

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

DÉBORA MELA

**GEOMETRIA PARA FACHADAS VERDES APLICANDO A MODELAGEM
ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA: ESTUDOS COM DIFERENTES ESPÉCIES
TREPadeiraS**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

DÉBORA MELA

**GEOMETRIA PARA FACHADAS VERDES APLICANDO A MODELAGEM
ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA: ESTUDOS COM DIFERENTES ESPÉCIES
TREPADEIRAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Andressa C. Pena Martinez

Coorientador: Affonso Henrique Lima Zuin

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M517g
2023
Mela, Débora, 1990-
Geometria para fachadas verdes aplicando a modelagem
algorítmico-paramétrica: estudos com diferentes espécies
trepadeiras / Débora Mela. – Viçosa, MG, 2023.
1 tese eletrônica (179 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Andressa Carmo Pena Martinez.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.314>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Fachadas (Arquitetura). 2. Jardinagem vertical.
3. Trepadeira. 4. Métodos de simulação. 5. Algoritmos.
I. Martinez, Andressa Carmo Pena, 1982-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo.
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.
III. Título.

CDD 22. ed. 728.1


DÉBORA MELA

**GEOMETRIA PARA FACHADAS VERDES APLICANDO A MODELAGEM
ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA: ESTUDOS COM DIFERENTES ESPÉCIES
TREPadeiras**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 24 de março de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 DEBORA MELA
Data: 23/05/2023 10:50:14-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Débora Mela
Autora

Documento assinado digitalmente
 ANDRESSA CARMO PENA MARTINEZ
Data: 02/06/2023 01:52:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Andressa Carmo Pena Martinez
Orientadora

Dedico este trabalho à minha querida irmã Camila Mela (in memoria) e aos meus familiares que sempre me apoiaram e incentivaram para alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Andressa Martinez, primeiramente por ter me aceitado como sua orientanda e ter acreditado na proposta deste trabalho. E principalmente, por sempre ter colocado o seu conhecimento à disposição para a orientação e contribuição da pesquisa, onde conduziu nossos encontros com muita atenção, amizade e compreensão. Obrigada por todo incentivo e pela valiosa orientação durante esses anos;

Meus sinceros agradecimentos também ao meu coorientador Affonso Zuin, por ter me apoiado e orientado na construção e desenvolvimento dos protótipos para o experimento em campo, o qual foi parte essencial para esta pesquisa. Agradeço também, por ter investido seu tempo e conhecimento comigo, onde sempre se mostrou interessado e atencioso a cada assessoramento. Sua experiência em paisagismo e pesquisa contribuiu muito para o meu trabalho;

Aos membros da banca examinadora, que gentilmente aceitaram participar e contribuir para a avaliação, aperfeiçoamento e conclusão desta pesquisa;

A Universidade Federal de Viçosa (UFV), e a todos os professores pela inestimável contribuição à minha formação acadêmica;

Ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa (PPG.au/UFV), em especial ao Laboratório N.º. e a todos os seus membros pelo apoio e ao desenvolvimento desta pesquisa;

Agradeço também, o departamento de Agronomia, setor de Fitotecnia por ter concedido permissão para realizar o experimento em campo, na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) Floricultura-Belvedere, da Universidade Federal de Viçosa;

Aos membros e funcionários da Floricultura-Belvedere, setor da Universidade Federal de Viçosa, por todo assessoramento em cada etapa do experimento ao longo dos últimos anos de parceria, onde pude aprender e enriquecer várias etapas da pesquisa;

Ao Marcio Godoi pela amizade estabelecida e disponibilidade na colaboração durante todo o período de implantação, manutenção e coleta de dados do experimento, assim como, pela troca de conhecimento, paciência e empatia em cada fase desse processo;

Aos pesquisadores da Fitotecnia, Toshik e Marlon, pelo apoio e ensinamento durante o processo do experimento, e pela parceria em produção de artigos científicos relacionados aos dados do experimento desta pesquisa;

Ao Wallace Dornelas, por sempre ter me ajudado, sanando dúvidas e orientando possíveis soluções para resolver eventuais problemas durante o processo de desenvolvimento do código, assim como, pela paciência e amizade estabelecida durante esse processo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) (código financeiro 001) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelas bolsas concedidas durante os três primeiros anos do doutorado;

À minha família por sempre estarem ao meu lado, incentivando e me encorajando para alcançar meus objetivos;

À minha querida irmã Camila Mela (*in memoriam*) que mesmo não estando mais presente fisicamente, me inspira a ser uma pessoa melhor a cada dia. Sou eternamente grata a Deus por ter me dado a oportunidade de ter tido ela como irmã, e sempre irei me esforçar para dar orgulho a ela;

A cidade de Viçosa que me acolheu tão bem e calorosamente durante esses anos de pesquisa e moradia;

Aos meus colegas e amigos, Caio, Marcio, Mariana, Carol, Jordana e Renata, obrigada pelo companheirismo e acolhimento durante essa caminhada. Vocês me fizeram sentir em casa, e nunca me deixaram desistir frente a tantos problemas.

Obrigada!

RESUMO

MELA, Débora, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2023. **Geometria para fachadas verdes aplicando a modelagem algorítmico-paramétrica: estudos com diferentes espécies trepadeiras**. Orientadora: Andressa Carmo Pena Martinez. Coorientador: Affonso Henrique Lima Zuin.

Atualmente não existe um modelo específico para a simulação das características e condições fisiológicas de fachadas verdes. Geralmente, o processo de modelagem utilizado entre pesquisadores é adaptar modelos de telhado verde, ou então criar uma superfície utilizando um material mais opaco, para emular a textura das folhas. Embora esses processos tenham contribuído com alguns resultados, esse método não simula as condições físicas e fisiológicas reais de uma fachada verde, gerando algumas incertezas nos resultados. Portanto, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma geometria focada para simular as condições físicas de uma fachada verde. O método utilizado para esse processo foi a modelagem algorítmico-paramétrica, com apoio do experimento em campo para coletar parâmetros botânicos específicos de diferentes espécies aptas para fachadas verdes, e que serviram de *input* para a modelagem do sistema em ambiente digital. Além disso, utilizamos a metodologia de revisão sistemática da literatura para ressaltar e entender os processos de modelagem da vegetação aplicados nos últimos dez anos e possíveis parâmetros adotados. Como resultados, o trabalho apresenta uma geometria específica para fachada verde, uma biblioteca de parâmetros que serviram de *input* para a configuração da vegetação, algumas opções para sua aplicação em fachadas, e uma série de diretrizes e recomendações para a correta aplicação do modelo. Com esse material, é possível configurar o tipo de plantio da vegetação (vaso ou solo), simular as condições de crescimento da planta entre as quatro estações do ano (outono, inverno, primavera e verão), estimar a massa vegetada geral de uma fachada e apresentar quantitativos para direcionar a construção do sistema. Todos os parâmetros utilizados foram coletados em campo e configurados para serem controlados através de filtros que selecionam o tipo de espécie, época do ano, e condições referente a massa vegetada tanto para seca ou encharcada. Além desses resultados, o trabalho também mostra um panorama sobre o tema nos últimos anos e destaca lacunas e deficiências de conhecimento como possíveis trabalhos futuros.

Por fim, confirmamos a hipótese que associando parâmetros botânicos com o método de modelagem algorítmico-paramétrica, é possível ter uma estimativa de crescimento e desenvolvimento da planta ao longo dos anos, assim como, ajudar a prever melhores geometrias para dispositivos verticais vegetados. O processo, aliado a estudos experimentais aumentou a confiabilidade e complexibilidade do modelo, tornando o processo mais eficaz para a representação e simulação destes sistemas. Além disso, o processo de modelagem utilizando a suíte de modelagem *Rhinoceros* e *Grasshopper* permitiu fazer configurações e estimativas simples que não seria possível em outros *software* computacionais de simulação. Os resultados dessa tese poderão servir como base e direcionamento para estudos que buscam resultados plausíveis com a simulação de fachada verde, facilitando assim, o processo de modelagem do sistema e aplicação correta dos parâmetros da fisiologia vegetal.

Palavras-chave: Sistemas vegetados. Fachadas com vegetação. Jardim vertical. Modelagem algorítmico-paramétrica. Simulação e modelagem de fachadas.

ABSTRACT

MELA, Débora, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2023. **Geometry for green facades with algorithmic-parametric modeling: studies with different climbing species.** Adviser: Andressa Carmo Pena Martinez. Co-adviser: Affonso Henrique Lima Zuin.

Currently there is no specific model for simulating the characteristics and physiological conditions of green façades. Generally, the modeling process used among researchers is to adapt green roof models, or create a surface using a more opaque material, to emulate the texture of leaves. Although these processes have contributed to some results, this method does not simulate the real physical and physiological conditions of a green facade, generating some flaws in the results. Therefore, this work aimed to develop a focused geometry to simulate the physical conditions of a green façade. The method used for this process was parametric algorithmic modeling, with the support of the field experiment to collect specific botanical parameters of different species suitable for green facades, and which served as input for modeling the system in a digital environment. In addition, we used the systematic literature review methodology to highlight and understand the vegetation modeling processes applied in the last ten years and possible adopted parameters. As a result, the work presents a specific geometry for the green facade, a library of parameters that served as input for the vegetation configuration, some options for its application in façades and a series of guidelines and recommendations for the correct application of the model. With this material, it is possible to configure the type of vegetation planting (pot or soil), simulate the plant growth conditions between the four seasons of the year (autumn, winter, spring and summer), estimate the general vegetation mass of a façade and present quantitative data to guide the construction of the system. All parameters used were collected in the field and configured to be controlled through filters that select the type of species, time of year, and conditions regarding the vegetated mass for both dry and wet. In addition to these results, the work also shows an overview of the subject in recent years and highlights gaps and deficiencies in knowledge as possible future work. Finally, we confirm the hypothesis that by associating botanical parameters with the algorithmic-parametric modeling method, it is possible to have an estimate of plant growth and development over the years, as well as helping to predict better geometries

for vegetated vertical devices. The process, combined with experimental studies, increased the reliability and complexity of the model, making the process more effective for the representation and simulation of these systems. In addition, the modeling process using the Rhinoceros and Grasshopper modeling suite allowed for simple configurations and estimates that would not be possible in other computational simulation software. The results of this thesis can serve as a basis and direction for studies that seek plausible results with the simulation of a green façade, thus facilitating the system modeling process and correct application of plant physiology parameters.

Keywords: Vegetated systems. Facades with vegetation. Vertical garden. Algorithmic-parametric modeling. Simulation and modeling of facades.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura da pesquisa e período de execução	23
Figura 2 - Fachada do Museu Quai Branly, criação de Patrick Blanc em 2004	28
Figura 3 - Tipologias de Jardins Verticais	29
Figura 4 - Ocorrência de palavras-chaves	31
Figura 5 - Tendência de estudos nos últimos anos	33
Figura 6 - Tendência de metodologia entre as pesquisas	36
Figura 7 - Diagrama Sankey associando temas e metodologias aplicadas no tema jardins verticais	44
Figura 8 - Processo de projeto com simulação paramétrica para fachada verde	48
Figura 9 - Teste de laboratório da fachada dupla com plantas.....	49
Figura 10 - Esquema de modelagem da parede viva	50
Figura 11 - Taxa de cobertura das folhas da espécie utilizada.....	52
Figura 12 -a) Cobertura foliar pelo software AutoCAD b) Cobertura foliar pelo software ImageJ	53
Figura 13 - Configurações com vegetação em fachada para simulação	54
Figura 14 - Localização e estrutura do mobiliário.....	56
Figura 15 - Processo de projeto com modelagem algorítmico-paramétrica para fachada verde	59
Figura 16 - Imagem binária no Grasshopper para gerar geometria de sombreamento	61
Figura 17 - Modelo 2D: crescimento da planta b) Modelo 3D: profundidade da planta.....	62
Figura 18 - Gráfico baseado em bitmap para organizar e mapear as plantas	63
Figura 19 - Processos de fabricação dos blocos: a) molde, b) concretagem, c) módulo desinformado e d) montagem da parede.	64
Figura 20 - Etapas metodológicas da pesquisa.....	84
Figura 21 - Localização geográfica do experimento em campo	86
Figura 22 – Setorização do experimento na UFV.....	87
Figura 23 - Setorização e entorno do experimento	88
Figura 24 - Localização das casas de vegetação no terreno.....	89
Figura 25 - Implantação e amarração dos protótipos no terreno	90
Figura 26 - Fixação e construção dos painéis	91
Figura 27 - Obstáculos encontrados e perfuração do solo	92

