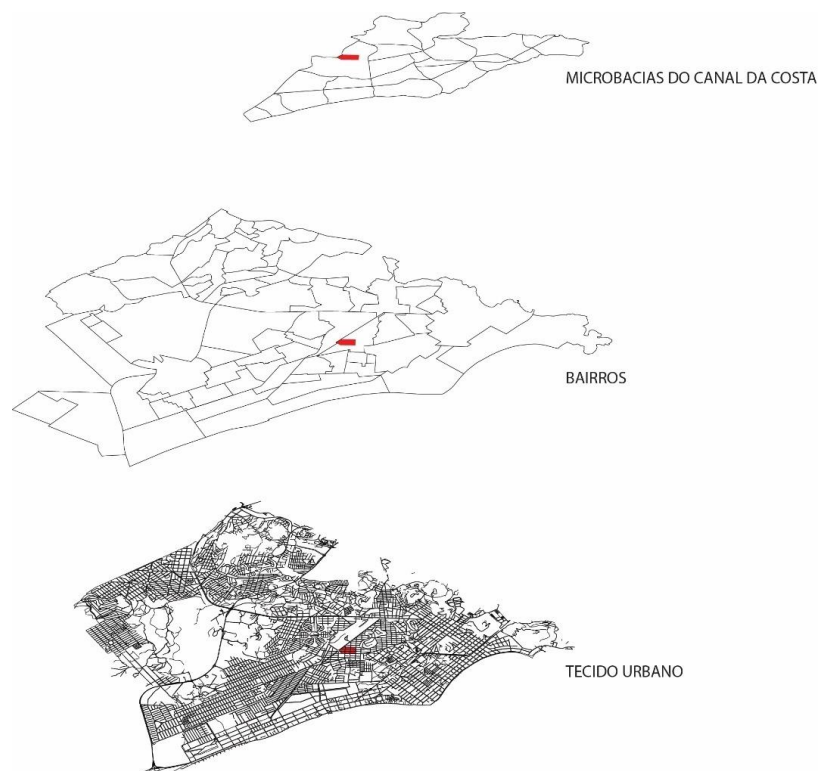


Figura 42. Delimitação do recorte urbano A (em vermelho). **Fonte:** O autor, 2022.

Em termos de caracterização desse recorte, a área destacada é equivalente a 68.681,28 m² (ou 6,87 hectares), apresentando uma ocupação bastante densa por edificações, as quais apropriam-se de grande parte do lote. Isso faz com que a área livre destinada a possíveis intervenções urbanas visando o reequilíbrio das dinâmicas hidrológicas através da biofilia se concentre, majoritariamente, nas vias públicas de circulação de veículos e nas calçadas.

Como informação complementar, o tempo de concentração do fluxo de águas pluviais nessa localidade, segundo os dados apresentados por Passamani (2016) é de 37,08 minutos. Logo, essa é a quantidade de tempo que as águas pluviais levam para escoar dessa região do recorte até o exutório, ou seja, o ponto de saída da microbacia 10. Essa taxa é importante de ser considerada nas análises subsequentes, a serem realizadas no capítulo **8 A APLICAÇÃO**.

Quanto ao recorte de intervenção B (FIGURA 43), alocado na bacia 16, a área reúne um conjunto de feições bastante complexas ao mesmo tempo em que possui um grande potencial de reestruturação. O recorte abrange uma área total de 118.268,55 m² (ou 11,83 hectares), contendo seções tamponadas do canal, vazios urbanos, além de um terminal rodoviário municipal, de modo que se configura como um ponto de importância para as dinâmicas urbanas do local. O recorte é representado em vermelho no esquema.

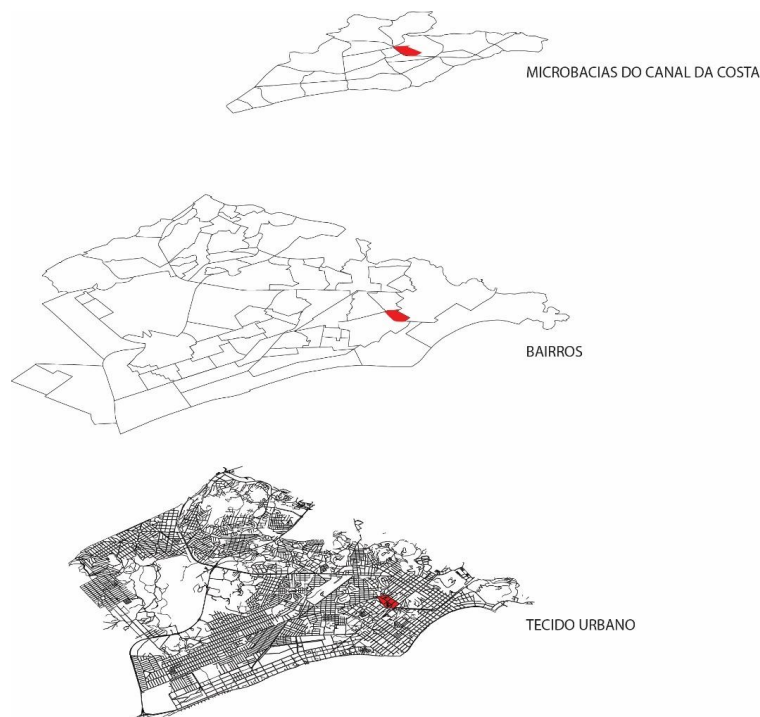


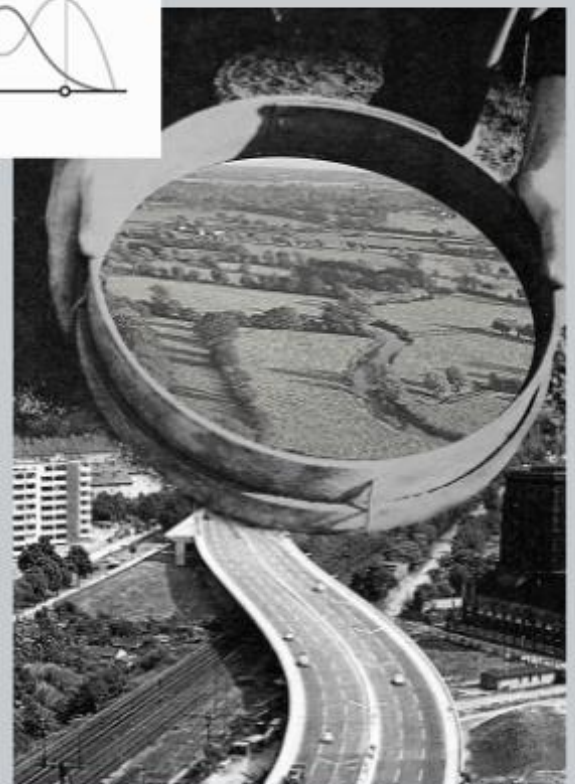
Figura 43. Delimitação do recorte urbano B (em vermelho). **Fonte:** O autor, 2022.

Cabe destacar que o referido recorte apresenta um tempo de concentração de 37,60 minutos (PASSAMANI, 2016), o qual é bastante próximo do tempo de concentração da bacia 10, referente ao recorte urbano anterior, e também já apresenta dinâmicas de alagamentos de alta recorrência, reforçando a relevância de intervenções no local.

Dessa forma, delinear-se dois recortes urbanos com diferentes complexidades e estruturações, o que permite que diferentes estratégias biofílicas sejam exploradas. Ademais, destaca-se que ambos os recortes estão em sintonia com os conceitos apresentados no subcapítulo **4.2 Interseções e Contribuições para a Pesquisa**, no qual autores como Bonatto (2015) e Lima (2017b) resgatam, respectivamente, a importância de considerar a dinâmica hidrológica da microbacia sobre a qual o espaço urbano se assenta durante o processo de análise e proposição de intervenções; bem como a questão do olhar atento à microescala urbana para uma melhor compreensão das problemáticas a nível do indivíduo/pedestre.

Tanto o recorte urbano contido na microbacia 10 quanto aquele contido na microbacia 16 estão compreendidos apenas no contexto de uma única bacia hidrográfica, de modo que as análises das dinâmicas hidrológicas do local se tornam facilitadas e mais precisas. Além disso, o dimensionamento dos dois recortes urbanos permite que seja dada a relevância devida à dimensão do pedestre, o que possibilita a criação de espaços humanizados.

8 A APLICAÇÃO



8 A APLICAÇÃO

Este capítulo encerra a trajetória da presente pesquisa com a aplicação da ferramenta *Parametree* em simulações projetuais envolvendo um recorte urbano destacado para estudo e em um teste de usabilidade com participantes de uma oficina sobre a ferramenta. Assim, para contemplar cada temática de maneira específica, este capítulo se subdivide em duas partes, descritas a seguir.

O subcapítulo **8.1 Simulações** registra a sequência de aplicações da ferramenta algorítmico-paramétrica *Parametree* em um dos recortes urbanos localizados no contexto espacial destacado para este estudo, contido na sub-bacia do Canal do Costa, em Vila Velha – ES. O objetivo dessas simulações é o de verificar a efetividade da ferramenta em calcular a formação do escoamento superficial a partir dos dados coletados no modelo digital do projeto ou do contexto urbano em análise, além de conhecer o impacto de estratégias biofílicas selecionadas para mitigação da problemática dos alagamentos urbanos. Outro ponto a ser averiguado é a pertinência das métricas para qualificação do contexto urbano quanto ao volume escoado superficialmente e sua vinculação com o funcionamento adequado das dinâmicas hidrológicas.

Finalmente, o subcapítulo **8.2 Teste de Usabilidade** apresenta as atividades finais de validação e análise da ferramenta. Desse modo, comenta-se a aplicação da *Parametree* em testes de usabilidade com participantes de uma oficina realizada em versão presencial, aberta a discentes do Bacharelado em Engenharia Civil, e, também, em versão remota, na plataforma Google Meet, realizada com profissionais de Arquitetura e Urbanismo, membros da comunidade externa, e estudantes de Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo de outras instituições de ensino. A intenção com a realização dessas oficinas é verificar a receptividade da ferramenta e sua percepção quanto à pertinência e aplicação à prática de atividades no contexto profissional e estudantil.

8.1 Simulações

As simulações projetuais registradas e comentadas neste subcapítulo tiveram como base arquivos georreferenciados do tipo *shapefile* (.shp), obtidos através do banco de dados público, disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Vila

Velha, além daqueles produzidos através de mapeamento próprio, tendo por referência imagens aéreas.

Esses arquivos georreferenciados passaram por um processo de combinação e customização através da interface do *software* ArcGIS, destacando os recortes urbanos selecionados no capítulo anterior. Na sequência, cada recorte urbano foi exportado pela própria interface do ArcGIS para a versão .dwg, compatível com o *software* AutoCAD, além do Rhinoceros, que será a interface digital utilizada para a produção das análises e simulações.

Uma vez importados os arquivos em .dwg para a interface do Rhinoceros, cada camada de objeto oriunda dos shapefiles reunidos no ArcGIS foram editadas para representar os 11 materiais com os quais a ferramenta Parametree foi programada para utilizar: asfalto, concreto, grama, solo exposto, edificações, paralelepípedo, intertravado, intertravado com grama, concreto poroso, asfalto poroso e telhado verde; além dos quatro grupos arbóreos destacados no subcapítulo **5.2 Modelagem da Interceptação Pluvial**. A respeito da definição desses grupos arbóreos para as árvores já existentes no local, utilizou-se da ferramenta Street View do Google Earth, de modo a ser possível visualizar as suas características vegetais para incluir tais árvores em algum dos quatro grupos predefinidos.

Após esse trabalho de ajuste de informações, o *plug-in* Grasshopper é iniciado e a ferramenta *Parametree* é aberta para, em um primeiro momento, analisar as condições atuais das dinâmicas hidrológicas nos recortes urbanos selecionados. Para essas análises, foram considerados os períodos de retorno de precipitação, ou seja, a estimativa do tempo para que uma chuva de mesma intensidade possa ocorrer de novo, de cinco, 25 e 100 anos. O tempo de cinco anos foi estabelecido como o período de retorno mínimo tendo por subsídio o estudo realizado pelo IEMA (2013), o qual considera que o sistema hidrográfico do Canal da Costa sofre com alagamentos uma vez a cada cinco anos. Nesse sentido, as chuvas com períodos de retorno de cinco anos são as mais propensas a causarem tal problemática, logo foram tomadas como limiar mínimo para as simulações.

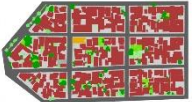
Em um segundo momento, são propostos cenários hipotéticos através da implementação sucessiva de estratégias biofílicas nos recortes urbanos selecionados visando atestar a sua efetividade na mitigação da problemática dos alagamentos. A rodagem de simulações considera, de maneira igual, os mesmos períodos de retorno

supracitados: cinco, 25 e 100 anos; para que paralelos possam ser traçados entre ambos os contextos e que, então, conclusões possam ser apontadas.

8.1.1 Cenário Atual

A Tabela 22 apresenta um panorama das condições atuais dos recortes urbanos selecionados para análise a partir da utilização da ferramenta *Parametree*. Tais condições foram geradas para os contextos de precipitação com períodos de retorno (T) de cinco, 25 e 100 anos, respectivamente, considerando, também, os tempos de concentração (t) específicos de cada microbacia. Os valores das variáveis K, a, b e c para a estimativa da intensidade máxima de precipitação (i_m) suportada por cada microbacia para os períodos de retorno selecionados foram obtidas a partir de um levantamento empreendido por Senna (2009), no qual dados foram reunidos e compilados a partir de medições nas estações pluviográficas do Estado do Espírito Santo. A estação pluviográfica mais próxima dos recortes urbanos selecionados, localizados no município de Vila Velha, está na cidade de Vitória. Logo, os dados utilizados para representar as variáveis supracitadas foram extraídos dessa estação, de modo que K passa a valer, então, $4003,611 \text{ mm} \cdot \text{min}^c \cdot \text{h} \cdot \text{anos}^a$, a equivale a 0,203, b corresponde a 49,997 min e c é igual a 0,931.

Tabela 22. Diagnóstico para as condições atuais dos recortes urbanos A e B.

		Período de Retorno (T)		
		5 anos	25 anos	100 anos
 Recorte Urbano A Microbacia 10 t = 37,08 min	i_m	86,755 mm/h	120,277 mm/h	159,368 mm/h
	Q_{max}	1,342 m³/s	1,861 m³/s	2,465 m³/s
	Classificação	crítico	crítico	crítico
 Recorte Urbano B Microbacia 16 t = 37,60 min	i_m	86,275 mm/h	119,612 mm/h	158,487 mm/h
	Q_{max}	2,069 m³/s	2,869 m³/s	3,802 m³/s
	Classificação	crítico	crítico	crítico

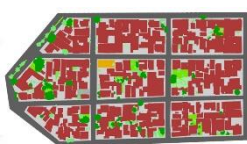
Fonte: O autor, 2022.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 22, é possível perceber que ambos os recortes se constituem como áreas críticas para as dinâmicas hidrológicas em meio urbano, o que confirma a problemática de alagamentos constantes observados nos levantamentos realizados pela PMVV (2019).

Em termos de caracterização da cobertura do solo (TABELA 23), observa-se que o recorte urbano A apresenta uma taxa considerável de impermeabilização, contando com quase metade do território ocupado por edificações. Essa característica se reflete em um alto coeficiente médio de escoamento superficial, equivalente a 0,822, já que, conforme mostrado no subcapítulo **3.1 A Matemática das Dinâmicas Hidrológicas**, quanto mais próximo de 1 é o valor do coeficiente, mais impermeável é o material. Ao agregar as áreas de gramado e solo exposto, tem-se que apenas 4,72% da área é livre de antropização, o que justifica o estado crítico para os processos e fluxos hidrológicos no local.

Tabela 23. Caracterização da cobertura do solo do recorte A.

Recorte A	Cobertura do Solo	Coefficiente de Escoamento (C)	Área	Proporção
	Asfalto	0,83	17.422,11 m ²	25,37%
	Gramma	0,15	2.679,98 m ²	3,90%
	Construções	0,85	32.475,67 m ²	47,28%
	Concreto	0,88	15.209,68 m ²	22,15%
	Solo Exposto	0,60	562,32 m ²	0,82%
	Intertravado	0,78	331,52 m ²	0,48%
	Grupo Arbóreo 01	-	-	-
	Grupo Arbóreo 02	-	475,28 m ²	0,69%
	Grupo Arbóreo 03	-	1.450,71 m ²	2,11%
	Grupo Arbóreo 04	-	2.774,44 m ²	4,04%
	Total*	0,822	68.681,28 m²	100%



Fonte: O autor, 2022. **Legenda:** (*) Desconsiderando a área arborizada.

Quanto à arborização, apenas 6,84% da área total do recorte é coberto por árvores. Em um cenário de precipitação de alta intensidade, que é o mais propício para a ocorrência de alagamentos, o quantitativo contribui com a redução de 0,96% do escoamento superficial na área analisada (TABELA 24). Apesar de ser uma

contribuição diminuta, a taxa demonstra a interferência da arborização nas dinâmicas hidrológicas, de modo que a sua exclusão dos cálculos de estimativa de formação do escoamento superficial incorre na imprecisão dos resultados obtidos. Além disso, a porcentagem de cobertura arbórea na área é bastante inferior àquela indicada por Beatley (2011) para cidades biofílicas, que é de 40%, o que, segundo o autor, traria benefícios para o espaço urbano, inclusive para nesse as dinâmicas hidrológicas.

Tabela 24. Contribuição da arborização atual para a redução do escoamento superficial no recorte A.

	Q_{max} (sem arborização)	Q_{max} (com arborização)	Redução
T = 5 anos	1,347 m ³ /s	1,342 m ³ /s	0,96%
T = 25 anos	1,871 m ³ /s	1,861 m ³ /s	0,96%
T = 100 anos	2,475 m ³ /s	2,465 m ³ /s	0,96%

Fonte: O autor, 2022.

O recorte urbano B também se configura como um espaço bastante impermeabilizado, apesar da presença de vazios que ocupam cerca de 11,36% de sua área total. De acordo com a Tabela 25, o coeficiente de escoamento médio desse recorte é de 0,735, ou seja, caracterizado como bastante impermeável. Essa taxa alta de impermeabilização se justifica pela cobertura do solo no local, contando com uma alta distribuição de materiais impermeáveis, como asfalto, construções e concreto.

Tabela 25. Caracterização da cobertura do solo do recorte B.

Recorte B	Cobertura do Solo	Coeficiente de Escoamento (C)	Área	Proporção
	Asfalto	0,83	28.237,33 m ²	23,88%
	Gramma	0,15	16.499,87 m ²	13,95%
	Construções	0,85	35.477,71 m ²	29,99%
	Concreto	0,88	24.616,62 m ²	20,81%
	Solo Exposto	0,60	6.755,02 m ²	5,71%
	Intertravado	0,78	6.682,00 m ²	5,66%
	Grupo Arbóreo 01	-	-	-
	Grupo Arbóreo 02	-	288,86 m ²	0,24%
	Grupo Arbóreo 03	-	4.167,49 m ²	3,52%
	Grupo Arbóreo 04	-	2.624,98 m ²	2,22%
	Total*	0,735	118.268,55 m²	100%



Fonte: O autor, 2022. **Legenda: (*)** Desconsiderando a área arborizada.

Conforme o observado na Tabela 25, a arborização instalada nesse recorte cobre apenas 5,98% da área total e, em um contexto de precipitação de alta intensidade, como utilizado nas simulações, esta arborização contribui com uma redução de 0,71% do escoamento superficial (TABELA 26). Isso reforça o entendimento apontado anteriormente de que a arborização, de fato, contribui para a redução do escoamento superficial. Contudo, a cobertura arbórea do recorte também é bastante inferior aos 40% indicados por Beatley (2011) para o reequilíbrio ambiental do espaço construído.

Tabela 26. Contribuição da arborização atual para a redução do escoamento superficial no recorte B.

	Q_{\max} (sem arborização)	Q_{\max} (com arborização)	Redução
T = 5 anos	2,075 m ³ /s	2,069 m ³ /s	0,71%
T = 25 anos	2,877 m ³ /s	2,869 m ³ /s	0,71%
T = 100 anos	3,813 m ³ /s	3,802 m ³ /s	0,71%

Fonte: O autor, 2022.

Comparando ambos os recortes urbanos, observa-se que o recorte A apresenta um coeficiente de escoamento médio superior ao encontrado para o recorte B. Essa característica demonstra que o nível de antropização se encontra em um estágio avançado no local, interferindo drasticamente sobre as dinâmicas hidrológicas. Por outro lado, é importante esclarecer que, mesmo com um coeficiente de escoamento maior, o volume de escoamento superficial obtido para o recorte A é menor que o estimado para o recorte B, pelo fato de a área de A ser menor que B. Segundo demonstrado no tópico **3.1 A Matemáticas das Dinâmicas Hidrológicas**, a área drenada é uma variável que interfere diretamente no resultado do volume escoado. Logo, quanto menor a área drenada, menor o volume de escoamento superficial obtido.

Outra diferença a ser destacada é a variação nas taxas de redução do escoamento superficial. No recorte A, a arborização contribuiu com uma redução de 0,96%, enquanto que, no recorte B, a redução foi de 0,71%. Essa diferença é decorrente da composição da cobertura arbórea existente. Por exemplo, no recorte A existe uma porcentagem maior de espécies do grupo 4, cujas quais apresentam uma taxa de retenção pluvial superior àquela encontrada nas espécies do grupo 3, que são mais abundantes no recorte B. Com isso, compreende-se que os recortes A e B possuem particularidades decorrentes de formas diversas de consolidação do tecido urbano por sobre o ambiente. Dessa forma, abrem-se possibilidades distintas para a

proposição de intervenções biofílicas para mitigação do estado de criticidade desses locais do ponto de vista hidrológico.

Nessa perspectiva, o contexto urbano apresentado no recorte A é muito mais complexo para a implementação de estratégias biofílicas, dado o espaço reduzido para intervenções e a alta densidade de ocupação, exigindo um grau maior de reflexão e planejamento. Assim, o recorte urbano A foi selecionado como base para a testagens dos cenários hipotéticos de intervenção, enquanto o recorte urbano B foi direcionado à utilização do teste de usabilidade com estudantes e profissionais.

8.1.2 Cenários Hipotéticos

O presente tópico é dedicado à experimentação das estratégias biofílicas estudadas no capítulo **3 A CIDADE BIOFÍLICA** como alternativa para a mitigação dos alagamentos urbanos em conjunto com a aplicação da ferramenta algorítmico-paramétrica *Parametree* para avaliação da efetividade dessas mesmas estratégias. Conforme indicado no tópico *8.1.1 Cenário Atual*, o recorte A se encontra em um estágio avançado de antropização, que se expressa sob a forma de uma alta taxa de impermeabilização do solo. Essa caracterização do espaço é decorrente tanto da infraestrutura viária instalada quanto da alta densidade de ocupação por edificações.

Diante desse cenário, as estratégias biofílicas a serem implementadas devem se adequar ao espaço disponível para intervenções no local, majoritariamente concentrado no espaço público para circulação de veículos e pedestres. Sendo assim, a partir das informações expostas na Tabela 03, apresentada no subcapítulo **3.3 As Estratégias Biofílicas**, aquelas que atendem às especificidades do recorte destacado foram compiladas na Tabela 27 para orientar o processo de adequação desse espaço.

Tabela 27. Panorama das estratégias de biofilia urbana aplicáveis ao recorte A.

Espaços Disponíveis	Estratégia
Edificação	Telhado verde Átrios ajardinados
Quadra	Arborização de calçadas <i>Pocket parks</i> Pavimentação permeável
Rua	Corredores verdes Arborização urbana em canteiro central Pavimentação permeável

Fonte: Adaptado de Beatley (2016), Kellert (2018) e Moraes *et al.* (2020).

Conforme demonstrado na Tabela 27, as escalas disponíveis para intervenção no recorte geográfico A abrangem as dimensões da edificação, da quadra e da rua. Para facilitar a visualização dos resultados oriundos da implementação de cada uma dessas camadas de estratégias, as testagens se sucederão de maneira individualizada e, em um segundo momento, cumulativa, combinando todos os cenários testados neste presente tópico.

Assim, a contribuição para a redução do escoamento superficial por meio da implementação de cada uma dessas camadas de estratégias são mensuradas com o intuito de subsidiar discussões empreendidas na sequência a respeito de índices aplicáveis a instrumentos regulatórios para ocupação do espaço urbano.

Tomando como ponto de partida a escala do edifício e da quadra, em sua porção mais interna, tem-se como estratégias plausíveis a criação de átrios ajardinados ou de quintais permeáveis, a alocação de *pocket parks* e a implementação de telhados verdes. Nesse sentido, as experimentações com recorte urbano A executadas nesta etapa tiveram como objetivo a ampliação das áreas permeáveis vegetadas nos espaços livres entre as edificações e a inserção de mais arborização nessas mesmas espaços intra-lote.

O resultado visual dessa intervenção é apresentado na Figura 44 e sua estruturação é exposta na Tabela 28 com o quantitativo de áreas de cada material e grupo arbóreo.



Figura 44. Resultado da primeira intervenção sobre o recorte urbano A. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 28. Caracterização do recorte A após a primeira proposta de intervenção.