Figura 28 - Aplicação do arame para apoio das trepadeiras	93
Figura 29 - Plantio das mudas nos painéis	94
Figura 30 – Mudas selecionadas para análises	94
Figura 31 - Espécies escolhidas	96
Figura 32 - Propagação das espécies.....	97
Figura 33 - Esquema com imagens coletadas ao longo dos 12 meses.....	99
Figura 34 - Estrutura do protótipo com a locação das espécies no painel e representação da área de amostra de cada muda (amarelo para o vaso e laranja para o solo).....	100
Figura 35 - Conversão da imagem original em imagem binária utilizando a técnica “Threshold”. Da esquerda para a direita, imagens de mudas em vaso e solo transformadas em binárias.	101
Figura 36 - Marcação para medição da profundidade da camada vegetal no painel.....	102
Figura 37 - Marcação das mudas que foram selecionadas para extração da massa vegetada	103
Figura 38 - Procedimento de pesagem da folhagem, caules e flores	103
Figura 39 - Desenvolvimento entre as espécies plantadas no vaso e solo.....	111
Figura 40 – Grupo 1: Definição da cobertura vegetal de cada etapa.....	129
Figura 41 - Dimensões da superfície para a primeira etapa do código.....	130
Figura 42 - Sequência de imagens binárias no Grasshopper.....	131
Figura 43 - Zoom parcial da superfície subdividida para leitura dos pixels.....	131
Figura 44 - Expressão para estimar o percentual de cobertura foliar	132
Figura 45 - Calibração do percentual de cobertura foliar: Grasshopper e ImageJ.....	133
Figura 46 - Expressão para estimar a massa vegetada	133
Figura 47 - Definição completa para superfície plana	135
Figura 48 - Processo de criação da superfície Etapa 1	136
Figura 49 - Processo de mapeamento na superfície Etapa 2.....	137
Figura 50 - Resultado inicial da profundidade foliar	137
Figura 51 - Quantitativos da superfície simples.....	138
Figura 52 - Definição completa para superfície orgânica	139
Figura 53 - Definição da Etapa 1	139
Figura 54 - Processo de criação da superfície	140
Figura 55 - Etapa 2: Mapeamento da cobertura vegetal	141
Figura 56 - Quantificação dos dados Etapa 3	141

Figura 57 - Etapa 4: Ajuste de áreas.....	142
Figura 58 - Etapa 5 - Informações textuais	142
Figura 59 - Definição completa para superfície curva	143
Figura 60 - Etapa 1 – Criação da área limitante da superfície.....	144
Figura 61 – Resultado do processo de criação das malhas de suporte.....	144
Figura 62 – Variação da forma das malhas de suporte mudando a localização dos pontos e força aplicada	145
Figura 63 - Processo para criação da superfície em fitas.....	147
Figura 64 - Correção das arestas.....	147
Figura 65 - Processo para mapeamento da vegetação Etapa 5.....	148
Figura 66 - Profundidade e textura Etapa 6	148
Figura 67 – Área limite da fachada	149
Figura 68 - Etapa 8: Correção da área da fachada	150
Figura 69 - Etapa 9: Informações textuais do código	150
Figura 70 - Diagrama de fluxo de operações algorítmicas do código	152
Figura 71 - Volumetrias hipotéticas para representar tipos de superfícies	154
Figura 72 - Tipos de raízes	157
Figura 73 - Sistema axial da planta.....	158
Figura 74 - Tipos de crescimento do caule	158
Figura 75 - Cobertura foliar da Ipomeia	159
Figura 76 - Padrões de lâminas foliares.....	160
Figura 77 - Algumas sugestões de padrões de malhas para crescimento da planta	161
Figura 78 - Artigo publicado na revista Comunicata Scientiae em março de 2022	173
Figura 79 - Artigo publicado na revista Amgriabi em junho de 2022.....	174
Figura 80 - Artigo publicado nos anais do congresso internacional Sigradi em 2021	175
Figura 81 - Premiação pela Sigradi: Melhor apresentação de tese de doutorado no Woorkshop PhD	176
Figura 82 - Premiação e indicação para representar a Sigradi no mundial WOORLD CAAD 2021.	177
Figura 83 - Premiação mundial WOORLD CAAD 2021.....	178

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categoria temática A com os métodos aplicados.....	37
Quadro 2 - Categoria temática B com os métodos aplicados.....	38
Quadro 3 - Categoria temática C com os métodos aplicados.....	39
Quadro 4 - Categoria temática D com os métodos aplicados.....	39
Quadro 5 - Categoria temática E com os métodos aplicados.....	40
Quadro 6 - Categoria temática F com os métodos aplicados.....	44
Quadro 7 - Parâmetros da vegetação para entrada da simulação em cada sistema.....	68
Quadro 8 - Software utilizados para modelagem e simulação de jardins verticais.....	70
Quadro 9 - Imagens binárias com percentual de cobertura foliar das espécies.....	109
Quadro 10 - Fechamento foliar da espécie Tumbérgia azul.....	113
Quadro 11 -Fechamento foliar da espécie Ipomoea Cairica.....	114
Quadro 12 - Fechamento foliar da espécie Guaco.....	117
Quadro 13 - Fechamento foliar da espécie Congea.....	118
Quadro 14 - Fechamento foliar da espécie Feijão Borboleta.....	120
Quadro 15 - Profundidade foliar das espécies trepadeiras.....	124
Quadro 16 - Massa vegetal das espécies trepadeiras.....	125
Quadro 17 - Ficha botânica das espécies trepadeiras.....	127

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL.....	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	17
- Hipótese.....	18
- Pergunta da pesquisa.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO.....	19
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	21
1.5 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	21
1.6 ESTRUTURA DA TESE.....	22
REFERÊNCIAS.....	24
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1 JARDINS VERTICAIS NA ARQUITETURA.....	26
2.2 MÉTODO DA REVISÃO.....	30
2.2.1 Definição dos termos de busca.....	30
2.2.2 Base de dados.....	32
2.3 ESTADO DA ARTE (2012-2022)	34
2.4 SIMULAÇÃO PARAMÉTRICA DE ELEMENTOS VEGETADOS COM GEOMETRIA ASSOCIATIVA.....	47
2.3.1 Síntese metodológica	48
2.3.2 Modelagem numérica de elementos vegetados.....	56
2.5 MODELAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA DE ELEMENTOS VEGETADOS COM GEOMETRIA ASSOCIATIVA.....	58
2.4.1 Síntese metodológica.....	60
2.6 SÍNTESE GERAL.....	65
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS.....	74

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
3.1 ETAPAS METODOLÓGICAS.....	84
3.2 ETAPA 1 - REVISÃO DE LITERATURA.....	85
3.3 ETAPA 2 - ESTUDO EXPERIMENTAL EM CAMPO.....	85
3.3.1 Localização dos protótipos.....	86
3.3.2 Implantação e preparação dos protótipos no terreno.....	90
3.3.2.1 Escolha das espécies.....	95
3.3.3 Extração de dados empíricos.....	98
3.3.3.1 Cobertura foliar.....	98
a) <i>Aquisição das imagens</i>	98
b) <i>Processamento das imagens com o software ImageJ</i>	100
3.3.3.2 Profundidade foliar.....	102
3.3.3.3 Massa vegetada.....	102
3.4 ETAPA 3 - MODELAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA DA COBERTURA VEGETAL.....	104
3.4.1 Inserção dos parâmetros botânicos no <i>Grasshopper</i>	104
3.5 ETAPA 4 - DEFINIÇÃO DO CÓDIGO PARA APLICAÇÃO EM SUPERFÍCIES VERTICAIS.....	104
REFERÊNCIAS.....	106
CAPÍTULO 4 – DEFINIÇÃO E MODELAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA PARA FACHADA VERDE.....	108
4.1 BIBLIOTECA DE PARÂMETROS BOTÂNICOS PARA <i>INPUT</i> NO <i>GRASSHOPPER</i>.....	108
4.1.1 Cobertura vegetal.....	108
4.1.2 Desenvolvimento das espécies escolhidas.....	112
4.1.2.1 Análise comparativa entre as espécies.....	121
4.1.2.2 Conclusão.....	123
4.1.2 Profundidade foliar.....	124
4.1.3 Massa vegetada.....	125
4.1.4 Características botânicas de cada espécie.....	126

4.2 ORGANIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DO CÓDIGO PARA FACHADA VERDE.....	129
Grupo 1: Definição da cobertura vegetal.....	129
Grupo 2: Aplicação da cobertura vegetal em superfície plana.....	134
Grupo 3: Aplicação da cobertura foliar em superfície orgânica.....	138
Grupo 4: Aplicação da cobertura foliar em superfície curva.....	142
4.3 SÍNTESE DO CÓDIGO.....	151
4.4 RECOMENDAÇÕES E DIRETRIZES PARA POTENCIALIZAR A EFICÁCIA DO CÓDIGO.....	153
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO FINAL.....	162
5.1 INTRODUÇÃO.....	162
5.2 REVENDO OS OBJETIVOS.....	164
5.3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	167
5.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	169
5.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	171
5.6 DISSEMINAÇÃO DA PESQUISA.....	172
a) Trabalhos aceitos e publicados em periódicos.....	173
b) Premiações pela tese de doutorado.....	176
c) Trabalhos aguardando parecer de revisores e periódicos	178

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Neste capítulo apresentamos os itens introdutórios que ajudaram a delinear esta tese. Iniciamos com uma contextualização do problema, hipótese e objetivos do trabalho. Na sequência justificamos a relevância, ineditismo e originalidade do tema para a área de pesquisa. Também pontuamos os métodos adotados para cada capítulo, e os tópicos referentes a estrutura e organização geral do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Com a expansão das áreas urbanas, a quantidade de áreas verdes dentro das cidades tem reduzido e com isso trazido consequências negativas ao meio ambiente, conforto e saúde do ser humano. A fim de resolver esse problema, profissionais do ramo da construção civil têm investido em estratégias construtivas para recuperar a infraestrutura verde desses espaços. Entre essas estratégias, uma solução seria a integração da vegetação às superfícies, de uma forma passiva, podendo ser em coberturas ou fachadas.

No que diz respeito à vegetação em fachadas, seu uso é definido como jardim vertical, um sistema que engloba duas tipologias principais, conhecidas como fachada verde e parede viva. A principal diferença entre as duas está relacionada à complexidade construtiva e manutenção do sistema. Ao optarmos por utilizar esses sistemas aumentamos o índice de área foliar (IAF) por metro quadrado, neste caso, muito maior do que o alcançado com as coberturas verdes. Alguns dos benefícios que podemos alcançar com a sua implantação é: contribuir na melhoria do ar (MARCHI et al. 2015), reduzir reflexos luminosos nas ruas e no interior das edificações (HARPER et al. 2015), aumentar a biodiversidade local (MULLER et al. 2014; RILEY, 2015), absorver ruídos urbanos (DAVIS et al. 2017) e atenuar reflexões sonoras, proporcionar bem-estar ao ser humano (RILEY, 2015), assim como, reduzir temperaturas de superfícies construtivas (MATHEUS et al. 2016).

Entre as duas tipologias de jardins verticais, a fachada verde é caracterizada por espécies trepadeiras ou pendentes que podem crescer junto da fachada ou afastada e guiadas por algum suporte. Nessa opção, as mudas podem ser plantadas na base da estrutura diretamente no solo, ou em vasos intercalados em diferentes alturas da fachada. Esse tipo de fachada funciona como alternativa bioclimática, e seu aspecto funcional mais relevante para superfícies verticais está associado à sua capacidade de proporcionar sombra, atuando como dispositivo de controle solar na arquitetura.

No entanto, uma das principais limitações desse sistema enquanto elemento de controle solar, é o seu dinamismo por conta da transformação constante da vegetação com o passar do tempo. Cada espécie possui características distintas que irão influenciar na sua capacidade de sombreamento como, por exemplo, o maior ou menor grau de fechamento da folhagem, sua velocidade de crescimento, seu porte, ou a perda de folhas em determinadas estações do ano. Dessa forma, acredita-se que o uso de ferramentas paramétricas para modelagem pode ser uma grande aliada para simulação do comportamento da vegetação ainda em fase de projeto, onde os projetistas poderiam testar a espécie mais adequada para cada caso, e assim ter uma prévia de possíveis imprevistos durante o desenvolvimento da vegetação.

Portanto, a pesquisa pretende comprovar a seguinte **hipótese**: *O uso de parâmetros físicos da vegetação associados à modelagem algorítmico-paramétrica pode ajudar simular e estimar as melhores geometrias para dispositivos verticais vegetados a partir, do comportamento e desenvolvimento da vegetação.*

E a partir da hipótese apresentada, a pesquisa busca responder a seguinte questão: ***Como as condições físicas da vegetação podem ser associadas na modelagem algorítmico-paramétrica de um dispositivo vertical vegetado?***

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma geometria de fachada verde com modelagem algorítmico-paramétrica para simular condições físicas de diferentes tipos de espécies trepadeiras.

1.2.2 Objetivos específicos

- A. Identificar os parâmetros botânicos que podem ser utilizados na modelagem física da vegetação e os processos para a sua inclusão em *software* de modelagem algorítmico-paramétrica;
- B. Coletar parâmetros físicos das trepadeiras: *Congea tomentosa* var.; *Ipomoea cavanillesii* Roem; *Thunbergia grandiflora* var.; *Pandorea ricasoliana* K.Schum; *Bignonia ignea* Vell; *Mikania* sp.; *Clitoria ternatea*, e *Passiflora edulis* Sims;
- C. Inserir os dados botânicos extraídos na modelagem algorítmico-paramétrica;
- D. Estimar a massa vegetada da geometria resultante;
- E. Propor métricas e recomendações para a produção de fachadas verdes.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Desde que os jardins verticais foram definidos como uma estratégia arquitetônica passiva para edifícios e áreas urbanas, este despertou interesse científico na busca por validar sua eficácia, gerando discussões em várias temáticas, como: técnicas construtivas do sistema (PERINI; OTTELÉ, 2014; MEDL; STANGL; FLORINETH, 2017; SANTI et al. 2020), benefícios alcançados (PULSELLI et al. 2012; PARHIZKAR; KHORASKANI; TAHBAZ, 2020), avaliações sobre seu efeito térmico para redução de temperaturas (HUNTER et al. 2014; LARSEN; FILIPPÍN; LESINO, 2014; MUÑOZ et al. 2019; LESJAK; PAJE; KOŠIR, 2020), assim como estudos que tratam sobre o custo de implantação do sistema e economia após sua aplicação (PULSELLI et al. 2014; COLLINS; SCHAAFSSMA; HUDSON, 2017).