Estado original			Pós-intervenção		
Feição	Área	Proporção	Feição	Área	Proporção
Asfalto	17.422,11 m ²	25,37%	Asfalto	17.422,11 m ²	25,37%
Gramma	2.679,98 m ²	3,90%	Gramma	6.717,06 m ²	9,78%
Construções	32.475,67 m ²	47,28%	Construções	32.475,67 m ²	47,28%
Concreto	15.209,68 m ²	22,15%	Concreto	10.761,08 m ²	15,67%
Solo Exposto	562,32 m ²	0,82%	Solo Exposto	-	-
Intertravado	331,52 m ²	0,48%	Intertravado	1.305,36 m ²	1,90%
Grupo Arbóreo 01	-	-	Grupo Arbóreo 01	939,23 m ²	1,37%
Grupo Arbóreo 02	475,28 m ²	0,69%	Grupo Arbóreo 02	1.382,85 m ²	2,01%
Grupo Arbóreo 03	1.450,71 m ²	2,11%	Grupo Arbóreo 03	2.159,08 m ²	3,14%
Grupo Arbóreo 04	2.774,44 m ²	4,04%	Grupo Arbóreo 04	6.022,94 m ²	8,77%
Total*	68.681,28 m²	100%	Total*	68.681,28 m²	100%

Fonte: O autor, 2022. **Legenda:** (*) Desconsiderando a área arborizada.

Conforme mostrado na Tabela 28, utilizando apenas o espaço disponível entre as edificações para a distribuição de áreas permeáveis vegetadas e pavimentadas com bloco de concreto intertravado, foi possível ampliar a área de grama em 150%, a de intertravado em cerca de 290% e a de arborização em cerca de 120%. Lançando o olhar para a dimensão da quadra, atualmente o recorte conta com uma média de 6,97% de áreas permeáveis, somando áreas de gramado e áreas com pavimentação permeável. Após a intervenção, esse percentual sofreu um acréscimo para 15,65%, suprindo a cota mínima de 15% indicada pela legislação municipal de Vila Velha.

Sob a ótica das dinâmicas hidrológicas, apesar de a intervenção ter promovido uma redução média de 6,48% no fluxo de escoamento superficial, a condição hidrológica desse recorte ainda é crítica (TABELA 29). Tal constatação é bastante reveladora para a compreensão da efetividade do dispositivo da taxa de permeabilidade no código de obras municipal. Do ponto de vista hidrológico, mantendo-se a taxa de ocupação, a estruturação viária e o padrão de utilização de materiais como estão atualmente, o percentual de 15% para distribuição de áreas

permeáveis é insuficiente para reequilíbrio dos processos e fluxos hidrológicos. Ademais, a disponibilidade de áreas livres no espaço intra-lote para a distribuição de arborização com a atual taxa de ocupação dos loteamentos não permite que a taxa ideal de 40% de área arborizada apontada por Beatley (2011) para cidades biofílicas seja alcançada. O percentual atingido nessa intervenção foi de 15,29%.

Tabela 29. Contribuição da primeira proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial.

	Q_{\max} atual	Condição	Q_{\max} pós-intervenção	Condição
T = 5 anos	1,342 m ³ /s	Crítico	1,255 m ³ /s	Crítico
T = 25 anos	1,861 m ³ /s	Crítico	1,741 m ³ /s	Crítico
T = 100 anos	2,465 m ³ /s	Crítico	2,306 m ³ /s	Crítico

Fonte: O autor, 2022.

A segunda proposta de intervenção para esse recorte urbano contempla a implantação de telhados verdes sobre as edificações, mantendo o restante do contexto fidedigno ao existente na atualidade. Para trazer um teor realista à simulação, foi estabelecido que o percentual do número de edificações que realizariam tal tipo de benfeitoria é de 30%. Esse percentual visa suprir questões como disponibilidade de recursos financeiros para a execução dessa intervenção e a adequação da estrutura disponível para a sua implantação. O resultado dessa proposta está ilustrado na Figura 45 e os seus efeitos para os processos e fluxos hidrológicos são indicados na Tabela 30.

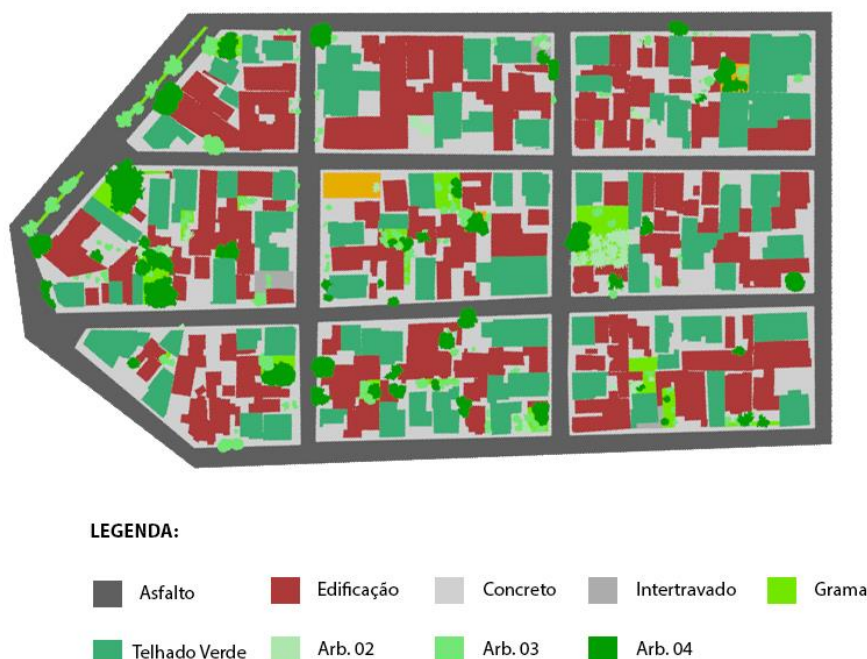


Figura 45. Resultado da segunda intervenção sobre o recorte urbano A. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 30. Contribuição da segunda proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial.

	Q_{\max} atual	Condição	Q_{\max} pós-intervenção	Condição
T = 5 anos	1,342 m ³ /s	Crítico	1,161 m ³ /s	Ruim
T = 25 anos	1,861 m ³ /s	Crítico	1,609 m ³ /s	Ruim
T = 100 anos	2,465 m ³ /s	Crítico	2,133 m ³ /s	Ruim

Fonte: O autor, 2022.

Como demonstrado na Tabela 30, a instalação de telhado verde sobre 30% das edificações existentes no recorte urbano A promove um efeito mais assertivo sobre as dinâmicas hidrológicas, se comparado com a intervenção realizada anteriormente. A referida cota de telhados verdes foi suficiente para alterar a condição do recorte urbano do ponto de vista hidrológico de crítico para ruim em todos os três períodos de retorno de precipitação analisados. Além disso, observou-se uma queda média de 13,49% no fluxo de escoamento superficial.

Isto posto, percebe-se que a estratégia do telhado verde é uma boa estratégia para mitigar a problemática dos alagamentos urbanos, uma vez que se concentra sobre as edificações, não exigindo grandes intervenções sobre o entorno. Contudo, por si só, a estratégia não se demonstra capaz de reverter os efeitos da antropização por sobre as dinâmicas hidrológicas, sendo necessário combiná-la com outras propostas com fins de obter um resultado expressivo do ponto de vista do reequilíbrio hídrico.

Por outro lado, constata-se a partir dessa simulação que, à semelhança do que vem sendo implementado na cidade de Paris com seu plano de ação climática (MARTINS; ROSA, 2021), é profícuo o investimento por parte da gestão pública municipal em estimular a implementação de telhados verdes. O estímulo poderia ser associado a outros benefícios revertidos aos cidadãos que se adequassem à proposta, como, por exemplo, com descontos em impostos e taxas urbanas, fomentando um maior engajamento, uma vez que a cidade também seria beneficiada como um todo do ponto de vista ambiental e hidrológico.

A terceira proposta de intervenção foi direcionada à infraestrutura viária do recorte urbano analisado. Nessa simulação, o material de pavimentação das vias foi modificado de concreto para bloco de concreto intertravado, mantendo todo o entorno edificado e arborizado inalterado, com o objetivo de averiguar a influência dessa estratégia para os processos hidrológicos. O resultado dessa intervenção está

ilustrado na Figura 46 e os seus efeitos para os processos e fluxos hidrológicos são indicados na Tabela 31.

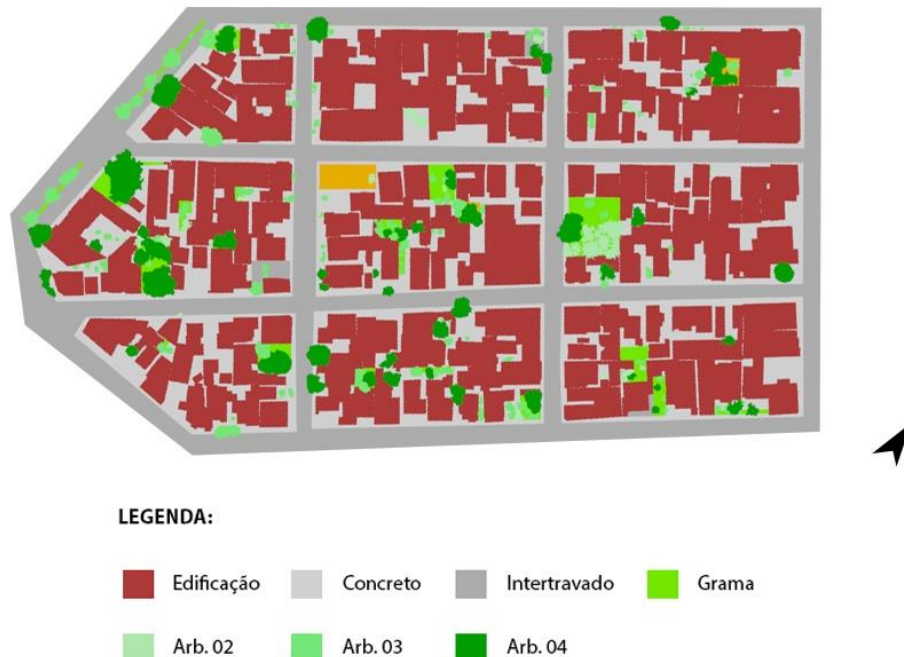


Figura 46. Resultado da terceira intervenção sobre o recorte urbano A. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 31. Contribuição da terceira proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial.

	Q_{\max} atual	Condição	Q_{\max} pós-intervenção	Condição
T = 5 anos	1,342 m ³ /s	Crítico	1,322 m ³ /s	Crítico
T = 25 anos	1,861 m ³ /s	Crítico	1,832 m ³ /s	Crítico
T = 100 anos	2,465 m ³ /s	Crítico	2,428 m ³ /s	Crítico

Fonte: O autor, 2022.

Segundo exposto na Tabela 31, a substituição da pavimentação viária de asfalto para bloco de concreto intertravado não trouxe benefícios consideráveis para a redução do escoamento superficial. A redução média observada foi de 1,51%, mantendo todos os três cenários de período de retorno na condição crítica. Comparando com as demais proposições simuladas, a presente proposta é a que agrega menos contribuições para o reequilíbrio das dinâmicas hidrológicas.

A quarta intervenção simulada ainda contempla a infraestrutura viária do recorte urbano A, porém, nesse momento, propondo a substituição do asfalto convencional pelo asfalto poroso. Assim como nas simulações anteriores, todo o entorno será mantido com o intuito de evidenciar o impacto da intervenção sobre as dinâmicas hidrológicas. A Figura 47 apresenta o resultado da intervenção e os desdobramentos para os processos e fluxos hidrológicos são indicados na Tabela 32.



Figura 47. Resultado da quarta intervenção sobre o recorte urbano A. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 32. Contribuição da quarta proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial.

	Q_{\max} atual	Condição	Q_{\max} pós-intervenção	Condição
T = 5 anos	1,342 m ³ /s	Crítico	1,021 m ³ /s	Ruim
T = 25 anos	1,861 m ³ /s	Crítico	1,415 m ³ /s	Ruim
T = 100 anos	2,465 m ³ /s	Crítico	1,875 m ³ /s	Ruim

Fonte: O autor, 2022.

Conforme exposto na Tabela 32, a utilização do asfalto poroso para pavimentação das vias trouxe um resultado significativamente melhor para a redução do escoamento superficial, se comparado com a pavimentação com o bloco de concreto intertravado. A intervenção possibilitou uma redução de 23,94% no escoamento superficial, elevando a condição do recorte urbano A de crítico para ruim em todos os três períodos de retorno de precipitação analisados.

Colocando em perspectiva todas as intervenções simuladas, a presente proposta foi a que mais contribuiu para a redução do escoamento superficial. Por trás dessa constatação, levanta-se uma questão bastante importante para os processos comentados nesta dissertação, já apontada no tópico **2.2 Uma Arena de Rupturas**: a influência da mobilidade urbana nos processos e fluxos hidrológicos. Repensar os modais de transporte e os deslocamentos na cidade é tarefa crucial não apenas para a humanização e a democratização dos espaços urbanos, mas, também, para as

dinâmicas hidrológicas dado o impacto que essas infraestruturas têm para a impermeabilização do solo.