No entanto, embora esses estudos já tenham apresentado resultados plausíveis sobre os jardins verticais, ainda existem algumas lacunas a serem preenchidas referente a modelagem e simulação de jardins verticais de tipologia

fachada verde. Até o momento as pesquisas que adotaram tal método, como os estudos de Stav; Lawson, (2012), Larsen, Filippin e Lesino, (2015), Allan; Kim, (2016) e Arenghi, Perra e Caffi, (2021) têm se baseado em modelos adaptados para simular o comportamento desse sistema, tornando as análises mais restritas e hipotéticas, pois apesar de permitirem a configuração de algumas características da vegetação, esses modelos não são específicos para fachadas verdes. Além disso, esses se atêm apenas às análises do efeito térmico da planta, não permitem prever a transformação física da planta ao longo do seu desenvolvimento. Por esse motivo, a configuração da modelagem está direcionada apenas nas propriedades térmicas da vegetação.

Outra limitação comum, referente a esses sistemas é que o processo de parametrização da vegetação em ambientes digitais envolve uma grande quantidade de dados, sendo que nem sempre esses dados estão disponíveis para o projetista poder realizar suas análises. Portanto, para que pesquisas futuras possam progredir neste campo de modelagem e simulação, é importante ampliar e disponibilizar um banco de dados referente aos parâmetros da vegetação, principalmente, dados das condições físicas da planta como: tipo de crescimento, cobertura foliar, permanência de folhas e massa vegetada. E assim, disseminar a discussão em outras áreas de conhecimento referente às fachadas verdes, como prever questões estéticas e a durabilidade do sistema, analisar o tipo de estrutura necessária para apoio da vegetação, e avaliar o seu potencial para sombreamento.

Levando em conta as limitações citadas acima, acredita-se que o método experimental para observação e extração de dados empíricos da vegetação, torna-se uma etapa importante para estudos que buscam projetar fachadas verdes para simulação. Por isso, antes da modelagem, é preciso entender o comportamento da espécie adotada para o estudo, assim como, registrar seu desenvolvimento ao menos um ano, para avaliar sua adaptação em todas as estações climáticas.

Assim, acredita-se que o método de modelagem algorítmico-paramétrica associado aos métodos experimentais, pode ser um grande aliado para produzir geometrias verticais vegetadas mais precisas para fachadas verdes. Além disso, a modelagem desses sistemas é um campo que merece mais investigações, pois até o momento não existem precedentes e nem publicações relacionando a modelagem algorítmico-paramétrica para prever as condições do estado físico de fachadas verdes, reforçando a originalidade e ineditismo do trabalho.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Essa pesquisa apresenta um caráter multidisciplinar, pois envolve conhecimentos de duas áreas: Arquitetura e Botânica. Como ponto de partida e questionamento da problemática da pesquisa, definimos como objeto de estudo as fachadas verdes. Por se tratar de elementos vivos, a pesquisa vai abordar alguns conhecimentos botânicos, como a ecofisiologia vegetal, para melhor entendimento do desenvolvimento e necessidades das plantas. Assim, os dois campos de conhecimento serão abordados e interligados nesta pesquisa.

Como segundo plano, a pesquisa foca no uso de metodologias e processos de *design* computacional voltados para modelagem algorítmico-paramétrica de superfícies verticais vegetadas. A escolha do método de modelagem algorítmico-paramétrica deu-se pela possibilidade da criação de um processo totalmente integrado e interligado por meio do uso de parâmetros e variáveis, que permitem processos de exploração, geração, simulação e otimização de alternativas.

1.5 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para atingir os objetivos propostos e responder à pergunta desta pesquisa a metodologia seguiu alguns procedimentos com metodologias específicas para cada etapa:

- **Revisão de Literatura** para análise teórica dos assuntos mais relevantes ao tema, bem como verificação do estado da arte das pesquisas científicas sobre a modelagem algorítmico-paramétrica de jardins verticais nos últimos 10 anos. Esta etapa teve como principal intuito reforçar a relevância do tema, assim como identificar as lacunas do conhecimento e a contribuição desta pesquisa para o avanço científico da área;
- **Experimento em campo** para extrair parâmetros referente a cobertura foliar e a massa vegetada de algumas espécies trepadeiras aptas ao clima tropical de altitude do sudeste brasileiro. Os dados extraídos foram utilizados na modelagem algorítmico-paramétrica com a finalidade de definir um código que possibilite simular e analisar algumas características físicas da fachada verde ainda em fase de projeto;

- **Modelagem algorítmico-paramétrica** para definição do código do dispositivo vertical vegetado. Nesta etapa exploramos a programação visual em *Grasshopper*, os parâmetros que foram extraídos em campo, identificamos possíveis geometrias para a aplicação do sistema, e extraímos algumas informações quantitativas para sua construtibilidade;

Apresentamos com mais detalhes os procedimentos e materiais envolvidos em cada etapa no Capítulo 3.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

A redação desta tese será composta de cinco seções: (i) Introdução, (ii) Revisão de Literatura, (iii) Material e Métodos, (iv) Resultados e (vi) Conclusões.

Assim, a primeira seção da tese é composta pelo **Capítulo 1** onde apresentamos uma introdução geral do tema e contextualizamos sobre a problemática, a hipótese, os objetivos, justificativa e relevância, a delimitação do tema, e a metodologia adotada para a pesquisa. Ainda nesta seção explicamos a estrutura da pesquisa.

A segunda é composta pelo **Capítulo 2** onde apresentamos a revisão de literatura para o delineamento teórico e desenvolvimento desta tese. A revisão apresenta uma análise sistemática, referente ao tema nos últimos dez anos, e avalia como tem sido realizado o processo de modelagem algorítmico-paramétrica de jardins verticais em ambientes digitais.

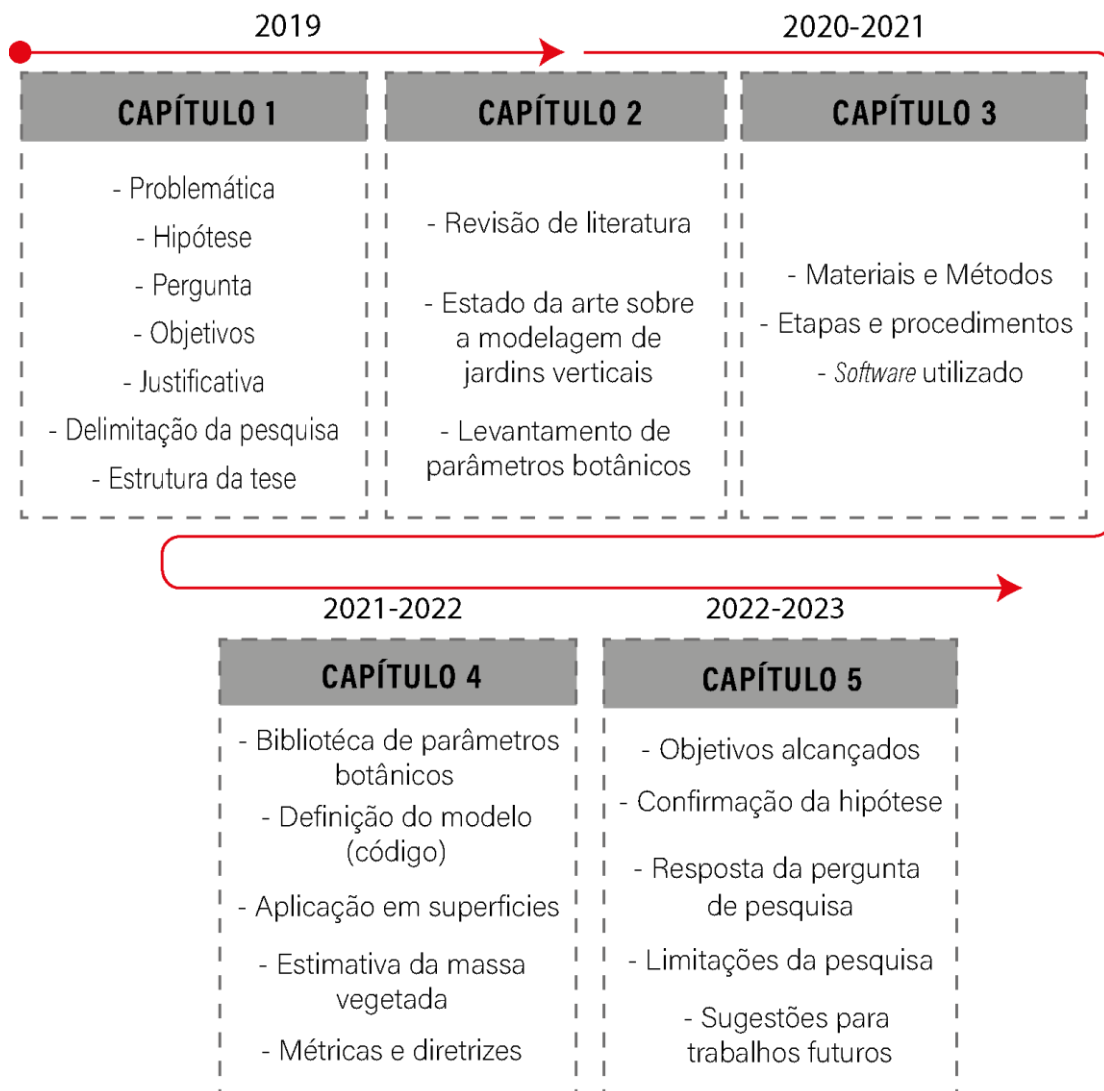
A terceira seção é composta pelo **Capítulo 3** que apresenta todos os procedimentos para a execução e coleta de dados do experimento realizado nesta pesquisa, bem como todos os parâmetros, *software* e *plugins* adotados para o processo computacional do código.

Na quarta seção, composta pelo **Capítulo 4** apresentamos os resultados da pesquisa, reunindo toda a biblioteca de parâmetros botânicos referente a 5 espécies de trepadeiras, o processo de validação do modelo, a definição completa do código aplicado em algumas soluções de projeto, e as principais diretrizes para o projeto de fachadas verdes. Para complementar os resultados extraídos em campo, adicionamos um relatório sobre o desenvolvimento de cada espécie e possíveis recomendações para o cuidado da planta.

A última seção apresenta o **Capítulo 5** contendo a conclusão geral e contribuições mais relevantes identificadas por esta tese, com vistas ao atendimento dos objetivos e também a confirmação da hipótese de pesquisa. Nesta seção também respondemos à pergunta de pesquisa e apresentamos algumas sugestões para trabalhos futuros, podendo complementar ou aprofundar este campo de conhecimento. E por fim, apresentamos a disseminação da pesquisa.

Na Figura 1, apresentamos esquematicamente essa estrutura e o período para desenvolvimento de cada capítulo da pesquisa.

Figura 1 - Estrutura da pesquisa e período de execução



Fonte: Os autores, 2023.

REFERÊNCIAS

- ALLAN, S. S. T.; KIM, H.-I. A Study of Workflow for Simulations of Vertical Greenery Systems. **Architecture Research**, v. 6, n. 6, p. 142–153, 2016.
- ARENGHI, A.; PERRA, C.; CAFFI, M. Simulating and comparing different vertical greenery systems grouped into categories using energyplus. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 11, p. 16, 2021.
- COLLINS, R.; SCHAAFSMA, M.; HUDSON, M. D. The value of green walls to urban biodiversity. **Land Use Policy**, v. 64, p. 114–123, 2017.
- DAVIS, M. J. M.; RAMIREZ, F.; PÉREZ, M. E. More than just a Green Façade: Vertical Gardens as Active Air Conditioning Units. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 1250–1257, 2017.
- HARPER, G. E., LIMMER, M. A., SHOWALTER, W. E., BURKEN, J. G. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. **Ecological Engineering**, The 13th Annual Conference of the American Ecological Engineering Society: Ecological Engineering and the Dawn of the 21st Century. v. 78, p. 127–133, 2015.
- HUNTER, A. M.; WILLIAMS, N. S.G., RAYNER, J. P., AYE, L., HES, D., LIVESLEY, S. J. Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. **Ecological Engineering**, v. 63, p. 102–113, 2014.
- LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. **Solar Energy**, v. 121, p. 56–67, 2015.
- LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. Thermal simulation of a double skin façade with plants. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1763–1772, 2014.
- LESJAK, V.; PAJEK, L.; KOŠIR, M. Indirect green façade as an overheating prevention measure. **Gradjevinar**, v. 72, n. 7, p. 569–583, 2020.
- MARCHI, M., PULSELLI, R. M., MARCHETTINI, N., PULSELLI, F. M., BASTIANONI, S. Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. **Ecological Modelling**, v. 306, p. 46-56, 2015.
- MATHEUS, C., CAETANO, F. D. N., MORELLI, D. D. D. O., LABAKI, L. C. Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 71–81, 2016.
- MEDL, A.; STANGL, R.; FLORINETH, F. Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. **Building and Environment**, v. 125, p. 227–239, 2017.
- MULLER, J. N., LOH, S., BRAGGION, L., CAMERON, S., FIRN, J. L. Diverse urban plantings managed with sufficient resource availability can increase plant productivity and arthropod diversity. **Functional Plant Ecology**, v. 5, p. 517, 2014.
- MUÑOZ, L. S.; CRUCIOL BARBOSA, M. C.; FONTES, M. S. G. DE C.; FARIA, J. R. G. DE. Desempenho térmico de jardins verticais de tipologia fachada verde. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, v. 10, p. 1–20, 2019.
- PARHIZKAR, H.; KHORASKANI, R. A.; TAHBAZ, M. Double skin façade with Azolla; ventilation, Indoor Air Quality and Thermal Performance Assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119313, 2020.
- PERINI, K.; OTTELÉ, M. Designing green façades and living wall systems for sustainable constructions. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, v. 9, n. 1, p. 31–

46, 2014.