Após essas simulações, percebe-se que, isoladamente, nenhuma delas consegue solucionar a problemática dos alagamentos urbanos através do reequilíbrio das dinâmicas hidrológicas. Desse modo, a quinta simulação foi orientada a reunir todas as intervenções propostas que tiveram uma resposta bem-sucedida: a voltada ao aumento das áreas livres permeáveis nas quadras juntamente com a arborização, a que visou a implantação de telhados verdes e a que substituiu o asfalto convencional por asfalto poroso. O resultado dessa proposição está ilustrado na Figura 48 e os seus efeitos para os processos e fluxos hidrológicos são indicados na Tabela 33.



Figura 48. Resultado da quinta intervenção sobre o recorte urbano A. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 33. Contribuição da quinta proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial.

	Q_{\max} atual	Condição	Q_{\max} pós-intervenção	Condição
T = 5 anos	1,342 m ³ /s	Crítico	0,759 m ³ /s	Regular
T = 25 anos	1,861 m ³ /s	Crítico	1,052 m ³ /s	Regular
T = 100 anos	2,465 m ³ /s	Crítico	1,394 m ³ /s	Regular

Fonte: O autor, 2022.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 33, é possível perceber que, quando as estratégias biofílicas testadas anteriormente são reunidas, os seus efeitos para a mitigação da problemática dos alagamentos urbanos são

potencializados. A vazão de escoamento superficial foi reduzida em uma média de 43,45%, elevando a condição do recorte urbano de crítico para regular para os três períodos de retorno selecionados.

De um modo geral, essa combinação de estratégias trouxe um resultado bastante satisfatório do ponto de vista das dinâmicas hidrológicas através de uma redução considerável do risco de alagamentos. Entretanto, a meta pretendida com essas simulações é de alcançar o melhor resultado possível quanto ao reequilíbrio dos processos hídricos observados no recorte urbano em análise.

Nesse sentido, optou-se por empreender mais uma simulação sobre a configuração urbana obtida com a última intervenção realizada. Dessa vez, orientada ao aumento da distribuição da cobertura arbórea através da implantação de árvores nas calçadas e canteiros centrais, de modo a aproximar a taxa de arborização do quantitativo de 40% apontado por Beatley (2011). O resultado desse processo é apresentado na Figura 49 e seus desdobramentos para as dinâmicas hidrológicas são apontados na Tabela 34.

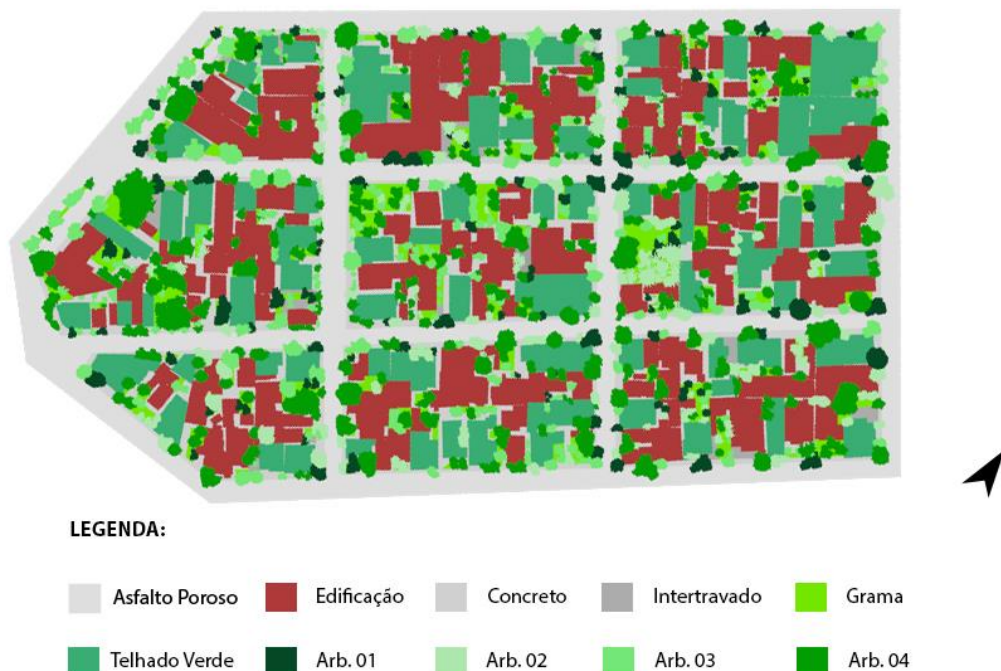


Figura 49. Resultado da sexta intervenção sobre o recorte urbano A. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 34. Contribuição da sexta proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial.

	Q_{\max} atual	Condição	Q_{\max} pós-intervenção	Condição
T = 5 anos	1,342 m ³ /s	Crítico	0,747 m ³ /s	Regular
T = 25 anos	1,861 m ³ /s	Crítico	1,036 m ³ /s	Regular
T = 100 anos	2,465 m ³ /s	Crítico	1,373 m ³ /s	Regular

Fonte: O autor, 2022.

De acordo com os dados apresentados, a ampliação da distribuição das áreas arborizadas ainda não foi suficiente para reduzir o escoamento superficial a um nível que alterasse a classificação do recorte urbano para a condição boa ou ótima. Utilizando-se os espaços disponíveis na dimensão intra-lote, nas calçadas e no canteiro central, o percentual máximo de arborização obtido foi de 25,60%. Ainda inferior à sugestão de Beatley (2011).

Assim, questiona-se a influência da taxa de ocupação dos lotes enquanto fator limitante para a distribuição de arborização, uma vez que quanto maior a área no terreno ocupada por edificações, menos espaço há disponível para a inserção de árvores. De todo modo, a arborização urbana desponta como uma interessante estratégia complementar para a redução do escoamento superficial, tendo contribuído nesta intervenção, quando comparada à anterior, com uma redução média de 1,50% no fluxo do escoamento superficial.

Prosseguindo com as testagens, para se atingir o patamar de uma condição boa para as dinâmicas hidrológicas é necessário que, pelo menos, 60% das edificações existentes possuam telhado verde implantado (FIGURA 50; TABELA 35).

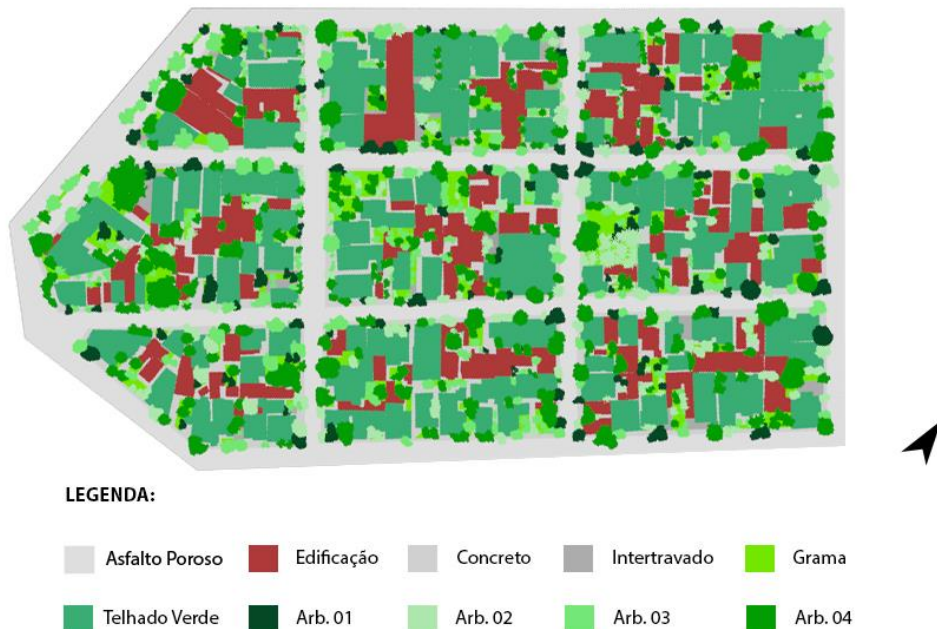


Figura 50. Resultado da sétima intervenção sobre o recorte urbano A. **Fonte:** O autor, 2022.

Tabela 35. Contribuição da sétima proposta de intervenção para a redução do escoamento superficial.

	Q_{\max} atual	Condição	Q_{\max} pós-intervenção	Condição
T = 5 anos	1,342 m ³ /s	Crítico	0,641 m ³ /s	Bom
T = 25 anos	1,861 m ³ /s	Crítico	0,888 m ³ /s	Bom
T = 100 anos	2,465 m ³ /s	Crítico	1,777 m ³ /s	Bom

Fonte: O autor, 2022.

Outro ponto relevante é que, mesmo que todas as edificações tivessem telhado verde, a condição desse recorte urbano permaneceria na condição boa, ou seja, mesmo em um cenário consideravelmente utópico, o grau máximo de reequilíbrio desse recorte é a condição hidrológica boa, indicando um teto para a regressão dos efeitos da antropização no local dentro dos liames e restrições da realidade.

Através dessas simulações projetuais, compreendeu-se que as estratégias biofílicas estudadas e comentadas ao longo desta dissertação são, de fato, efetivas para a mitigação dos efeitos da antropização para as dinâmicas hidrológicas. Ademais, a arborização urbana demonstrou ser uma importante estratégia complementar para o aprimoramento dos resultados obtidos com a implementação das demais intervenções urbanas. Em acréscimo a esses pontos mencionados, a ferramenta *Parametree* demonstrou ser bastante útil para as análises das referidas simulações projetuais, otimizando o tempo entre a concepção das propostas e o exame de seus desdobramentos sobre o meio.

8.2 Teste de Usabilidade

Este subcapítulo se debruça sobre o registro da oficina intitulada “Abordagem Algorítmico-Paramétrica Aplicada à Gestão de Águas Urbanas”, realizada com profissionais e discentes da área da Arquitetura e Urbanismo, além de discentes da área da Engenharia Civil, em versões presencial e remota. A versão presencial ocorreu nas dependências da própria instituição de ensino, nos dias 17 e 18 de novembro de 2021, e contou com a presença de discentes do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, enquanto que a versão remota foi realizada no dia 19 de novembro de 2021, na plataforma *Google Meet*, com membros da comunidade externa, composta por profissionais e discentes da área de Arquitetura e Urbanismo.

A versão presencial da oficina necessitou de dois dias para a sua realização, ao longo de três horas em cada dia, por abranger um grupo que não possuía conhecimento prévio sobre a temática das tecnologias algorítmico-paramétricas e nem da utilização do Rhinoceros e do Grasshopper. Logo, foi preciso apresentá-lo a conceitos importantes acerca das metodologias paramétricas de projeto e de análise de contexto, além de ambientá-lo à interface dos programas, demonstrando as funcionalidades e exemplos básicos de programação visual e de *scripting* na linguagem C#. Ademais, houve, também, uma exposição acerca da

ferramenta algorítmico-paramétrica proposta nesta dissertação, de suas funcionalidades e das aplicações. Só após essa etapa, realizada no primeiro dia da oficina, que os participantes estariam, então, seguros para utilizar a ferramenta *Parametree* e executar as atividades propostas. A etapa prática se deu no segundo dia da oficina presencial.

A versão remota, por sua vez, necessitou de algumas restrições quanto ao público. Seria fundamental que os participantes já tivessem acesso ao Rhinoceros e ao Grasshopper em seus computadores e algum conhecimento da interface desses programas, uma vez que a oferta de suporte à instalação e à ambientação à interface digital é dificultada em eventos remotos, justamente pela ausência da possibilidade de uma percepção mais próxima da experiência dos participantes. Assim, pelo fato do grupo já possuir o mínimo de experiência necessária para a utilização da ferramenta, as exposições conceituais giraram em torno das funcionalidades e aplicabilidades da *Parametree*, para que os participantes compreendessem o seu contexto de utilização nas atividades propostas. Por esse motivo, foi possível que a oficina se desenvolvesse em apenas um dia, ao longo de quatro horas.

O número total de participantes alcançado pela oficina foi seis pessoas, sendo dois discentes de Engenharia Civil, dois Arquitetos e Urbanistas e dois discentes de Arquitetura e Urbanismo. O número reduzido de participantes se deve, em primeiro lugar, ao período do ano em que a oficina foi proposta, em que os estudantes, de um modo geral, encontram-se envolvidos com a realização de avaliações, com a entrega de projetos e de trabalhos de conclusão de curso. Entretanto, devido ao andamento do cronograma desta dissertação, a oficina não pôde ser antecipada, por depender do cumprimento de importantes etapas pregressas; ou, ainda, postergada, para não comprometer o prazo final de entrega dos produtos.