PULSELLI, R. M.; PATRIZI, N.; PULSELLI, F. M.; BASTIANONI, S. A sustainability evaluation of vertical greenery systems based on energy. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 165, p. 229–238, 2012.

PULSELLI, R. M.; PULSELLI, F. M.; MAZZALI, U.; PERON, F.; BASTIANONI, S. Emergy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems. **Energy and Buildings**, v. 73, p. 200–211, 2014.

RILEY, B. The state of the art of living walls: Lessons learned. **Building and Environment**, v. 114, p. 219–232, 2017.

STAV, Y.; LAWSON, G. Vertical vegetation design decisions and their impact on energy consumption in subtropical cities. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 155, p. 489–500, 2012.

VIÇOSA, UFV. **Normas gerais de Teses e Dissertações**. UFV. Disponível em: <https://www.ppg.ufv.br/?page_id=159>. Acesso em: 12/8/2021.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo apresentamos o embasamento teórico para o delineamento e desenvolvimento desta tese. O capítulo introduz os sistemas de jardins verticais e apresenta uma revisão sistemática do estado da arte referente à modelagem e simulação paramétrica desses sistemas nos últimos dez anos. Como resultado a revisão apresenta os principais parâmetros e software que são necessários para a modelagem e simulação dos sistemas com vegetação, assim como, aborda novos insights para futuras pesquisas.

2.1 JARDINS VERTICAIS NA ARQUITETURA

O crescimento populacional e o aumento da urbanização têm reduzido a quantidade de áreas verdes dentro das cidades e, com isso, trazido consequências negativas à saúde e ao conforto humano. Algumas das estratégias para aliviar essas influências negativas é recuperar a infraestrutura de vegetação urbana, incluindo nesses espaços, árvores, parques, telhados com coberturas verdes e jardins verticais. No entanto, em algumas áreas urbanas de alta densidade, não há espaço suficiente para uma cobertura terrestre, por isso os jardins verticais têm ganhado destaque e têm sido propostos como alternativa, pois além de não interferir na ocupação do espaço permitem uma área de cobertura muito maior que as outras estratégias.

Os jardins verticais podem ser definidos por aqueles onde a vegetação cresce e se desenvolve em superfícies verticais. Ou então como sistemas onde a vegetação cresce junto às paredes das construções ou suportes independentes, adjacentes ou fixo as paredes (LOH, 2008; MANSO; CASTRO-GOMES). O emprego desses sistemas historicamente em fachadas, tem origem datada do século III a. C. na região do Mediterrâneo, e eram caracterizados pelo cultivo de videiras em treliças apoiadas nas paredes (SHARP et al. 2008).

De acordo com Köhler (2008) essa tradição antiga de usar a vegetação como cobertura em fachadas seguiu presente em alguns países da Europa até o início do século XIX apenas por interesses botânicos. Seu uso em fachadas como elemento funcional e de composição arquitetônica só ficou marcada no início do século XX a partir do movimento *Art Nouveau* “alemão” *Jugendstil*, arte decorativa na época (SCHERER, 2014). Nesse período, cidades como Berlim e Munique, por exemplo, os moradores passaram a utilizar a vegetação como revestimento em substituição aos acabamentos tradicionais externos das alvenarias.

Outro movimento importante, chamado cidade-jardim que surgiu no final do século XIX na Inglaterra e Estados Unidos também impulsionou o uso desses sistemas na composição arquitetônica, tendo intenção de promover a implementação de espécies trepadeiras em fachadas, pergolados e sistemas entrelaçados (telas de apoio) para integrar a casa ao jardim externo.

Ainda no século XX o paisagista Roberto Burle Marx seria o primeiro a colocar em prática a técnica do jardim vertical no Brasil, projetando o jardim do Banco Safra em diferentes níveis de canteiros onde inseriu diferentes espécies tropicais. Foi com essa obra que o paisagista abriu caminho também para o uso dos jardins verticais em contextos urbanos (LEENHARDT; LAMBERTINI, 2007; SCHERER, 2014).

Tratando-se do contexto atual, o francês e especialista em botânica, Patrick Blanc, destaca-se nas criações de jardins verticais em edificações. Foi através de uma de suas criações projetuais que surgiu outra forma para inserir elementos vegetais nos edifícios, definido por ele como *mur végétalisée* (parede vegetada). Em sua técnica um painel de substrato contendo nutrientes e água era aplicado diretamente sobre as paredes, ampliando a possibilidade de plantio da espécie, além do solo (MANSO; CASTRO-GOMES, 2015). Seu conceito difundiu-se e passou a ser empregado em vários edifícios como o Museu Quai Branly em Paris, no início do século XXI (Figura 2).

E desde então esses sistemas vêm evoluindo tecnologicamente pelo tipo de construção, manutenção e estrutura (MATHEUS et al. 2016; BRISCOE, 2018; WANG et al. 2020), se popularizando ao redor do mundo (COSTA, 2011) e mudando a forma de revestir extensas áreas verticais. O uso desses sistemas em fachadas atualmente é considerado uma técnica com princípios sustentáveis, e cada vez mais incentivo e

movimentos em nível internacional que tratam deste assunto vêm sendo estudados (SCHERER, 2014).

Figura 2 - Fachada do Museu Quai Branly, criação de Patrick Blanc em 2004



Fonte: Scherer e Fedrizzi (2016).

Ao falarmos de jardins verticais, existe uma grande variedade no vocabulário utilizado para referenciar a cobertura de fachadas e que deve ser esclarecido. Segundo Cruciol Barbosa e Fontes (2016, p. 115) o que define um sistema como jardim vertical é a forma que a vegetação será plantada no solo ou em jardineiras, para crescer e se desenvolver ao longo das paredes ou estrutura.

Na literatura essa nomenclatura varia entre os autores como: jardins verticais, fachadas verdes, paredes verdes, paredes vivas, *biowall* (KONTOLEON; EUMORFOPOULOU, 2010; PERINI et al. 2011; PÉREZ et al. 2011; SAFIKHANI et al. 2014; MANSO; CASTRO-GOMES, 2015; MEDL; STANGL; FLORINETH, 2017; YANG et al. 2018). Dentro dessa nomenclatura, alguns são termos gerais que abrangem diferentes modelos e outros são referentes a tipologias com características específicas de construção (PÉREZ et al. 2011; MANSO; CASTRO-GOMES, 2015). Portanto, para fins de esclarecimento, neste trabalho usaremos a terminologia “jardim vertical”, referenciada por Cruciol Barbosa e Fontes (2016) e Medl, Stangl e Florineth (2017), que é dividida em duas tipologias principais: fachada verde e parede viva. A diferença entre elas está baseada em sua forma construtiva e o tipo de vegetação utilizada:

- A **fachada verde**, que pode ser separada em duas tipologias, é composta por espécies trepadeiras que crescem diretamente na fachada, que constitui a fachada verde direta (Figura 3a), ou que se desenvolvem guiadas por estruturas treliçadas de diferentes materiais, sendo denominada de fachada

verde indireta (Figura 3b). Em ambas as opções as mudas podem ser plantadas diretamente no solo, na base da edificação, ou em vasos intercalados em diferentes alturas ao longo da fachada (Figura 3c). Uma característica importante dessa tipologia, é a liberdade para direcionar o crescimento da folhagem da planta de acordo com o suporte escolhido, o que possibilita a personalização do sistema e do *layout* da fachada do edifício.

- A **parede viva**, refere-se à vegetação cultivada em caixas de plantio através de sistemas modulares fixados em paredes, que contam com irrigação automática e são independentes do enraizamento ao nível do solo. Esses sistemas podem ser aplicados com bandejas ou sistemas de feltro verticais ou horizontais (Figura 3d, 3e, 3f).

Figura 3 - Tipologias de Jardins Verticais



a) Fachada verde direta b) Fachada verde indireta c) Fachada verde indireta com vasos intercalados d) Exemplo de sistema com painel de substrato e) Parede viva com caixa de plantio f) Exemplo de sistema de feltro horizontal.

Fonte: Os autores, 2023.

Por ser um sistema que oferece muitos benefícios ambientais e socioeconômicos como: a diminuição dos efeitos das ilhas de calor urbanas (AFSHARI, 2017), melhoria do desempenho térmico e economia energética da edificação (COMA et al. 2017; ARENGHI; PERRA; CAFFI, 2021) o interesse em pesquisas voltadas para esse tema teve um grande avanço nas duas últimas décadas.

Esses avanços envolvem pesquisas de várias temáticas com metodologias e profissionais de campos e conhecimentos diferentes, fazendo com que esses estudos tenham uma relação e caráter interdisciplinar.

Entre essas pesquisas, os processos computacionais passaram a ser utilizado para ajudar a entender alguns efeitos térmicos da vegetação através de análises ainda em fase de projeto, antes de sua aplicação no edifício. No entanto, apesar da simulação permitir analisar o desempenho térmico do sistema, os *software* ainda não permitem representar e avaliar o desenvolvimento desses elementos vivos a longo prazo devido ao dinamismo e transformação constante do estado físico da planta.

Por isso, para que as simulações possam ser realizadas com mais precisão, existe a necessidade de observação e experimentação, a fim de identificar os traços físicos e fisiológicos que irão afetar a capacidade de cobertura e crescimento da planta. Diante disto, esta revisão teve como propósito responder a seguinte questão: *como representar dados botânicos da fisiologia vegetal em softwares de modelagem paramétrica para simular o desenvolvimento e comportamento da vegetação a longo prazo?*

2.2 MÉTODO DA REVISÃO

Para responder essa questão e cumprir o **objetivo A**, iniciamos a pesquisa aplicando uma metodologia de revisão sistemática originária das ciências da saúde e sociais (BOOTH, 2012 e GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2017). Utilizamos essa metodologia para apresentar o estado da arte do tema, assim como, para poder filtrar com mais precisão as informações desejadas. Esse tipo de revisão oferece mais transparência da metodologia e permite a reprodutibilidade para futuras revisões. Portanto, adotamos um protocolo rigoroso (BRERETON et al. 2007) passando por um processo de cinco fases: definição dos termos de busca, definição das bases de dados, triagem com critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, levantamento dos artigos relevantes e filtragem final para o número de artigos incluídos na revisão.

2.2.1 Definição dos termos de busca

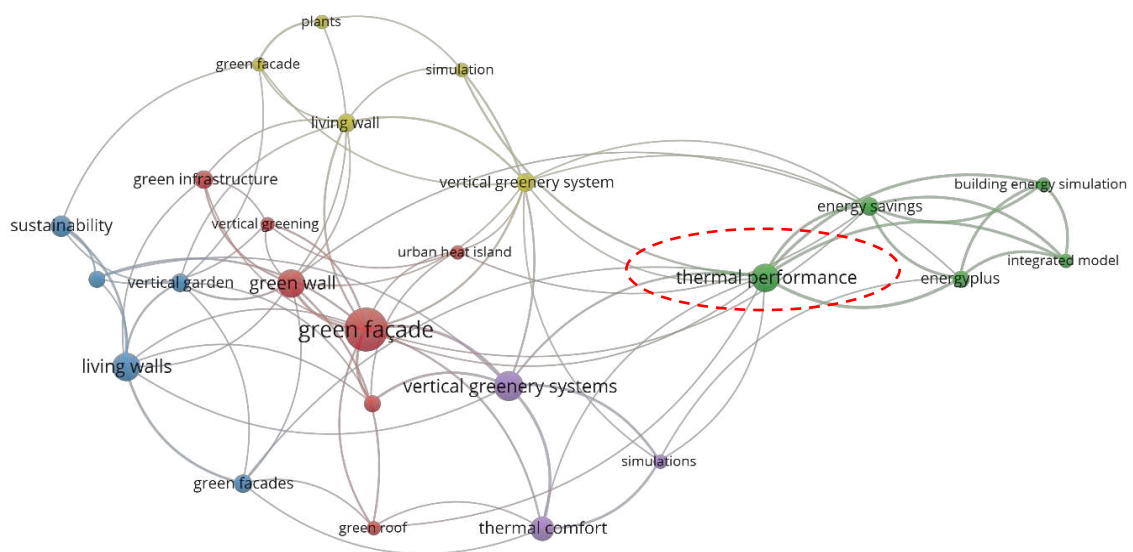
Os termos de busca foram definidos inicialmente com base nas referências bibliográficas utilizadas para o embasamento teórico desta pesquisa. Portanto, para focar no sistema vegetado, termos como “Jardins verticais”, “Fachada verde” e

“Parede viva” foram utilizados e combinados com os termos relacionados ao *design* computacional como, “Modelagem”, “Modelagem algorítmico-paramétrica”, “Simulação computacional”, “Modelagem numérica”, “Desempenho e otimização paramétrica”. E então, a partir desses termos foi definido a *string* de busca em inglês: (“*Green Facades*” OR “*Vertical Garden*” OR “*Living wall*” AND “*Modeling*” OR “*Algorithmic Parametric Modeling*” OR “*Computer Simulation*” OR “*Numerical Model*” OR “*Performance*” OR “*Parametric optimization*”).