Em segundo lugar, o que contribuiu para o baixo número de participantes na etapa remota foi a limitação quanto à experiência prévia na utilização dos programas e sua instalação, em associação, também, à questão dos prazos acadêmicos. Contudo, apesar de ser uma amostragem pequena, o universo do total de participantes foi consideravelmente diversificado e equilibrado, o que permitiu refletir sobre a percepção de cada grupo quanto à utilização da ferramenta *Parametree* nos diferentes contextos de ensino e trabalho contemplados.

Além disso, para Virzi (1992), em testes de usabilidade, 80% das lacunas e falhas em interfaces e sistemas digitais são encontradas pelos primeiros quatro ou cinco usuários. A partir dessa cota, novas informações relevantes para a atualização do produto são cada vez menos prováveis de serem identificadas. O autor ainda considera que os problemas mais graves são encontrados nos primeiros testes. Dessa forma, como o total de participantes da oficina foi de seis pessoas, a cota obtida atende às determinações de Virzi (1992), de modo que, caso haja lacunas importantes a serem expostas, tais usuários serão capazes de identificá-las.

A avaliação da experiência dos participantes seguiu o modelo adotado por Lima (2017a) na testagem da ferramenta *CityMetrics*. O questionário continha um conjunto de cinco questões abordando diferentes pontos da experiência dos participantes, às quais estes deveriam responder com classificações em uma escala de sete pontos. A nota um seria correspondente ao extremo negativo da experiência, enquanto a nota sete seria correspondente ao extremo positivo. A partir disso, as questões confeccionadas contemplavam: (a) a facilidade na utilização da ferramenta *Parametree*, (b) a sua utilidade, (c) a sua performance, (d) a adequação da ferramenta aos objetivos traçados para sua aplicabilidade, e, por fim, (e) a possibilidade dos participantes utilizarem novamente a ferramenta e a metodologia proposta. A Figura 51 ilustra uma das questões e a aplicação da escala de sete pontos para classificação da experiência.

Quão difícil ou fácil foi utilizar a ferramenta Parametree? *

1 2 3 4 5 6 7

Extremamente difícil Extremamente fácil

Figura 51. Exemplo de pergunta contida no questionário de avaliação da experiência do usuário. **Fonte:** O autor, 2022.

Como subsídio para a resolução do questionário, foi proposta aos participantes uma série de atividades práticas com a aplicação da ferramenta *Parametree*. Essas atividades envolviam a identificação das condições atuais do fluxo de escoamento superficial em condições de precipitação com períodos de retorno de cinco, 25 e 100 anos para o recorte urbano disponibilizado. Então, cada um deveria

trabalhar com soluções para a redução do volume de escoamento superficial e, assim, obter uma melhor classificação para as dinâmicas hidrológicas do local. Essas soluções poderiam envolver o aumento da arborização urbana, da distribuição de áreas livres permeáveis, como gramados; além da aplicação de telhados verdes e materiais alternativos, como asfalto e concreto porosos.

O recorte urbano disponibilizado para a atividade é o recorte B, destacado no subcapítulo **7.3 Definição dos Recortes de Intervenção**. A escolha se justifica pelo fato de a região combinar um alto tempo de concentração, que indica uma grande suscetibilidade a alagamentos, juntamente com a presença de vazios urbanos que possibilitem que os participantes reestruturem criativamente a área de intervenção. Após a definição da área, utilizou-se como base para a tarefa os arquivos georreferenciados produzidos a partir da combinação de arquivos disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Vila Velha e de levantamentos próprios, utilizando-se de imagens aéreas.

Tais arquivos georreferenciados foram editados na interface do programa ArcGIS e, então, exportados na versão “.dwg”, a qual é compatível com os requisitos de leitura do *software* Rhinoceros. Na sequência, o arquivo em “.dwg” foi importado para a interface do Rhinoceros e suas camadas foram editadas de modo a expressar nominalmente o acervo de materiais com os quais a ferramenta *Parametree* foi programada para trabalhar, como concreto, edificação, grama, entre outros. A Figura 52 ilustra o resultado final obtido para o recorte do contexto urbano supracitado.



Figura 52. Modelagem digital do recorte urbano selecionado. **Fonte:** O autor, 2022.

Isto feito, o arquivo do recorte urbano na interface do Rhinoceros foi disponibilizado aos participantes da oficina para a realização das intervenções e análises de contexto através da aplicação da ferramenta algorítmico-paramétrica. Os resultados obtidos com essas simulações confirmam as informações obtidas nas simulações projetuais realizadas no subcapítulo anterior, reforçando que este recorte urbano se encontra em estado crítico para todos os períodos de retorno de precipitação analisados, ou seja, cinco, 25 e 100 anos. Isso demonstra que, apesar da presença dos vazios urbanos em porções consideráveis, a dinâmica geral de funcionamento desse trecho da bacia hidrográfica muito se aproxima do ponto crítico, considerado como sendo um ambiente totalmente impermeabilizado.

Diante desse desafio, os participantes iniciaram as intervenções pela distribuição da arborização. Ao implantar arborização nos espaços ociosos, em alguns espaços livres contidos na dimensão intra-lote e ao longo das vias, abrangendo uma área entre 27 e 40% do recorte urbano, foi possível reduzir a criticidade para a classificação ruim para todos os períodos de retorno de precipitação. Inserindo a estratégia do telhado verde por sobre algumas edificações, a classificação atingiu a faixa regular, melhorando consideravelmente as condições hidrológicas para todos os três períodos de retorno.

Indo além, quando os participantes, então, em adição a tudo que já foi realizado, substituíram as áreas cobertas por asfalto pelo asfalto poroso, a condição do recorte urbano atingiu a classificação boa e, quando o concreto é totalmente substituído por concreto poroso, o local registra a classificação ótima. Apesar de ser um cenário ainda utópico, por substituir a totalidade dos materiais impermeáveis que encobrem o solo por materiais permeáveis, com exceção das edificações, os resultados apontam exatamente para o que foi postulado pela teoria da biofilia urbana: quando o ambiente construído mimetiza as dinâmicas que se desenvolvem no ambiente natural, os problemas decorrentes da antropização excessiva são mitigados (BEATLEY, 2011).

Esse apontamento foi importante de ser observado, pois nas simulações realizadas com a ferramenta na etapa anterior ao teste de usabilidade, evitou-se percorrer caminhos notadamente distantes da realidade, evitando, então, a substituição de todos os materiais impermeáveis pelos permeáveis. Contudo, essa postura incorreu em um limite para a reversão dos efeitos da antropização sobre o território do ponto de vista hidrológico, a qual demonstrou-se possível de ser rompida

através de intervenções mais arrojadas como as realizadas pelos participantes deste teste.

Direcionando a perspectiva para a avaliação da experiência dos usuários, tem-se que:

- (a) a facilidade na utilização da ferramenta *Parametree* foi avaliada com média 5,83, em um máximo de 7 pontos, o que indica que os usuários perceberam a ferramenta como sendo de fácil utilização. Os participantes relataram que a parte mais desconfortável na utilização da ferramenta é a necessidade de selecionar manualmente as geometrias do modelo toda vez que alguma intervenção fosse feita, para que ela pudesse recontar os dados de área. Assim, a automatização desse processo de coleta de dados a partir do modelo digital seria algo percebido como desejável e benéfico;
- (b) a utilidade da ferramenta foi avaliada com média 7, em um máximo de 7 pontos, demonstrando que os usuários perceberam a ferramenta *Parametree* como extremamente útil. Nesse ponto, os relatos convergiram para a questão do volume intenso e da complexidade dos cálculos exigidos para a avaliação das condições hidrológicas de uma bacia ou de um recorte urbano, de modo que a ferramenta contribui em grande parte para tornar esse processo mais simples. Em um cenário em que a ferramenta não existisse ou não pudesse ser utilizada, os usuários relataram que optariam por excluir a avaliação das condições hidrológicas da gama de variáveis de projeto;
- (c) a performance da ferramenta foi avaliada com média 6,5, em um máximo de 7 pontos, o que indica que os usuários a perceberam como sendo muito rápida de executar. Novamente, o tópico que recebeu críticas foi a necessidade de selecionar múltiplas vezes as geometrias do modelo digital sempre que alterações fossem realizadas, para que a ferramenta atualizasse os dados de área coletados;
- (d) a adequação da metodologia e da ferramenta proposta aos objetivos de facilitar a avaliação da formação do escoamento superficial no meio urbano e de promover uma implementação mais eficaz da arborização

foi avaliada com média 7, em um máximo de 7. Isso demonstra que a percepção foi de que tanto a metodologia de cálculo desenvolvida quanto a ferramenta atenderam plenamente aos objetivos propostos;

(e) quando inquiridos quanto à possibilidade de utilizarem novamente a ferramenta *Parametree* para a avaliação das condições hidrológicas de seus projetos acadêmicos ou profissionais, os usuários, em sua totalidade, escolheram a nota 7, em uma escala de 1 a 7, expressando que eles com certeza utilizariam essa ferramenta. Essa informação reforça a lacuna existente nos processos e práticas da Arquitetura, Urbanismo e Engenharias quanto para a implementação de ferramentas que contribuam para a avaliação das propostas projetuais desenvolvidas e, assim, promover uma melhoria na qualidade das intervenções executadas nas cidades, do ponto de vista funcional, técnico e ambiental.

A Figura 53 sintetiza as classificações obtidas para cada pergunta do questionário aplicado para a avaliação da experiência dos usuários da ferramenta *Parametree*.

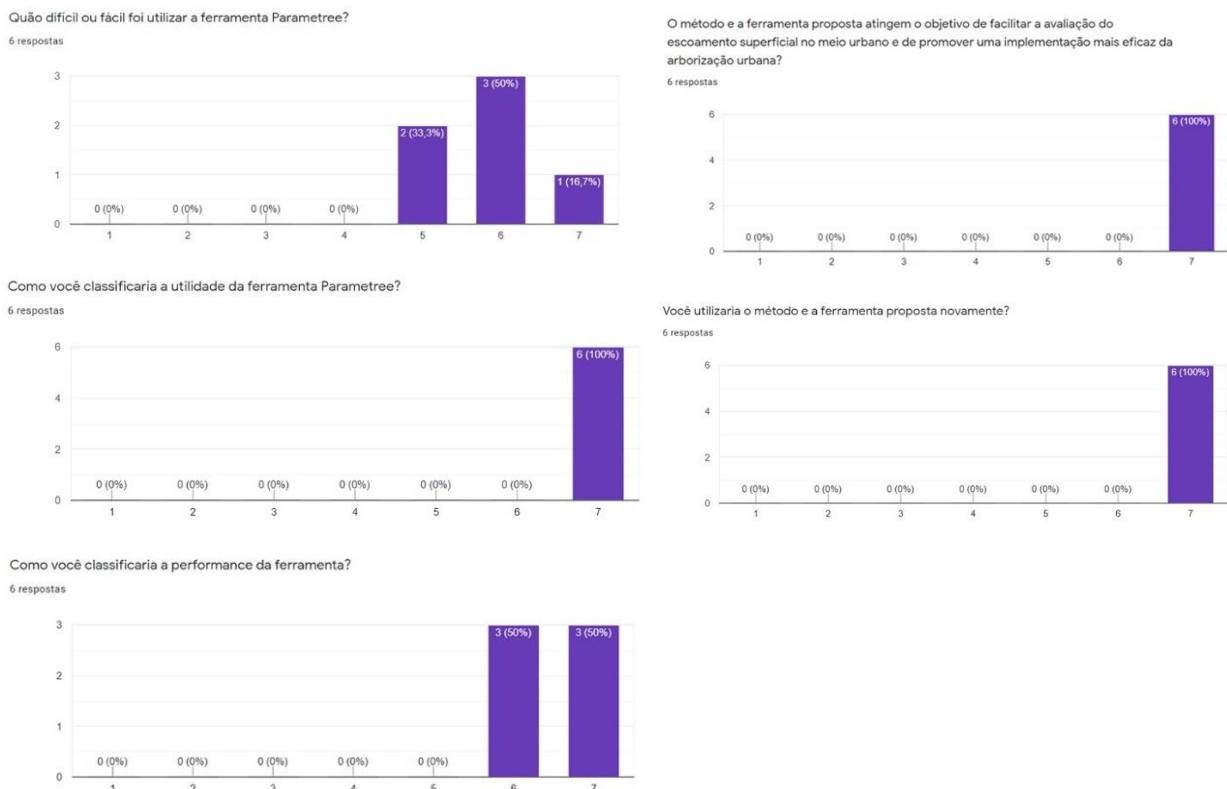


Figura 53. Gráficos da avaliação da ferramenta *Parametree* pelos usuários. **Fonte:** O autor, 2022.