Vale ressaltar, que esses termos de busca foram definidos para atingir o maior alcance de estudos relacionados ao objetivo desta pesquisa. Por isso, embora o “desempenho” térmico e energético de sistemas vegetados não seja o foco desta revisão, foi necessário incluir esse termo na *string* de busca, uma vez que este está relacionado com a categoria que mais publica dentro do tema de jardins verticais. Para confirmar isso, uma análise bibliométrica feita no *VOSviewer* versão 1.6 utilizando os artigos selecionados, foi realizada para ressaltar os termos de busca que tem maior ocorrência em pesquisas de jardins verticais nos últimos dez anos.

Para um maior entendimento da imagem, as cores representam o grupo de conjunto de palavras que geralmente aparecem juntas em publicações científicas, e quanto ao tamanho dos círculos, esses representam os termos que mais estão sendo utilizados nas pesquisas (Figura 4).

Figura 4 - Ocorrência de palavras-chaves



Fonte: Os autores, 2023.

Como podemos ver na análise bibliométrica, o termo “*Thermal performance*” traduzido como desempenho térmico, aparece vinculado às pesquisas de simulação

térmica e energética desses elementos aplicados no edifício. Por isso, sua inclusão foi fundamental para encontrar mais pesquisas que estão utilizando o processo de modelagem e simulação paramétrica na vegetação.

2.2.2 Base de dados

As bases de dados *Scopus (Elsevier)* e *Web of Science* disponíveis através do Portal de periódicos CAPES e a base de dados ACM Digital Library foram utilizadas. Para encontrar pesquisas brasileiras, os termos em português equivalentes aos da *string* de busca em inglês foram buscados na base Scielo. No entanto, devido ao número muito reduzido de artigos, essa base foi desconsiderada.

Posteriormente a revisão foi ampliada através da base de dados *CumInCAD (Cumulative Index in Computer-Aided Architectural Design)*, que reúne publicações de congressos na área do *design* computacional, como *ACADIA*, *ASCAAD*, *CAADRIA*, *eCAADe*, *SiGraDi*, *CAAD Futures* e *IASS*.

Além de congressos, também foram considerados periódicos de relevância internacional na área: *Architectural Design*, *Frontiers of Architectural Research*, *Design Studies*, *Architectural Science Review* e *Computer-Aided Design*, e algumas revistas de arquitetura paisagística como: *Journal of Digital Landscape Architecture*, *Journal of Landscape Architecture*, *Landscape Journal*, and *Landscape Research Record*.

De forma complementar, procurando constatar o nível de estudo sobre o assunto no Brasil, escolheu-se a base de dados de teses da USP e o catálogo de teses Capes para identificar possíveis amostras do tema estudado no ambiente acadêmico brasileiro.

Para o levantamento do material foram estabelecidos os seguintes critérios de inclusão e exclusão:

- 1. Assunto de interesse:** Pesquisas que abordam a metodologia de modelagem e simulação paramétrica de jardins verticais;
- 2. Tipo de referência:** Artigos completos, aceitos e revisados por pares;
- 3. Tipo de acesso:** Estudos disponíveis gratuitamente em PDF em base de dados: (1) Bases (1) Scopus (Elsevier), (2) Web of Science, ambas disponíveis no Portal de periódico CAPES, (3) CumInCAD e (4) Biblioteca Digital Brasileira de Dissertações e Teses (IBICT);

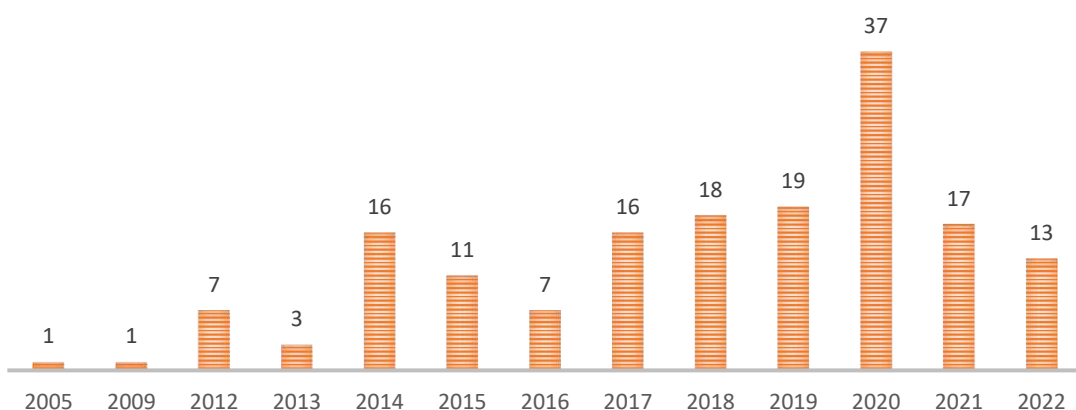
4. Idioma: Idiomas dominados pelos autores da pesquisa: Português, Inglês e Espanhol;

5. Ano: Últimos 10 anos (2012-2022).

A pesquisa inicialmente reuniu 1059 publicações, sendo 515 encontrados na base de dados *Web of Science*, 489 na *Scopus (Elsevier)*, 47 no *CumInCAD* e 8 Teses e Dissertações. Esse material passou por um processo de filtragem dividida em 3 etapas: Na primeira etapa foram excluídos por títulos as publicações repetidas usando o gerenciador bibliográfico Mendeley, resultando em 621 artigos; Na segunda filtragem foi realizada à análise dos títulos que se alinhavam com o tema, permanecendo 338 artigos; Na terceira filtragem foi realizada uma leitura exploratória e análise dos resumos e palavras-chaves com o objetivo de verificar a qualidade e estrutura metodológica da pesquisa, permanecendo **162 artigos**. Após todas essas etapas, os artigos foram lidos integralmente para fazer o levantamento dos dados e análises quali-quantitativas.

É importante ressaltar, que no filtro “Ano” antes de restringir a análise para os últimos dez anos, o total de 162 artigos foram classificados por ano de publicação, conforme a Figura 5. Analisando essa classificação foi constatada a existência de mais 2 artigos de simulação, evidenciando a atualidade do tema nesta metodologia, com resultados não anteriores ao ano de 2005 e atingindo o seu auge no ano de 2020.

Figura 5 - Tendência de estudos nos últimos anos



Fonte: Os autores, 2023.

Para as análises quantitativas, os estudos selecionados foram organizados em planilhas no software Excel para quantificar e identificar as principais características, lacunas de conhecimento e tendências de pesquisas. Quanto aos resultados qualitativos, o conteúdo foi separado em duas etapas específicas para ajudar a

responder o objetivo deste estudo. Portanto, na **1ª Etapa** apresentamos um panorama geral do avanço das pesquisas sobre os jardins verticais e suas principais tendências de estudo nos últimos dez anos. Na **2ª Etapa** discutimos os principais métodos utilizados na literatura para associar parâmetros botânicos na modelagem 3D e simulação com *software* paramétricos. E por fim, o trabalho é concluído com uma síntese geral pontuando os principais achados, lacunas e limitações para modelagem de jardins verticais.

2.3 ESTADO DA ARTE (2012-2022)

Entre os 162 trabalhos avaliados nesta revisão, sessenta e oito (42%) usaram a tipologia “fachada verde”, cinquenta e nove (36%) estudaram “parede viva”, e trinta e cinco analisaram as duas tipologias simultaneamente (22%). A maior ocorrência por estudos sobre parede viva justifica-se pela possibilidade de aplicação de espécies adultas, agilizando o crescimento e facilitando pesquisas que não podem ser desenvolvidas a longo prazo. Mesmo assim, estudos com fachada verde ganham destaque por ser um sistema simples de executar, de fácil manutenção e investimento baixo.

Com relação à localidade das pesquisas, a Europa aparece à frente das pesquisas, totalizando a maior parcela das publicações com 53%. Na sequência, a Ásia aparece com 28%, a América do Sul com 7%, América do Norte com 6%, e Oceania com 6%. Entre os estudos europeus, a Itália concentra o maior percentual dos estudos (17%), a Espanha (9%), a Alemanha (5%) e o Reino Unido (2%). Na Ásia a maior concentração dos estudos ocorreu na China (9%) em grandes cidades como Shanghai e Hong Kong. Na América do Sul os estudos estão distribuídos entre Argentina e Brasil. Na América do Norte, as pesquisas estão em maior parte nos Estados Unidos e México. E na Oceania os estudos estão concentrados na Austrália. Pela classificação climática de Köppen-Geiger, a maioria dos estudos foram conduzidos na zona temperada (Grupo C), seguida pela Zona Árida (Grupo B), Tropical (Grupo A) e fria (Grupo E).

Durante o processo de revisão dos 162 artigos selecionados, várias categorias de pesquisas dentro do tema “jardins verticais” foram identificadas e, portanto, organizadas para guiar essa revisão e ajudar a entender a sua correlação entre a metodologia aplicada em cada estudo. Assim, as categorias temáticas identificadas dentro do tema jardins verticais foram organizados da seguinte forma:

A – Estado da Arte na literatura: estudos de revisão que reúnem todo compilado teórico sobre o tema jardins verticais desde o início da aplicação da técnica na arquitetura.

B - Impacto Social e Econômico: nessa categoria os estudos encontrados focam em como esses sistemas têm atingido positivamente o ambiente urbano frente a sustentabilidade, biodiversidade e o ciclo de vida do sistema, como também, apresenta os benefícios sociais do sistema vertical vegetado para a sociedade. A metodologia aplicada varia entre os estudos.

C - Técnicas Construtivas: estudos que apresentam as características e diretrizes para a correta aplicação e execução do sistema de jardins verticais para cada tipo de fachada. A metodologia aplicada também é variada.

D - Sobrevivência das espécies: estudos que analisam questões sobre a adaptação vegetal da espécie para determinado tipo de exposição solar.

E - Análises de conforto: esses estudos focam na aplicabilidade de jardins verticais em fachadas de edifícios para avaliar suas condições térmicas, energéticas, luminosas, acústicas e a qualidade do ar. A metodologia também é variada entre os estudos.

F - Modelagem e simulação: estudos direcionados na modelagem e simulação do sistema em ambientes digitais.

Analisando inicialmente essas categorias, notou-se que mais da metade dos estudos selecionados estão focando na análise de desempenho térmico do jardim vertical para o edifício e área urbana. Além disso, confirmou-se que não há registros de pesquisas que estudam a modelagem e simulação do crescimento e adaptação da vegetação ainda em fase projetual. No entanto, ressaltou-se uma lacuna na literatura para pesquisas que abordem outras temáticas como:

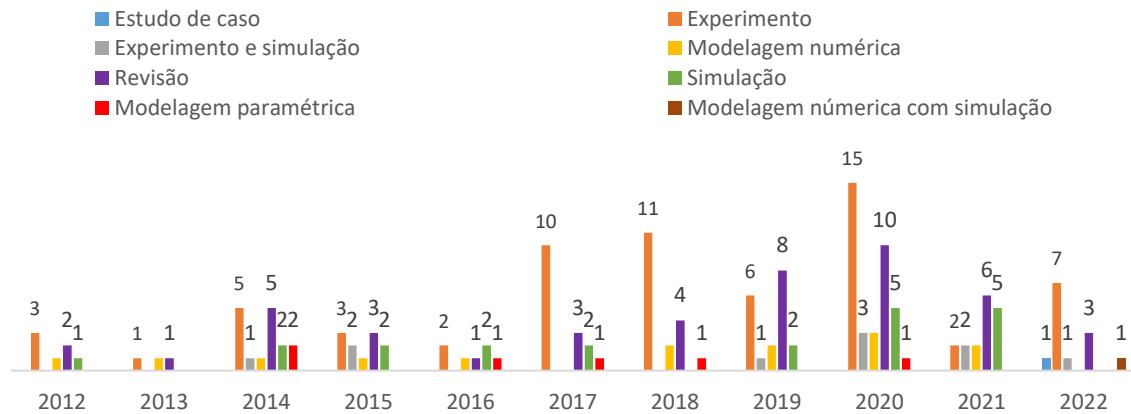
- Análises estruturais para prever a massa da folhagem e auxiliar no dimensionamento e construção de suportes/estruturas para apoiar as plantas;
- Análises com espécies variadas para a previsão da cobertura foliar a longo prazo;
- Formas de plantio e soluções preventivas para a sobrevivência e manutenção das plantas.

Diante dessa variedade temática encontrada, os métodos utilizados também são muito variados. Geralmente, os autores se apoiam em mais de uma metodologia

para atingir seus objetivos, e por conta disso muitas vezes profissionais de campos distintos, como arquitetos, biólogos, agrônomos, paisagistas e ecologistas, são envolvidos em uma única pesquisa em uma abordagem integrativa e interdisciplinar.

Depois de identificar as categorias temáticas, foram organizados os métodos aplicados nesses estudos (Figura 6), como: Revisão, Estudo de caso, Experimento em campo, Experimento associado com simulação, Modelagem numérica, Modelagem numérica associada com simulação, Modelagem paramétrica e Simulação. No gráfico é possível notar que o interesse por pesquisas nessa área tem crescido nos últimos cinco anos, e que o método mais aplicado entre os autores é o experimento em campo.

Figura 6 - Tendência de metodologia entre as pesquisas



Fonte: Os autores, 2022.