Após a avaliação da ferramenta por parte dos usuários, é possível traçar paralelos com as conclusões obtidas pelas investigações utilizadas como apoio para o desenvolvimento da presente pesquisa: a ferramenta algorítmico-paramétrica de Ribeiro (2018) para avaliação do escoamento superficial e a ferramenta *CityMetrics* de Lima (2017a) para mensuração de performances urbanas sob a perspectiva do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT).

Um dos encaminhamentos dado por Ribeiro (2018) é o de que seria relevante a automatização dos processos de coleta das áreas de material para a otimização do funcionamento de sua ferramenta. Ressalta-se que a metodologia empregada pelo autor para a obtenção desses dados se constituía no mapa de pixels, o qual demandava um considerável trabalho manual de desenho e identificação de materiais sobre imagens aéreas. No caso da *Parametree*, mesmo a ferramenta se tornando apta a extrair dados diretamente dos modelos digitais do recorte urbano em análise, sem a necessidade de execução dos mapas de pixels, o desconforto dos usuários com a necessidade de selecionar as geometrias referentes a cada material foi novamente identificada. Isso enfatiza a necessidade de automatização desses processos de coleta de dados de área no desenvolvimento de ajustes futuros nesta ferramenta.

Já em relação à pesquisa de Lima (2017a), revela-se que o teste de usabilidade aplicado para a ferramenta *Parametree* obteve métricas de avaliação similares às obtidas pela ferramenta *CityMetrics*, respeitando as proporções entre a diversidade de perfis de participantes e o número de usuários das ferramentas de ambos os testes: 11 no teste da ferramenta *CityMetrics* e seis na ferramenta *Parametree*. Essa comparação demonstra uma tendência de receptividade do público acadêmico e profissional a ferramentas que permitam uma avaliação da performance de projetos em seus diversos aspectos, o que subsidia o interesse em pesquisas para o desenvolvimento desse tipo de análises e propostas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral desta dissertação foi o de verificar a aplicabilidade de uma ferramenta algorítmico-paramétrica na avaliação de cenários que utilizem a arborização urbana como estratégia para reequilibrar os processos hidrológicos no meio ambiente construído. Para que este objetivo fosse alcançado, percorreu-se uma trajetória de sete etapas metodológicas, distribuídas em três recortes de abordagens distintos: temático, analítico e prático.

No recorte temático, investigou-se os processos envolvidos na estruturação do espaço urbano contemporâneo lançando um olhar sobre a desarticulação na interface cidade-natureza, principalmente, na questão da deterioração das dinâmicas hidrológicas nas cidades. Assim, nesta etapa, constatou-se que a transformação das feições naturais do território é uma característica inerente à urbanização, que necessita da espacialização de infraestruturas construídas para que suas funções e vivências possam ser desenvolvidas. Nesse sentido, ficou evidente a importância da opção por materiais e técnicas menos agressivas para o ambiente natural, com fins de reduzir os impactos da antropização sobre o meio, principalmente aqueles relacionados aos processos e fluxos hidrológicos.

Foi essa preocupação que motivou a exploração realizada na segunda etapa metodológica, ainda contida no recorte temático, que se ocupou em conhecer as estratégias biofílicas voltadas a um desenho urbano sensível à água. Nessa exploração, compreendeu-se o funcionamento das dinâmicas hidrológicas a partir da análise do Método Racional para o cálculo do fluxo do escoamento superficial, o qual reforçou a influência dos tipos de cobertura do solo para o aumento ou a redução do escoamento superficial. Na sequência, verificou-se o modo com que a arborização interfere nas dinâmicas hidrológicas através de sua capacidade de retenção pluvial, justificando a sua inserção nos processos de cálculo. Por fim, foi dado um panorama geral sobre as estratégias biofílicas existentes e os seus respectivos efeitos esperados para o reequilíbrio do ecossistema urbano.

Após esse olhar sobre os processos e fluxos hidrológicos, notou-se que é elevado o grau de complexidade dos processos necessários de serem abordados na análise das condições hidrológicas do espaço urbano, sendo de grande valia o desenvolvimento de ferramentas que possam auxiliar nessa empreitada. Foi com esse

objetivo que a terceira etapa metodológica foi lançada, a qual possibilitou conhecer exemplos de confecção de ferramentas digitais a partir da abordagem algorítmico-paramétrica. Nesse sentido, perscrutou-se a origem de tal abordagem e as suas possíveis contribuições para o objetivo geral delimitado para esta dissertação, encerrando, assim, as atividades referentes ao recorte temático.

No recorte analítico, executou-se a quarta etapa metodológica deste trabalho através da definição das estratégias de cálculo para avaliação da influência da arborização na drenagem urbana, a qual culminou na confecção de uma nova metodologia de cálculo para o escoamento superficial e em um conjunto de métricas para a avaliação das condições do espaço urbano sob a perspectiva das dinâmicas hidrológicas. Tanto a metodologia de cálculo quanto as métricas se mostraram bastante úteis nas simulações projetuais realizadas mais a frente. A primeira teve o seu funcionamento atestado e contribuiu para o aprimoramento dos cálculos hidrológicos urbanos a partir da inserção dos componentes arbóreos, o que auxiliou a trazer um resultado mais realista a esse tipo de estimativa. A segunda foi crucial para a compreensão da qualidade e da efetividade das intervenções urbanas para o reequilíbrio das dinâmicas hidrológicas.

Ainda no recorte analítico, realizou-se um estudo sobre o processo de programação da ferramenta algorítmico-paramétrica de Ribeiro (2018) e de seu funcionamento, a qual foi criada para reproduzir digitalmente os cálculos referentes ao Método Racional. Enquanto ferramenta predecessora àquela proposta nesta dissertação, o seu estudo foi relevante para a identificação de ajustes necessários para o aprimoramento da ferramenta.

Isto posto, iniciou-se, então, o recorte prático com a quinta etapa metodológica, a qual compreendia a confecção da ferramenta algorítmico-paramétrica proposta nesta dissertação intitulada de *Parametree*. Todo o seu processo de programação foi registrado objetivando fornecer dados para o entendimento e reprodução dessa ferramenta a possíveis futuros pesquisadores interessados na temática.

A sexta etapa metodológica contemplou o levantamento de dados ambientais na área delimitada previamente para estudo, a qual abrangia a sub-bacia hidrográfica do Canal da Costa, em Vila Velha – ES. Com a realização dessa análise preliminar, foi possível apontar para as áreas mais vulneráveis à ocorrência de

alagamentos, as quais foram, então, destacadas e utilizadas nas simulações projetuais e no teste de usabilidade efetuados na sequência.

Como sétima e última etapa metodológica, aplicou-se a ferramenta *Parametree* na simulação de sete propostas de intervenção visando o reequilíbrio das condições hidrológicas existentes no local. A utilização da *Parametree* nesse processo atestou o adequado funcionamento da ferramenta, além de comprovar que a mesma otimizou as etapas de simulação e análise, permitindo que sucessivas propostas fossem criadas e analisadas em um curto espaço de tempo.

Lançando um olhar para a qualidade das intervenções, a ferramenta possibilitou uma compreensão clara da efetividade de cada proposta, de modo ser possível indicar qual a melhor opção gerada. Assim, as simulações comprovaram a teoria estudada no capítulo teórico referente à abordagem algorítmico-paramétrica, a qual postulava que o ferramental paramétrico se constituía como um importante aliado para a confecção e curadoria de propostas projetuais, auxiliando na tarefa de aprimorar as soluções projetuais obtidas ou, então, identificar aquela que é mais adequada a um determinado contexto ou problemática.

Além disso, ao realizar essas experimentações, percebeu-se que a arborização urbana não se caracteriza como uma estratégia principal para a mitigação da problemática dos alagamentos urbanos. As estratégias de maior impacto foram aquelas relacionadas à permeabilidade das superfícies. Entretanto, a arborização emerge como um importante parâmetro complementar para o aumento da qualidade das intervenções urbanas voltadas à mitigação dos alagamentos, pois seus benefícios se estendem a outros processos e dinâmicas. Pode-se citar, nesse caso, a contribuição da arborização para a redução das ilhas de calor, da poluição atmosférica em meio urbano, bem como da poluição sonora, além de servir como suporte para a vida de variados seres, como aves e mamíferos. Ademais, considerar a arborização no cálculo do fluxo de escoamento superficial é relevante para trazer resultados mais próximos à realidade observada no contexto urbano.

Dentre os referenciais teóricos apontados para a temática da retenção pluvial pela arborização, a presente dissertação encontrou resultados próximos àqueles apresentados por Fazio (2010). De acordo com o autor, a arborização urbana poderia contribuir com uma redução de 2 a 7% no escoamento superficial. Considerando as tipologias arbóreas trabalhadas e todo o processo de sistematização de dados, os resultados obtidos por este trabalho para a redução do escoamento

superficial através da arborização gira em torno de 1,50% em um cenário de cobertura arbórea de cerca de 25% do total do recorte urbano.

É importante ressaltar que, como as simulações projetuais empreendidas por esta dissertação consideraram uma combinação entre quatro tipologias arbóreas, as quais são caracterizadas por diferentes capacidades de interceptação pluvial, a redução de 1,50% no escoamento superficial não pode ser tomada como dado absoluto para futuras pesquisas, uma vez que a utilização de uma quantidade maior de espécies com uma alta capacidade de interceptação pluvial tende a aproximar os resultados daqueles reconhecidos por Fazio (2010).

Também deve-se considerar que Fazio (2010) considerou experimentos realizados com espécies arbóreas encontradas na América do Norte, as quais não foram detalhadas, sendo, então, desconhecidas as características referentes à arquitetura arbórea, que diretamente se relaciona à capacidade de interceptação pluvial, conforme estudado nesta dissertação.

As simulações projetuais foram importantes, também, para constatar o descompasso existente entre a intenção de alguns dispositivos de planejamento e regulação urbana e a sua real efetividade. No caso da taxa de permeabilidade, por exemplo: foi verificado que, apesar de constar na lei de uso e ocupação do solo municipal que a taxa de permeabilidade mínima para as áreas analisadas é de 15%, esse percentual não traz benefícios concretos ao reequilíbrio das dinâmicas hidrológicas, conforme indicado nas simulações projetuais.

Dessa forma, questionam-se os parâmetros considerados para a definição da taxa de permeabilidade aplicada na Lei de Uso e Ocupação do Solo. Com base em qual dinâmica são definidas essas percentagens que, geralmente, variam entre 5 e 20%? Qual, então, deveria ser essa taxa de permeabilidade e como ela impactaria na espacialização do tecido construído? Haveria de ser necessário uma menor taxa de ocupação na dimensão intra-lote? Tais questionamentos ainda se encontram sem uma resposta definida, podendo ser matéria de exploração para pesquisas futuras. Reforça-se, ainda nessa conjuntura, a iniciativa tomada recentemente pela cidade de São Paulo que discute a implementação de uma taxa de permeabilidade de 30% para as novas construções a serem implementadas na metrópole.

Nesse contexto, aponta-se para a aplicabilidade da *Parametree* em processos de revisão de plano diretor, por exemplo, sendo, nesse caso, útil para a redefinição de taxas e coeficientes construtivos, o que permitiria o desenvolvimento

de um desenho urbano mais atento aos processos e fluxos hidrológicos, além de validar a efetividade de iniciativas, como aquelas expressas pelo município de São Paulo, visando ampliar a taxa de permeabilidade.

Por fim, um teste de usabilidade também foi executado com estudantes e profissionais das áreas da Engenharia Civil e da Arquitetura e Urbanismo como forma de validação da ferramenta, visando assimilar a percepção da comunidade externa à pesquisa desenvolvida em relação à ferramenta proposta por este trabalho. O teste demonstrou uma boa recepção à proposta da *Parametree*, além de indicar ajustes para melhoria do funcionamento desta, como a automatização da obtenção dos dados oriundos dos modelos digitais.

Em termos de encaminhamentos para futuras pesquisas, ressalta-se, então, a importância de automatizar o processo de alimentação da ferramenta com os dados contidos no projeto e a necessidade de ampliar os grupos arbóreos contemplados pela ferramenta para a realização dos cálculos de interceptação pluvial. Essa integração de novos grupos de características arbóreas, prioritariamente, deveria ser efetuada através do levantamento e análise do comportamento de espécies arbóreas utilizadas no paisagismo das cidades brasileiras, porém também pode ser realizado através de estimativas digitais atrelando a arquitetura arbórea à taxa de retenção pluvial.

Outro ponto relativo à arborização que merece destaque nas investigações é a variação da taxa de retenção pluvial ao longo do desenvolvimento do indivíduo arbóreo. As taxas indicadas nesta pesquisa foram obtidas a partir de levantamentos empreendidos por outros pesquisadores os quais consideraram indivíduos arbóreos de desenvolvimento jovem e adulto. Entretanto conhecer e estimar essa variação é importante para prever o tempo necessário para que a intervenção urbana atinja o seu ponto máximo de contribuição para a mitigação dos alagamentos, o que pode ser realizado a partir de simulações digitais, por exemplo.