Os quadros a seguir sintetizam esses estudos de acordo com os temas e métodos utilizados, e apontam os autores que têm relação com mais de uma metodologia em suas pesquisas. E na sequência, o Diagrama de *Sankey* (Figura 7) resume de forma visual como esses temas e metodologias estão correlacionadas no tema de jardins verticais nos últimos 10 anos.

Para melhor compreensão dos quadros, a legenda a seguir deve ser considerada para todos os quadros.

Legenda para interpretação dos Quadros:

Temas:

A	Estado da Arte na literatura
D	Sobrevivência das espécies

B	Impacto Social e Econômico
E	Análise de conforto

C	Técnicas Construtivas
F	Modelagem e simulação

Métodos:

EX	Experimento
EX/S	Experimento com simulação
EC	Estudo de caso

M/S	Modelagem e simulação
MP	Modelagem paramétrica
S	Simulação

R	Revisão
MN	Modelagem numérica
MN/S	Modelagem numérica com simulação

Tipologia de sistema:

PV Parede viva

FV Fachada verde

JV Jardim vertical

No Quadro 1 reunimos todos os estudos que estão discutindo teoricamente o Estado da Arte do tema jardins verticais. Nessa categoria os estudos apresentam suas principais evidências e conclusões frente a evolução do sistema nas duas últimas décadas, e ressaltam as lacunas de conhecimento para aprofundamento do tema.

Quadro 1 - Categoria temática A com os métodos aplicados

Tema	Método									Autores	CD.
	EX	EX/S	EC	M/S	MP	S	R	MN	MN/S		
A							JV			Perini, K.; Ottelé, M. (2012)	01
							PV			Riley, B. (2017)	02
							JV			Bustami, R. A.; Belusko, M.; Ward, J.; Beecham, S. (2018)	03
							PV			Ascione, F.; De Masi, R. F.; Mastellone, M.; Ruggiero, S.; Vanoli, G. P. (2020)	04
							JV			Čekić, S.; Trkulja, T.; Došenović, L. (2020)	05
							JV			Palermo, S. A.; Turco, M. (2020)	06

Fonte: Os autores, 2023.

No Quadro 2, temos os estudos relacionados com o impacto social e econômico utilizando a vegetação como elemento arquitetônico. Nesta categoria, encontramos pesquisas que aplicaram técnicas investigativas com questionários, entrevistas e avaliação pós ocupação dos ambientes com jardins verticais. Os estudos apresentaram um compilado de informações sobre a contribuição da biodiversidade local, benefícios alcançados para a população e o meio ambiente, e também algumas análises positivas para o investimento na aquisição desse sistema.

Quadro 2 - Categoria temática B com os métodos aplicados

Tema	Método									Autores	CD.	
	EX	EX/S	EC	M/S	MP	S	R	MN	MN/S			
B							JV			Pulselli, R. M.; Saladini, F.; Neri, E.; Bastianoni, S. (2014)	07	
	FV									Magliocco, A.; Perini, K. (2015)	08	
	PV									Collins, R.; Schaafsma, M.; Hudson, M. D. (2017)	09	
	FV									Kim, H.-H.; Yeo, I.-Y.; Lee, J.-Y. (2020)	10	
	FV									Lotfi, Y. A.; Refaat, M.; El A. M.; Abdel S. A. (2020)	11	
							JV				Leong, B. T.; Yeap, P. S.; Ang, F. L. (2021)	12
							JV				Pulselli, R. M.; Patrizi, N.; Pulselli, F. M.; Bastianoni, S. (2012)	13
							JV				Ghazalli, A. J.; Brack, C.; Bai, X.; Said, I. (2019)	14
							JV				Radić, M.; Dodig, M. B.; Auer, T. (2019)	15
							PV				Iligan, R.; Irga, P. (2021)	16
							PV				Maier, D. (2022)	17
								PV			Mazzali, U.; Peron, F.; Scarpa, M. (2012)	18
	PV										Veisten, K.; Smyrnova, Y.; Klæboe, R.; Hornikx, M.; Mosslemi, M.; Kang, J. (2012)	19
							JV				Perini, K.; Ottelé, M.; Haas, E. M.; Raiteri, R. (2013)	20
		PV									Djedjig, R.; Bozonnet, E.; Belarbi, R. (2015)	21
		PV									Jänicke, B.; Meier, F.; Hoelscher, M.-T.; Scherer, D. (2015)	22
							PV				Malys, L.; Musy, M.; Inard, C. (2016)	23
							FV				Afshari, A. (2017)	24
	FV										Tiwary, A.; Godsmark, K.; Smethurst, J. (2018)	25
							PV				Li, J.; Zheng, B.; Shen, W.; Xiang, Y.; Chen, X.; Qi, Z. (2019)	26
							JV				Well, F.; Ludwig, F. (2019)	27
	FV										Châfer, M.; Pisello, A. L.; Piselli, C.; Cabeza, L. F. (2020)	28
		PV									Peng, L. L. H.; Jiang, Z.; Yang, X.; He, Y.; Xu, T.; Chen, S. S. (2020)	29
		PV									Bandurski, K.; Bandurska, H.; Kazimierzczak-Grygiel, E.; Koczyk, H. (2020)	30
								PV			Pirouz, B.; Turco, M.; Palermo, S. A. (2020)	31
								PV			Perera, T.A.N.T.; Jayasinghe, G. Y.; Halwatura, R. U.; Rupasinghe, H. T. (2021)	32
								JV			Madre, F.; Clergeau, P.; Machon, N.; Vergnes, A. (2015)	33
								PV			Briscoe, D. (2014)	34
								JV			Wang, J. W.; Poh, C. H.; Tan, C. Y. T.; Lee, V. N.; Jain, A.; Webb, E. L. (2017)	35
	PV										Khandaker, M.; Kotzen, B. (2018)	36
								PV			Briscoe, D. (2018)	37
								PV			Briscoe, D. (2020)	38
	JV										Wang, S.; Liu, C. H. I.; Zhang, G. U. O. L. I.; Luo, Q. I. H.; Xu, W.; Raspall, F. (2020)	39
								JV			Al-Kayiem, H. H.; Koh, K.; Riyadi, T. W. B.; Effendy, M. (2020)	40
	FV										Bernardo, F.; Loupa-Ramos, I.; Matos Silva, C.; Manso, M. (2021)	41
	PV										Perini, K.; Magrassi, F.; Giachetta, A.; Moreschi, L.; Gallo, M.; Del Borghi, A. (2021)	42
	PV										Mannan, M.; Al-Ghamdi, S. G. (2022)	43
								JV			Hachoumi, I.; Pucher, B.; De Vito-Francesco, E.; Prenner, F.; Ertl, T.; Langergraber, G.; Fürhacker, M.; Allabashi, R. (2021)	44
								JV			Edelmann, H. G.; Großschedl, J. (2022)	45
	PV										Thorper, P.; Rayner, J.; Haaland, C.; Englund, J. E.; Fransson, A. M. (2022)	46
								PV			Rowe, T.; Poppe, J.; Buyle, M.; Belmans, B.; Audenaert, A. (2022)	47

Fonte: Os autores, 2023.

No Quadro 3, temos os estudos relacionados com as técnicas construtivas do sistema de jardins verticais, apresentando instruções e diretrizes de como são montados cada tipo de sistema (fachada verde e parede viva) e os cuidados necessários após aplicação.

Quadro 3 - Categoria temática C com os métodos aplicados

Tema	Método										Autores	CD
	EX	EX/S	EC	M/S	MP	S	R	MN	MN/S			
C							JV				Perini, K.; Ottelé, M. (2014)	48
							JV				Manso, M.; Castro-G. J. (2015)	49
							JV				Cruciol Barbosa, M. C.; Fontes, M. S. G de C. (2016)	50
							JV				Pérez, G.; Coma, J.; Barreneche, C.; De Gracia, A.; Urrestarazu, M.; Burés, S.; Cabeza, L. F. (2015)	51
							JV				Medl, A.; Stangl, R.; Florineth, F. (2017)	52
							PV				McCullough, M. B.; Martin, M. D.; Sajady, M. A. (2018)	53
							PV				Yalçın, A.; Demir, Z.; Çolak, N. (2018)	54
							PV				Korol, E.; Shushunova, N.; Rerikh, S. (2019)	55
							JV				Santi, G.; Bertolazzi, A.; Croatto, G.; Turrini, U. (2019)	56
							FV				Szolomicki, J.; Golasz-S. H. (2019)	57
							PV				Gunawardena, K.; Steemers, K. (2020)	58
							JV				Ivanova, N.; Ganzha, O.; Podkovyrov, I. (2020)	59
							JV				Santi, G.; Bertolazzi, A.; Leporelli, E.; Turrini, U.; Croatto, G. (2020)	60
							JV				Wang, X.; Gard, W.; Borska, H.; Ursem, B. Kuilen, J. W. G. (2020)	61
						JV				Ischenko, A.; Shishkunova, D. (2021)	62	
			PV							El Menshawy, A. S.; Mohamed, A. F.; Fathy, N. M. (2022)	63	

Fonte: Os autores, 2023.

No Quadro 4, temos o único trabalho relacionado com a sobrevivência das espécies. Nessa pesquisa, o autor apresentou uma metodologia para observar o desenvolvimento e durabilidade da vegetação em algumas situações de climas e as consequências para o sistema. Ao todo foram 7 espécies investigadas, aptas ao clima local da Tailândia.

Quadro 4 - Categoria temática D com os métodos aplicados

Tema	Método										Autores	CD.
	EX	EX/S	EC	M/S	MP	S	R	MN	MN/S			
D	PV										Chaipong, S. (2020)	64

Fonte: Os autores, 2023.

No Quadro 5, estão todos os trabalhos que apresentam estudos relacionados ao conforto ambiental. Esses trabalhos estão analisando a eficiência energética, térmica, acústica e luminosa de ambientes que receberam alguma tipologia de jardins verticais, e apresentam o tema mais investigado entre os autores. Entre eles, os

autores aplicaram mais de uma metodologia, sendo as principais o experimento em campo, simulação e modelagem numérica.

Quadro 5 - Categoria temática E com os métodos aplicados

Tem a	Método										Autores	CD.
	EX	EX /S	E C	M/ S	M P	S	R	M N	MN /S			
E	PV										Fernández-Cañero, R.; Urrestarazu, L.P.; Franco Salas, A. (2012)	65
	FV										Koyama, T.; Yoshinaga, M.; Hayashi, H.; Maeda, K.; Yamauchi, A. (2013)	66
	PV										Haggag, M.A.; Elmasry, S.K.; Hassan, A. (2012)	67
							PV				Stav, Y. Lawson, G. (2012)	68
									FV		Susorova, I.; Angulo, M.; Bahrami, P.; Brent, S. (2013)	69
								FV			Hunter, A. M.; Williams, N. S.G.; Rayner, J. P.; Aye, L.; Hes, D.; Livesley, S. J. (2014)	70
						FV					Li, X. S.; Byrne, U.; Kesik, T. (2014)	71
	FV										Olivieri, F.; Redondas, D.; Olivieri, L.; Neila, J. (2014)	72
	FV										Olivieri, F. Olivieri, L. Neila, J. (2014)	73
								JV			Pérez, G.; Coma, J.; Martorell, I.; Cabeza, L. F. (2014)	74
							FV				Pulselli, R. M.; Pulselli, F. M.; Mazzali, U.; Peron, F.; Bastianoni, S. (2014)	75
	PV										Safikhani, T.; Abdullah, A. M.; Ossen, D. R.; Baharvand, M. (2014)	76
								PV			Safikhani, T.; Abdullah, A. M.; Ossen, D. R.; Baharvand, M. (2014)	77
									PV		Scarpa, M.; Mazzali, U.; Peron, F. (2014)	78
		FV									Scherer, M. J. (2014)	79
	FV										Scherer, M. J.; Fedrizzi, B. M. (2015)	80
	FV										Šuklje, T.; Arkar, C.; Medved, S. (2014)	81
							PV				Carlos, J. S. (2015)	82
								FV			Larsen, S. F.; Filippín, C.; Lesino, G. (2014)	83
								FV			Larsen, S. F.; Filippín, C.; Lesino, G. (2015)	84
								PV		Guillaume, G.; Gauvreau, B.; L'Hermite, P. (2015)	85	
					FV					Allan, S.; Soon, T.; Kim, H. (2016)	86	
FV										Morelli, D. D de O. (2016)	87	
PV										Pérez-U. L.; Fernández-C. R.; Franco, A.; Egea, G. (2016)	88	

Continua...

Continuação...