Ademais, conforme discutido ao longo das simulações projetuais, também é possível, com a implementação da *Parametree*, simular e recomendar atualizações nos dispositivos de planejamento urbanístico de modo a possibilitar a consolidação de um espaço urbano menos agressivo aos processos pluviais. Essas atualizações devem contemplar, principalmente, questões como a taxa de ocupação dos loteamentos, a taxa de permeabilidade do solo e a estruturação viária, a qual se relaciona intrinsecamente à problemática da mobilidade. A utilização da ferramenta

como suporte a políticas públicas de incentivo a implementação de estratégias biofílicas, como arborização de jardins e calçadas e implantação de telhados verdes também é uma possibilidade vislumbrada.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Patrícia Layne. **Capacidade de Interceptação pelas Árvores e suas Influências no Escoamento Superficial Urbano**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- ANELLI, Renato Luiz Sobral. Uma nova cidade para as águas urbanas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 29, n. 84, 2015.
- ARTAXO, Paulo. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno?. **Revista USP**, n. 103, p. 13-24, 2014.
- AVENA, Regina Célia Suzano. **Construções rodoviárias, bacias hidrográficas, geração de passivos ambientais e riscos associados: o caso da Rodovia RJ - 165 – Paraty - Cunha**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- BEATLEY, Timothy. **Biophilic Cities: integrating nature into urban design and planning**. Washington, D.C.: Island Press, 2011.
- _____. **Handbook of Biophilic City Planning and Design**. Washington, D.C.: Island Press, 2016.
- BEKELE, Haregewoin. **Urbanization and Urban Sprawl**. 2005. Thesis (Master in Building and Real Estate Economics) – Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 2005.
- BERČIČ, Tomaž; AŽMAN-MOMIRSKI, Lucija. Parametric Terracing as Optimization of Controlled Slope Intervention. **Water**, v. 12, i. 03, p. 1-19, 2020.
- BONATTO, Daniella do Amaral Mello. Infraestrutura verde – estratégia para regeneração de espaços livres e qualidade do ambiente construído. In: Conferência Latino-americana e Europeia sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – EURO ELECS, 1., 2015, Guimarães. **Livro de Actas**. Guimarães: Universidade do Minho, 2015, v. 03, p. 2097-2106.

BONZI, Ramón Stock. Emerald Necklace – Infraestrutura Urbana Projetada como Paisagem. **Revista LABVERDE**, n. 09, p. 106-127, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.v0i9p106-127>

BRASIL. **Lei nº 12.608**, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2012/lei-12608-10-abril-2012-612681-publicacaooriginal-135740-pl.html> Acesso em: 27 set. 2020.

BUCCI, Federico; MULAZZANI, Marco. **Luigi Moretti: Works and Writings**. New York: Princeton Architectural Press, 2002.

CAPPIELLA, Karen; SCHUELER, Tom; WRIGHT, Tiffany. **Urban Watershed Forestry Manual**. Ellicott City, Maryland: USDA Forest Service, 2005.

CARNIELLI, Helder Paulo. **Pouca cobertura florestal e má proteção do solo provocam escassez hídrica**. Portal Campo Vivo, 19 out. 2015. Disponível em: <https://campovivo.com.br/artigos/artigo-pouca-cobertura-florestal-e-ma-protecao-do-solo-provocam-escassez-hidrica-por-helder-paulo-carnielli/> Acesso em: 23 ago. 2020.

CARVALHO, Rubens Moreira Rodrigues de. O discurso ambientalista e a mercadoria da paisagem: papéis dialéticos assumidos pelas áreas naturais no processo de organização espacial da cidade capitalista. In: Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – ENANPARQ, 3., 2014, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2014.

CASTELLS, Manuel. **La question urbaine**. Paris: Maspero, 1977.

_____. **The Rise of the Network Society: The Information Age: Economy, Society, and Culture**. 2.ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2010.

CAVALCANTI, Clóvis. Sustentabilidade: mantra ou escolha moral? Uma abordagem ecológico-econômica. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, 2012.

CELANI, Gabriela. Algorithmic Sustainable Design. Uma visão crítica do projeto generativo. **Resenhas Online**, Vitruvius, São Paulo, ano 10, n. 116.03, ago. 2011.

Disponível em:

<<https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/10.116/3995>> Acesso em: 11 ago. 2020.

CELANTE, Suelem; SATHLER, Marcelo; DA-SILVA-ROSA, Teresa. Histórias de vida no resgate da história da ocupação do solo de Vila Velha (ES). In: Congresso Brasileiro de Sociologia, 17., 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. 2015.

CHOKHACHIAN, Ata; HILLER, Marion. PANDO: Parametric Tool for Simulating Soil-Plant-Atmosphere of Tree Canopies in Grasshopper. In: Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design – SimAUD, 11., 2020, online. **Proceedings [...]**. 2020. p. 501-508.

CIRILO, José Almir. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 45-58, jul./ago./set. 2015.

COSTA, Joanne Régis; COSTA, Patrícia da; EIDT, Jane Simoni Silveira; HAMMES, Valéria Sucena. **Cidades e comunidades sustentáveis**: contribuições da Embrapa. Brasília: Editoras Técnicas, 2018.

COSTA, Luiz Augusto Maia. **O ideário urbano paulista na virada do século**. O engenheiro Theodoro Sampaio e as questões territoriais e urbanas modernas (1886-1903). São Carlos: RiMa/Fapesp, 2003.

CROCE, Romulo. **Relações entre Espaço Urbano e Cursos D'água**: Conflitos e Interações no Vale do Rio Doce. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

CRUTZEN, Paul J.; STOERMER, Eugene F. The Anthropocene. **IGBP Global Change Newsletter**, n. 41, p. 17–18, 2000.

DA-SILVA-ROSA, Teresa; REGINENSI, Caterine; GAVA MONTEIRO, Túlio; MATOS DE SOUZA, Ricardo. O cruzamento das ausências e das presenças na tessitura de vulnerabilidades e de riscos de desastres em áreas de desenvolvimento tardio: o caso de Vila Velha (Espírito Santo, Brasil). **Estudios Rurales**, v. 08, n. 15, p. 179-202, 2018.

DAVIS, Kingsley. The Urbanization of the Human Population. **Scientific American**, v. 213, n. 03, September 1965.

DAVIS, Daniel. **Modelled on software engineering**: Flexible parametric models in the practice of architecture. RMIT University, 2013.

DE MORAES, Dijon. **Metaprojeto**: o design do design. São Paulo: Blucher, 2010.

EASTMAN, Charles. **GSP**: A system for computer assisted space planning. 1971, [S.l.]: ACM, 1971. p. 208–220.

EASTMAN, Charles; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **Manual de BIM**: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores. Porto Alegre: Bookman, 2013.

EMDAT – EMERGENCY EVENTS DATABASE. CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN. **Global reported natural disasters by type, 1970 to 2019**. Belgium, 2020.

ENGELS, Friedrich. **A Situação na Classe Trabalhadora na Inglaterra**. Tradução de B. A. Schumann. São Paulo: Boitempo, 2010.

FARR, Douglas. **Urbanismo Sustentável**: desenho urbano com a natureza. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FAZIO, James. How trees can retain stormwater runoff. **Tree City USA Bulletin**, n. 55, p. 01-08, 2010.

FERRÃO, João. Antropoceno, Cidades e Geografia. In: CRAVIDÃO, Fernanda; CUNHA, Lúcio; SANTANA, Paula; SANTOS, Norberto. (Org.). **Espaços e Tempos em Geografia**: Homenagem a António Gama. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2017, p. 287-302.

FOGEIRO, Jéssica Simões. **Cidade Esponja** – Aplicação do Conceito e Métodos no Bairro Marechal Gomes da Costa, Porto. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura Paisagista) – Universidade do Porto, Porto, 2019.

FRAZER, John. Parametric Computation: History and Future. **Architectural Design**, v. 86, n. 02, p. 18-23, 2016.

FRITZEN, Maycon; BINDA, Andrey Luis. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. **Ateliê Geográfico**, v. 05, n. 03, p. 239-254, 2011. DOI: 10.5216/ag.v5i3.16703

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de Calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficinas de Textos, 2010.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GODOI, Giovana. Procedimentos algorítmicos: o método albertiano. In: CELANI, Gabriela; SEDREZ, Maycon. (Org.). **Arquitetura contemporânea e automação**: prática e reflexão. São Paulo: ProBooks, 2018.

GOLDENFUM, Joel Avruch; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia de águas superficiais**. Brasília: ABEAS, 1996.

GOMES, Marcos Antônio Silvestre; SOARES, Beatriz Ribeiro. Reflexões sobre qualidade ambiental urbana. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, v. 02, n. 02, p. 21-30, jul./dez. 2004.

GORSKI, Maria Cecília Barbieri. **Rios e Cidades**: rupturas e reconciliações. 2008. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2008.

GRAZIANO, Taís Tostes. **Viveiros Municipais**. UNESP. Notas de Aula, 1994.

GUEDES, André Luis Azevedo; SOARES, Carlos Alberto Pereira; RODRIGUEZ, Martius Vicente Rodriguez y. (Org.). **Smart Cities**. Cidades Inteligentes nas Dimensões: Planejamento, Governança, Mobilidade, Educação e Saúde. 1.ed. Livro Digital. 2020.

HARDOY, Jorge Enrique. El futuro de la ciudad latinoamericana. **Medio Ambiente y Urbanización**, n. 43, p. 147-166, 1993.

HERZOG, Cecília Polacow. **Cidade para todos: (re)aprendendo a conviver com a natureza.** Rio de Janeiro: Editora Mauad, 2013.

HERZOG, Cecília Polacow; ROSA, Lourdes Zunino. Infraestrutura verde: sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. **Revista LabVerde**, n. 01, p. 92-115, 2010. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.v0i1p92-115>

HOWELL, Ian; BATCHELER, Bob. **Building information modeling two years later** – Huge potential, some success, and several limitations. *The Laiserin Letter* 24, 2005.

IBF – INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. **Lista de Espécies Nativas.** [2020]. Disponível em: <<https://www.ibflorestas.org.br/lista-de-especies-nativas>> Acesso em: 06 out. 2021.

IEMA – INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Atlas de Vulnerabilidade às Inundações no Estado do Espírito Santo.** 2013.

IJSN – INSTITUTO JONES DO SANTOS NEVES. **Articulação Sócio-Econômica do Estado do Espírito Santo.** Vitória: IJSN, 1987.

_____. **Biblioteca Fotográfica.** Vitória: IJSN, 1960.

JUAN, Andrew; HUGHES, Christina; FANG, Zheng; BEDIANT, Philip. Hydrologic Performance of Watershed-Scale Low-Impact Development in a High-Intensity Rainfall Region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, i. 04, apr. 2017.

KALAY, Yehuda E. The impact of information technology on design methods, products and practices. **Design Studies**, v. 27, n. 3, 2006. p. 357-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.001>

KELLERT, Stephen. **Nature by Design: The Practice of Biophilic Design.** New Haven: Yale University Press, 2018.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age: design and manufacturing.** New York: Spon Press, 2003.

KRENAK, Ailton. **Ideias para adiar o fim do mundo**. São Paulo: Companhia das Letras, 2019.

KUHLMAN, Tom; FARRINGTON, John. What is Sustainability?. **Sustainability**, v. 02, n. 11, p. 3436-3448, 2010.

LAUXEN, Mozart da Silva. **A mitigação dos impactos de rodovias sobre a fauna: um guia de procedimentos para tomada de decisão**. 2012. Monografia (Especialização em Diversidade e Conservação da Fauna) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LEFEBVRE, Henri. **La Revolución Urbana**. Madrid: Alianza. 1972.

LEVY, Albert. Urban morphology and the problem of the modern urban fabric: some questions for research. **Urban Morphology**, v. 03, n. 02, p. 79-85, 1999.

LEWIS, Simon; MASLIN, Mark. A transparent framework for defining the Anthropocene Epoch. **The Anthropocene Review**, v. 02, i. 02, p. 128-146, 2015.

LHUMEAU, Aurélie; CORDERO, Dani. **Adaptación basada em ecosistemas: una respuesta al cambio climático**. Quito: Oficina Regional para América do Sul - International Union for Conservation of Nature, 2012.

LIMA, Fernando; COSTA, Frederico Ribeiro; ROSA, Ashiley. Lógica Algorítmica-Paramétrica e Urbanismo: uma revisão teórica e de modelos computacionais para projetos urbanos. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 15, n. 02, p. 84-97, 2020.

LIMA, Fernando Tadeu de Araújo. **MÉTRICAS URBANAS: Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho**. 2017. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017a.