							FV	Šuklje, T.; Medved, S.; Arkar, C. (2016)	89
					PV			Malys, L.; Musy, M.; Inard, C. (2016)	90
PV								Bianco, L.; Serra, V.; Larcher, F.; Perino, M. (2017)	91
JV								Coma, J.; Pérez, G.; de Gracia, A.; Burés, S.; Urrestarazu, M.; Cabeza, L. F. (2017)	92
						FV		Dahanayake, K. W.D.; Kalani C.; Chow, Cheuk L. (2017)	93
PV								Davis, M. J. M.; Tenpierik, M. J.; Ramírez, F. R.; Pérez, M. E. (2017)	94
					PV			Olivieri, F.; Grifoni, R. C.; Redondas, D.; Sánchez-R. J. A.; Tascini, S. (2017)	95
PV								Ottelé, M.; Perini, K. (2017)	96
PV								Penaranda, M.; Soledad, M.; Azra, K. (2017)	97
FV								Pérez, G.; Coma, J.; Sol, S.; Cabeza, L. F. (2017)	98
PV								Razzaghmanesh, M.; Razzaghmanesh, M. (2017)	99
PV								Rodríguez-S. P.; Ruiz, M. M.; Franco, A.; Pérez-F. A. R.; Lobato-C. O. (2017)	100
PV								Serra, V.; Bianco, L.; Candelari, E.; Giordano, R.; Montacchini, E.; Tedesco, S.; Larcher, F.; Schiavi, A. (2017)	101
FV								Coombes, M. A.; Viles, H. A.; Zhang, H. (2018)	102
FV								Lin, H.; Xiao, Y.; Musso, F. (2018)	103
							JV	Montanari, K. B.; Labaki, L. C. (2018)	104
FV								Pan, L.; Wei, S.; Chu, L.M. (2018)	105
FV								Pérez, G. N.; Rogério, A.; Neves, G. Z. F.; Vecchia, F. A.; Roriz, V. F. (2018)	106
PV								Sánchez-R. J. A.; Ruiz-G. L.; Olivieri, F.; Ventura-R. E. (2018)	107
PV								Szawernoga, K.; Pęczkowski, G. (2018)	108
FV								Widiastuti, R.; Caesarendra, W.; Prianto, E.; Budi, W. S. (2018)	109
							PV	Azis, S. S. A.; Sipan, I.; Sapri, M.; Yusoff, N. S. M.; Hashim, H. A. (2019)	110
						FV		Lin, H.; Xiao, Y.; Musso, F.; Lu, Y. (2019)	111
FV								Kokogiannakis, G.; Darkwa, J.; Badeka, S.; Li, Y. (2019)	112
FV								Li, C.; Wei, J.; Li, C. (2019)	113

Continua...

Continuação...

	FV								Li, Z.; Chow, D. H.C.; Yao, J.; Zheng, X.; Zhao, W. (2019)	114
						FV			Munoz, L. S.; Barbosa, M. C.; Fontes, M. S. G. de C. F.; João, R. G. (2019)	115
FV									Nguyen, P. A.; Bokel, R.; Dobbelsteen, A. V. D. (2019)	116
							FV		Šuklje, T.; Hamdy, M.; Arkar, C.; Hensen, J. L.M.; Medved, S. (2019)	117
FV									Velarde, J. G.; Parejo, M. J. M.; Blanco, J. H.; Moruno, L. G. (2019)	118
FV									Abe, H.; Rijal, H. B.; Hiroki, R.; Iijima, K.; Ohta, A. (2020)	119
FV									Abel, S. P.; Correa, É.; Cantón, M. A. (2020)	120
					PV				Assimakopoulos, M.-N.; De Masi, R. F.de R. F.; Papadaki, D.; Ruggiero, S. (2020)	121
FV									Campos-O. A.; Santillán-S. N.; García-C. O. R.; Lambert-A. A. A.; Bojórquez-M. G. (2020)	122
							PV		He, Y.; Zhang, Y.; Zhang, C.; Zhou, H. (2020)	123
							FV		Kenai, M.-A.; Libessart, L.; Lassue, S.; Defer, D. (2020)	124
	FV								Lesjak, V.; Pajek, L.; Košir, M. (2020)	125
PV									Mannan, M.; Al-Ghamdi, S.G. (2020)	126
					FV				Moghaddam, F. B.; Mir, J. M. F.; Yanguas, A. B.; Delgado, I. N.; Dominguez, E. R. (2020)	127
					PV				Parhizkar, H.; Khoraskani, R. A.; Tahbaz, M. (2020)	128
						JV			Patarlageanu, S.R.; Negrei, C.; Dinu, M.; Chiocar, R. (2020)	129
PV									Paull, N. J.; Krix, D.; Torpy, F. R.; Irga, P. J. (2020)	130
PV									Tan, H.; Hao, X.; Long, P.; Xing, Q.; Lin, Y.; Hu, J. (2020)	131
						FV			Widiastuti, R.; Zaini, J.; Wibowo, M. A.; Caesarendra, W. (2020)	132
						FV			Widiastuti, R. Caesarendra, W.; Zaini, J. (2020)	133
FV									Widiastuti, R.; Caesarendra, W.; Zaini, J. (2019)	134
FV									Widiastuti, R.; Caesarendra, W.; Prianto, E.; Budi, W. S. (2018)	135
FV									Widyahantari, R.; Alfata, M. N. F.; Nurjannah, A. (2020)	136
FV									Zheng, X.; Dai, T.; Tang, M. (2020)	137
PV									Mehzabeen, M.; Sami G. A. G. (2020)	138
					PV				Arengi, A.; Perra, C.; Caffi, M. (2021)	139
					FV				Bano, P.; Dervishi, S. (2021)	140

Continua...

Continuação...

						JV			Bagheri, M. F.; Fort, M. J. M.; Navarro, D. I.; Redond. D. E. (2021)	141
						PV			Ornam, K.; Triyadi, S.; Wonorahardjo, S.; Sutjahja, I. M.; Martonohadi, P.; Assegaf, S.; Kimsan, M. (2021)	142
FV									Cameron, R. W.F.; Taylor, J. E.; Emmett, M. R. (2014)	143
FV									Cameron, R. W. F.; Taylor, J.; Emmett, M. (2015)	144
							FV		Blanco, I. Schettini, E.; Vox, G. (2018)	145
							PV		Sudimac, B. S.; Ignjatovic, N. D. C.; Ignjatovic, D. M. (2018)	146
FV									Blanco, I.; Schettini, E.; Mugnozsa, G. S.; Vox, G. (2018)	147
						PV			Malys, L.; Musy, M.; Inard, C. (2016)	148
							FV		Convertino, F.; Vox, G.; Schettini, E. (2019)	149
							FV		Convertino, F.; Vox, G.; Schettini, E. (2020)	150
							FV		Blanco, I.; Convertino, F.; Schettini, E.; Vox, G. (2021)	151
FV									Pérez, G.; Coma, J.; Chàfer, M.; Cabeza, L. (2022)	152
PV									Fox, M.; Morewood, J.; Murphy, T.; Lunt, P.; Goodhew, S. (2022)	153
	FV								Pérez, G.; Alexandre, E.; Joan, R. R.; Coma, J.; Roger, A.; Bernart, M.; Cabeza, L.; Eduard, G. (2021)	154
		PV							Perera, T. A.N.T.; Jayasinghe, G. Y.; Halwatura, R. U.; Rupasinghe, H. T. (2021)	155
			PV						Li, J.; Zheng, B. (2022)	156
	PV								Juras, P.; Durica, P. (2022)	157
							FV		Škerget, L.; Tadeu, A.; Almeida, J. (2022)	158
								PV	Li, H.; Zhao, Y.; Sützl, B.; Kubilay, A.; Carmeliet, J. (2022)	159
								PV	Azkorra-Larrinaga, Z.; Erkoreka-González, A.; Flores-Abascal, I.; Pérez-Iribarren, E.; Romero-Antón, N. (2022)	160
	PV								Tan, H.; Hao, X.; Long, P.; Xing, Q.; Lin, Y.; Hu, J. (2020)	161

Fonte: Os autores, 2023.

Por fim, o Quadro 6, apresenta um estudo que investigou a modelagem e simulação de jardins verticais aplicando o *software* ENVI-met. O trabalho é uma revisão e compilado sobre os principais avanços e melhorias para a simulação do sistema nesse tipo de *software*.

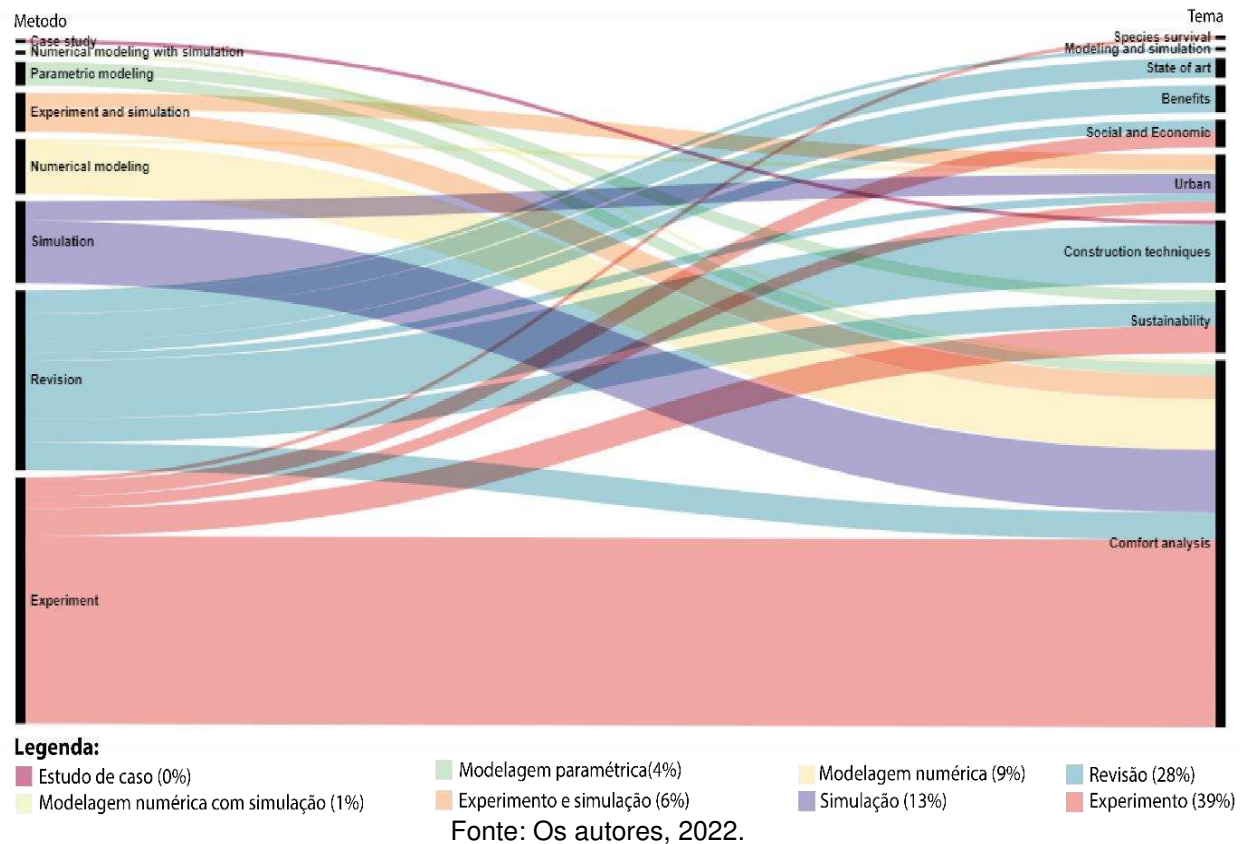
Quadro 6 - Categoria temática F com os métodos aplicados

Tema	Método									Autores	CD.
	EX	EX/S	EC	M/S	MP	S	R	MN	MN/S		
F							JV			Liu, Z.; Cheng, W.; Jim, C.Y.; Morakinyo, T. E.; Shi, Y.; Ng, E. (2021)	162

Fonte: Os autores, 2023.

A Figura 7 resume visualmente a concentração desses métodos dentro das categorias de pesquisas estudadas nos últimos 10 anos referentes a jardins verticais.

Figura 7 - Diagrama Sankey associando temas e metodologias aplicadas no tema jardins verticais



Nos últimos 10 anos, o método experimental aparece com maior frequência, totalizando 39% das pesquisas nos últimos dez anos, e atingindo seu auge em 2020 com 15 artigos publicados. Esses trabalhos em sua maioria, avaliam o efeito térmico da vegetação para o edifício e área urbana e apresentam resultados focados na redução de temperaturas e consumo energético (OLIVIERI; OLIVIERI; NEILA, 2014; MORELLI, 2016; LI et al. 2019b; ABEL SUAREZ; CORREA; CANTÓN, 2020; JURAS; DURICA, 2022), e apontam os benefícios alcançados e a percepção do usuário sobre os jardins verticais (MAGLIOCCO; PERINI, 2015; LOTFI et al. 2020). Uma parcela menor desses estudos investigou a importância da biodiversidade local com a implantação desses sistemas vegetados (BRISCOE, 2014; WANG et al. 2017a); e

THORPERT et al. 2022) e poucos trabalhos focam nas condições fisiológicas e adaptação das espécies (CHAIPONG, 2020; PÉREZ et al. 2022).

Na sequência, artigos de revisão na literatura representam uma porcentagem de 28%. É importante ressaltar que os artigos incluídos nesse grupo, não estão relacionados com as fundamentações teóricas dos outros trabalhos. Esses tem uma estrutura metodológica focada em critérios sistemáticos, e apresentam apenas discussões sobre o quadro teórico dos jardins verticais, como: conceitos e definições do sistema (MANSO; CASTRO-GOMES, 2015); tipologias e técnicas construtivas (CRUCIOL BARBOSA; FONTES, 2016; ISCHENKO; SHISHKUNOVA, 2021), benefícios alcançados com a aplicação de jardins verticais (PULSELLI et al. 2012; RADIĆ; DODIG; AUER, 2019; GHAZALLI et al. 2019; ASCIONE et al. 2020; MAIER, 2022), estudos de caso sobre a qualidade térmica dos sistemas (PÉREZ et al. 2014; MUÑOZ et al., 2019; PATARLAGEANU et al. 2020) e apresentação das principais limitações e lacunas para estudos futuros sobre os jardins verticais.