LIMA, Henrique Gazzola de. **Parametrização, zoneamento e produção autônoma do espaço urbano**. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017b.

LÓPEZ, Juan Felipe Barrios. **Interceptação de águas pluviais em um fragmento florestal de Mata Atlântica da Reserva Biológica de Duas Bocas, Cariacica (ES) Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MAKERT, Rodrigo; ALVES, Gianfranco. Entendendo o Design Digital: o designer nos processos digitais de projeto. In: Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, 20., 2016, Buenos Aires. **Proceedings [...]**. Buenos Aires: Blucher, 2016, p. 739-747.

MARICATO, Ermínia. Para entender a crise urbana. **CaderNAU – Cadernos do Núcleo de Análises Urbanas**, v. 08, n. 01, p. 11-22, 2015.

MARTINS, Iago Longue; ROSA, Teresa da Silva. Plano de Ação Climática de Paris: desdobramentos e contribuições para cidades sustentáveis em países periféricos. In: VI ENANPARQ, 2021, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: FAU-UnB, 2021. p. 2076-2090.

MATTOS, Rossana. **Expansão Urbana, segregação e violência**: um estudo sobre a região metropolitana da Grande Vitória. Vitória: EDUFES, 2013.

MCHARG, Ian. **Design with Nature**. New York: Doubleday/Natural History Press, 1969.

MELACHOS, Felipe Corres. **Análise paramétrica das abóbadas gaussianas de Eladio Dieste**. 2020. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

MELL, Ian. Green Infrastructure: concepts and planning. **FORUM e-journal**, Newcastle University, i. 08, p. 69-80, June 2008.

MENGES, Achim; AHLQUIST, Sean. **Computational design thinking**. Chichester: Wiley, 2011.

MITCHELL, William John. **A computer-aided approach to complex building layout problems**. [S.l: s.n.], 1970.

MONTE-MÓR, Roberto Luís de M.. Urbanização Extensiva e Lógicas de Povoamento: um olhar ambiental. In: SANTOS, Milton; SOUZA, Maria Adélia A. de;

SILVEIRA, Maria Laura. (Orgs.). **Território, Globalização e Fragmentação**. São Paulo: HUCITEC/ANPUR, 1994, p. 169-181.

MORAES, Dulce Ferreira de; SOUZA, Carlos Leite de; FERREIRA, Maurício Lamano. Biofilia e sustentabilidade no planejamento urbano: interfaces conceituais e parâmetros de análise. **Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares**, v. 01, e205174, 2020.

MOSTAFAVI, Mohsen. Por que Urbanismo Ecológico? Por que Agora?. In: MOSTAFAVI, Mohsen; DOHERTY, Gareth. **Urbanismo Ecológico**. São Paulo: Gustavo Gili, 2014, p. 12-55.

MOURA, Newton Célio Backer; PELLEGRINO, Paulo; MARTINS, José Rodolfo Scarati; RAVIOLO, Bruno; MOREIRA, Eugênio. Intelligent Landscapes: Application of Parametric Modeling for a New Generation of Flood Risk Management Reservoirs in São Paulo City, Brazil. **DISEGNARECON**, v. 11, n. 20, jun. 2018.

NEVES, Thayssa Barbosa da Silva. **Indicadores para o Verde Urbano (IVU): Proposta de Implementação Computacional para Indicadores de Densidade Vegetada e Densidade Construída**. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

NUCCI, João Carlos. Metodologia para Determinação da Qualidade Ambiental Urbana. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 12, p. 209-224, 1998.

NUNES, Elizon Dias; ROSA, Lucas Espíndola. Compactação e Impermeabilização do Solo e Implicações nos Canais Fluviais. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, e19023, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19023>

NUNES, Lucí Hidalgo. **Urbanização e Desastres Naturais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030**. 13 out. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>> Acesso em: 14 ago. 2020.

_____. DEPARTAMENTO DE ASSUNTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS.
Perspectivas da Urbanização Mundial 2018. 2018. Disponível em:
<<https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>> Acesso em: 14 ago. 2020.

PASSAMANI, Fernanda Caliman. **Análise da macrodrenagem de uma bacia urbana costeira com auxílio de modelagem hidrológica e hidráulica**.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2016.

PAZ, Adriano Rolim da. **Apostila de Hidrologia Aplicada**. UERGS. 2004.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**.
2.ed. Novo Hamburgo: Universidade FEEVALE, 2013.

PRUSKI, Fernando Falco; BRANDÃO, Viviane dos Santos; SILVA, Demetrius David da. **Escoamento Superficial**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2014.

RANGEL, Ignácio. **Obras reunidas de Ignácio Rangel**. Rio de Janeiro:
Contraponto, 2005.

REI, Fernando Cardozo Fernandes; GONÇALVES, Alcindo Fernandes; SOUZA, Luciano Pereira de. Acordo de Paris: reflexões e desafios para o regime internacional de mudanças climáticas. **Veredas do Direito**, Belo Horizonte, v. 14, n. 29, p. 81-89, mai./ago. 2017.

RIBEIRO, Filipe Leonardo Oliveira. **Explorando Métricas Urbanas: Desenvolvimento de uma Ferramenta Algorítmico-Paramétrica para Suporte em Drenagem Urbana**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) –
Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

ROCHA, Luciani Maria Vieira; SOUZA, Léa Cristina Lucas; CASTILHOS, Francisco José Vigeta. Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 03, p. 161-175, jul./set. 2011.

SACCARO JUNIOR, Nilo Luiz; COELHO FILHO, Osmar. Cidades resilientes e o ambiente natural: ecologia urbana, adaptação e gestão de riscos. In: COSTA, Marco Aurélio. (Org.). **O Estatuto da Cidade e a Habitat III: um balanço de quinze anos da política urbana no Brasil e a nova agenda urbana**. Brasília: IPEA, 2016, p. 283-302.

SALES, Gabriel Pagno Peralva. Manejo de águas pluviais em São Paulo visando mitigar a ocorrência de alagamentos. In: Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES Fenasan, Curitiba, 2017. **Anais [...]**. 2017.

SANTOS, Milton. **A Natureza do Espaço**. Técnica e Tempo. Razão e Emoção. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo - EdUSP, 2006.

_____. **A Urbanização Brasileira**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo - EdUSP, 2008.

SARTÓRIO, Marcus Vinícius Oliveira. **Desnaturalização dos Sistemas Fluviais Urbanos: O caso do canal da Costa e do canal Bigossi, Vila Velha (ES)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

SCHUMACHER, Patrik. **Parametricism as Style: Parametricist Manifesto**. London, 2008.

SENNA, Rafael Salgado de. **Estimação de Parâmetros da Equação de Chuvas Intensas para o Estado do Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Alegre, 2009.

SHEA, Kristina; AISH, Robert; GOURTOVAIA, Marina. Towards integrated performance-driven generative design tools. **Automation in Construction**, v. 14, n. 02, 2005. p. 253- 264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.002>

SILVA, Suelen Takano; SANTOS, Rafael Felipe Moraes. A interceptação das águas pluviais através da arborização urbana. **INOVAE**, São Paulo, v. 06, p. 191-206, jan-dez 2018.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Trama verde-azul e drenagem urbana sustentável. In: LADWIG, Nilzo Ivo; SCHWALM, Hugo (Org.). **Planejamento e gestão territorial: a sustentabilidade dos ecossistemas urbanos**. Criciúma: EDIUNESC, 2018, p. 69-91.

SIQUEIRA, Maria da Penha Smarzaró. A questão regional e a dinâmica econômica do Espírito Santo – 1950/1990. **Fênix** - Revista de História e Estudos Culturais, v. 06, n. 04, 2009.

SOMOL, Robert E. Dummy Text, or the Diagrammatic Basis of Contemporary Architecture. In: EISENMAN, Peter. **Diagram Diaries**. New York: Universe Publishing, 1999, p. 07-25.

SPERANZA, Philip. Using parametric methods to understand place in urban design courses. **Journal of Urban Design**, v. 21, n. 05, p. 661-689, 2016.

SOUZA FILHO, Eliomar Venâncio de. **O Rio da Costa e a Cidade de Vila Velha, da Ruptura à Busca da Harmonia pelo Desenho Urbano**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Cidade) – Universidade Vila Velha, Vila Velha, 2019.

STAN, John T. Van.; UNDERWOOD, Jeffrey, FRIESEN, Jan. Urban Forestry: An Underutilized Tool in Water Management. In: FRIESEN, Jan; RODRÍGUEZ-SINOBAS, Leonor. (Eds.). **Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection**. Amsterdam: Elsevier, 2018, p. 35-61.

STEFFEN, Will; BROADGATE, Wendy; DEUTSCH, Lisa; GAFFNEY, Owen; LUDWIG, Cornelia. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. **The Anthropocene Review**, v. 02, n. 01, p. 81-98, 2015.

STEINØ, Nicolai; OBELING, Esben. Parametrics in Urban Design: A Bridge to Cross the Gap Between Urban Designer and Urban Dweller?. In: CONGRESS AESOP, 5., 2005, Vienna. **Proceedings [...]**. Vienna, 2005.

STINY, George; MITCHELL, William. John. The Palladian grammar. **Environment and Planning B**, v. 5, n. 1, p. 5–18, 1978.

SUSTAINABLE SANITATION AND WATER MANAGEMENT – SSWM. **The Water Cycle**. 2010. Disponível em: <<http://archive.sswm.info/pt-pt/category/concept/water-cycle>> Acesso em: 26 nov. 2020.

TEDESCHI, Arturo. What computational design and why it matters, explained by Arturo Tedeschi. [Entrevista concedida a] Laura Traldi. **Design at Large**, 03 November 2021. Disponível em: <<https://www.designatlarge.it/what-is-computational-design-explained-by-arturo-teseschi/?lang=en>> Acesso em: 04 nov. 2021.

TESTA, Joara Fernanda. A poluição atmosférica por veículos automotores na Região Metropolitana de São Paulo: causas e impactos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 02, p. 1209-1221, mai./ago. 2015.

TOLEDO, Rodrigo Alberto. Influência das concepções europeias na formulação do pensamento urbanístico paulista. **Sociedade e Cultura**, Goiânia, v. 15, n. 02, p. 405-415, dez. 2012.

TORREY, Barbara Boyle. **Urbanization**: An environmental force to be reckoned with. Population Reference Bureau, Washington, 2004.

TROWBRIDGE, Peter; BASSUK, Nina. **Trees in the Urban Landscape**: Site Assessment, Design, and Installation. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia** – ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH, 2000.

TUNDISI, José Galizia. Ciclo Hidrológico e Gerenciamento Integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 04, p. 31-33, out./dez. 2003.

VIRZI, Robert A.. Refining the Test Phase of Usability Evaluation: How Many Subjects Is Enough?. **Human Factors**: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society, v. 34, i. 04, p. 457-468, 1992.

WILSON, Edward O. **Biophilia**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1984.

WOODBURY, Robert. **Elements of Parametric Design**. New York: Routledge, 2010.









ZANLUCA, Izabela; SUGAI, Maria Inês. Desafios para a Gestão, o Uso e Conservação das Bacias Hidrográficas: Rios Urbanos ao longo das Cidades de Pequeno e de Médio Porte. In: Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas de Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo, 3., 2014, Belém. **Anais [...]**. Belém: APPURBANA, 2014.










ZARI, Maibritt Pedersen. Mimicking ecosystems for bio-inspired intelligent urban built environments. **Intelligent Buildings International**, v. 08, n. 02, p. 57-77, 2016.







ZARI, Maibritt Pedersen; HECHT, Katharina. Biomimicry for Regenerative Built Environments: Mapping Design Strategies for Producing Ecosystem Services. **Biomimetics**, v. 05, n. 18, 2020.

ZOLA, Émile. **Germinal**. Tradução de Silvana Salerno. São Paulo: Seguinte, 2016.

APÊNDICE A – AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES POR CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

	ESPÉCIE	COPA	FOLHAS	TRONCO
GRUPO 01	<i>Tipuana tipu</i>	 Muito densa e ampla	 Compostas e médias	 Rugoso e esponjoso
	GRUPO 02	<i>Peltophorum dubium</i>	 Muito densa e média	 Compostas e pequenas
<i>Caesalpinia peltophoroides</i>		 Muito densa e média	 Compostas e pequenas	 Rugoso e firme

GRUPO 03	<i>Mangifera indica</i>			
		Muito densa e ampla	Unifoliales e médias	Rugoso e firme
	<i>Licania tomentosa</i>			
		Muito densa e média	Unifoliales e médias	Rugoso e firme
	<i>Pachira aquatica</i>			
		Muito densa e média	Compostas e médias	Rugoso e firme

GRUPO 04	<i>Tabebuia heptaphylla</i>			
		Densa e ampla	Compostas e médias	Rugoso e firme
	<i>Alchornea triplinervea</i>			
		Densa e ampla	Unifoliales e médias	Rugoso e firme