Posteriormente, a simulação aparece em 13% das pesquisas, com registro somente após 2005 em publicações acadêmicas (STEC; VAN PAASSEN; MAZIARZ, 2005), e maior ocorrência nos últimos dois anos (2019-2020). Todos os estudos reunidos com essa metodologia, discutem análises do desempenho térmico e energético de jardins verticais para os edifícios e áreas urbanas (STAV; LAWSON, 2012; LARSEN; FILIPPÍN; LESINO, 2014; LI et al. 2019a; ASSIMAKOPOULOS et al. 2020; LESJAK; PAJEK; KOŠIR, 2020; PARHIZKAR; KHORASKANI; TAHBAZ, 2020; WIDIASTUTI et al. 2020; ORNAM et al. 2021; PERERA et al. 2021; BAGHERI et al. 2021; PEREZ et al. 2021; ARENGHI; PERRA; CAFFI, 2021; BANO; DERVISHI, 2021). Até o momento, nenhum deles apresentou simulação do crescimento ou desenvolvimento das plantas.

A modelagem numérica representa 9% de todos os estudos levantados. Sua aplicação garante a modelagem e validação correta dos efeitos térmicos causados pelas plantas, bem como a predição precisa do balanço energético (SCARPA; MAZZALI; PERON, 2014; ŠUKLJE et al. 2019; KENAI et al. 2020; CONVERTINO; VOX; SCHETTINI, 2020; SKERGET; TADEU; ALMEIDA, 2021). Além disso, é uma metodologia usada para validação de simulações ao incorporar dados extraídos em experimentos. Nos artigos revisados, essa metodologia está sempre associada a métodos experimentais. Notamos ainda que alguns autores aplicam todas as

metodologias em estudos sequenciais para chegar a um resultado mais satisfatório, como é o caso de Šuklje et al. (2019) e Blanco et al. (2021).

A modelagem algorítmica-paramétrica contabiliza apenas 4% dos estudos levantados. O primeiro registro de pesquisas utilizando essa metodologia apareceu em 2013. A maior porcentagem de publicações acontece no ano seguinte. Porém, como foi mostrado no gráfico de Sankey (Figura 6), essa não é uma metodologia muito utilizada quando comparada a outras. Quanto ao tipo de publicações utilizando esse método, além de análises térmicas (LI; BYRNE; KESIK, 2014; OLIVIERI et al. 2017) e luminosas (MASHALY et al. 2015), algumas abordaram questões específicas do desenvolvimento da vegetação (WANG et al. 2020a) e sua sobrevivência em fachadas (ALLAN; KIM, 2016).

O restante dos estudos aplicou em seus trabalhos metodologias múltiplas, como é o caso das pesquisas com modelagem numérica e simulação (1%) (AZKORRA-LARRINAGA et al. 2022), experimento seguido de simulação com 6% (DJEDJIG et al. 2015; JÄNICKE et al. 2015; PENG et al. 2020; LI; ZHENG, 2022). Entre essas pesquisas, menos de 1% representou estudos com metodologia de estudo de caso.

Um dos motivos do experimento ser a metodologia mais utilizada está associado principalmente à dificuldade de modelar e simular elementos vivos como a vegetação. Além disso, alguns autores utilizam essa metodologia para a extração de dados fisiológicos da vegetação para servir como dados de entrada em simulações realizadas em outras etapas da pesquisa. Por isso, é comum encontrar trabalhos que tenham iniciado seus estudos utilizando métodos experimentais para medições ou calibrações antes do processo de simulação, como pode ser visto nas pesquisas de Koyama et al. (2013), Susorova et al. (2013), Cameron et al. (2014), Scherer (2014), Olivieri et al. (2017), Coma et al. (2017), Sudimac et al. (2018), Pérez et al (2018), Briscoe (2018), Blanco et al. (2021), Convertino et al. (2020) e Arengi et al. (2021).

Com a intenção de responder à pergunta desta revisão, o próximo tópico foi organizado para discutir somente os estudos que utilizaram abordagens metodológicas de modelagem e simulação de jardins verticais (ou seja, 33% de todo material selecionado). A discussão foca no processo de configuração para a modelagem do sistema vegetado, apresenta o *software* utilizado e os *inputs*

necessários de parâmetros para a simulação em ambientes digitais. Vale ressaltar que a revisão não dá ênfase nos resultados das análises térmicas e benefícios energéticos alcançados com esses sistemas.

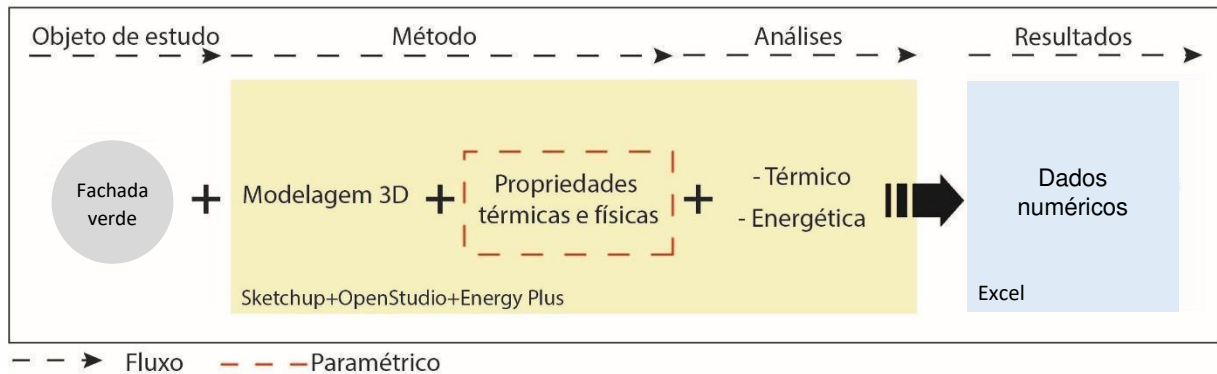
2.4 SIMULAÇÃO PARAMÉTRICA DE ELEMENTOS VEGETADOS COM GEOMETRIA ASSOCIATIVA

Entre as metodologias utilizadas para modelar e investigar o comportamento dos jardins verticais, a simulação paramétrica oferece a capacidade de testar a eficácia do sistema ainda em fase de projeto. Apesar dessa vantagem, sua aplicação em jardins verticais só começou a ser utilizada no início do século XXI. Antes desse período, os estudos utilizavam metodologias experimentais em campo, modelos numéricos e nem sempre alcançavam resultados satisfatórios referente às questões fisiológicas da vegetação. Por isso, a construção desses elementos muitas vezes foi baseada em aproximações de tentativa e erro, sem possibilidade de predição.

Somente em 2005 (STEC; VAN PAASSEN; MAZIARZ, 2005) a simulação paramétrica foi testada para avaliar os efeitos de jardins verticais em uma fachada, possibilitando previsão dos benefícios térmicos, luminoso e energéticos da aplicação da vegetação em edifícios. Os *software* mais utilizados para esse processo desde então são: *Sketchup* com extensão *Open Studio*, *Tas Engenharia*, *Designbuilder*, *SolidWorks*, *Simulink*, *Matlab* e *Simscape* tendo como principal mecanismo de simulação, o *Energy Plus*.

A Figura 8, exemplifica um processo para simulação paramétrica de fachada verde. Neste exemplo estamos utilizando o *software Sketchup* como interface para a modelagem com a extensão *OpenStudio*, o qual roda o motor de simulação *Energyplus*. Antes da simulação é necessário salvar o modelo com a extensão do *OpenStudio*, inserir os parâmetros fisiológicos da vegetação e definir as variáveis da simulação. Os resultados são obtidos numericamente e precisam de pós-tratamento no *Excel* ou programa similar. Caso o projetista queira fazer alguma modificação no modelo inicial, ele precisa refazer as simulações e modificar o pós-tratamento dos dados.

Figura 8 - Processo de projeto com simulação paramétrica para fachada verde



Fonte: Os autores, 2022.

É importante ressaltar que utilizando esse *software* (*sketchup*) e método não é possível representar as propriedades visuais da vegetação, como seu crescimento, estrutura, longevidade e suas características físicas visuais. No entanto, apesar dessas limitações, o exemplo dado na Figura 8 tem sido um processo de modelagem e simulação muito recorrente entre as pesquisas, principalmente com esse *software*.

O próximo tópico irá apresentar esses estudos com mais detalhes, incluindo os parâmetros mais utilizados para definição da vegetação. Para fins de esclarecimento, toda vez que for citado “parâmetros da vegetação” é importante ressaltar que estamos nos referindo às propriedades térmicas e parâmetros físicos da vegetação ou substrato, que inclui condições fisiológicas e visuais da planta.

2.3.1 Síntese metodológica

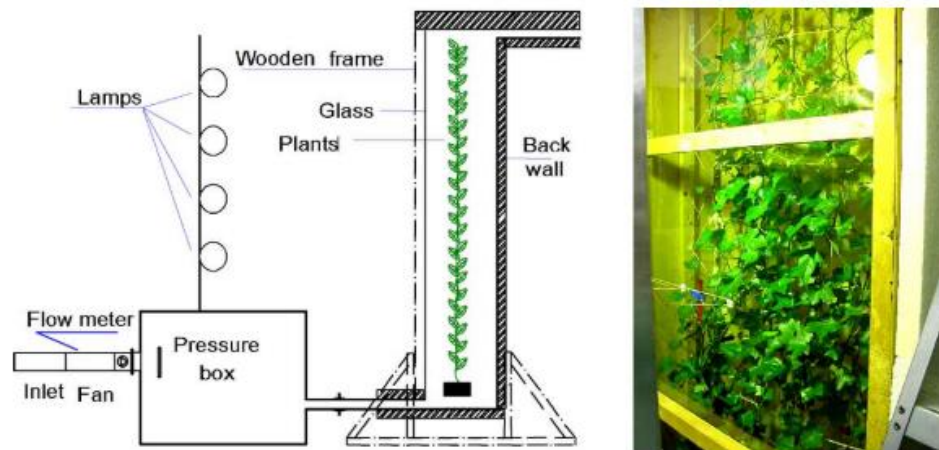
Pelos registros científicos, o primeiro estudo que usou o método de simulação paramétrica para avaliar os jardins verticais foi o estudo de Stec, Van Paassen e Maziarz em 2005, que teve como objetivo simular a capacidade das plantas como sistema de sombreamento em uma fachada dupla e obter mais conclusões sobre o seu desempenho comparado às persianas tradicionais. Antes da modelagem, os autores realizaram testes laboratoriais com protótipo, em escala reduzida, para obter valores de evapotranspiração e radiação solar absorvida da espécie trepadeira *Hedera helix*.

Os dados extraídos no protótipo foram validados com um modelo numérico, feito anteriormente (STEC et al. 2003) e configurado no *software Simulink*, desenvolvido pela companhia MathWorks. Esse *software* é uma ferramenta para

modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, e oferece a integração com o ambiente *MATLAB* que é um *software* voltado para modelagem numérica. Dessa forma, em vez de códigos escritos textualmente, foi possível trabalhar com "blocos de componentes", tendo um ambiente de integração mais visual.

A Figura 9 apresenta um esquema do protótipo desenvolvido para as observações e extração de dados. A vegetação foi alocada em uma caixa exposta a condições semelhantes a uma fachada dupla, recebendo radiação ultravioleta (para emular a radiação solar) e ventilação mecânica (para circulação do ar na cavidade). Os procedimentos metodológicos para extração dos dados não foram apresentados.

Figura 9 - Teste de laboratório da fachada dupla com plantas



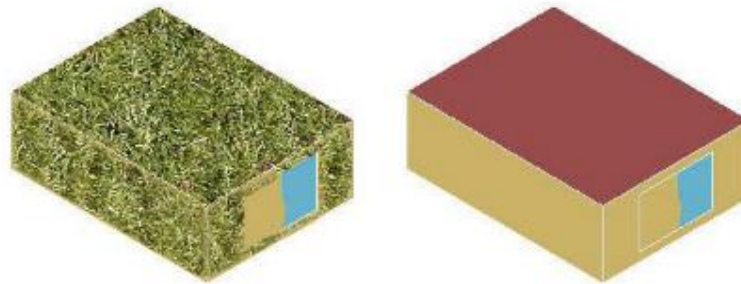
Fonte: Stec, Van Paassen e Maziarz (2005)

Wong et al. (2009) também simularam o efeito do sombreamento da vegetação e constataram sua contribuição para a redução dos efeitos térmicos em edifícios. O modelo foi desenvolvido com o *software* de *Tas Engenharia* e simulado com o *EnergyPlus*. Os principais parâmetros da vegetação para entrada nesta simulação foram o índice de área foliar, e o coeficiente de sombreamento, que é a proporção da radiação solar que atravessa a massa de vegetação. Para a extração desses dados foi utilizado um analisador de dossel LAI-2000. Além desses parâmetros, a evapotranspiração da planta também foi equacionada e adicionada à simulação. Neste artigo, o autor não apresentou detalhes da extração dos dados referente a evapotranspiração e da modelagem de sombreamento da vegetação.

Em 2012, o estudo de Stav e Lawson (2012) contribuiu para a simulação de outros parâmetros fisiológicos da vegetação apresentando um método de simulação no *software EnergyPlus* configurado para refletir as características de uma parede

viva. A geometria da parede viva e da edificação foram modeladas no *software Sketchup* com a extensão *OpenStudio*, que roda o *EnergyPlus*. Nesse *software*, há um módulo embutido para “telhados verdes” que permitiu a configuração de uma parede viva adaptada (Figura 10) para avaliação dos parâmetros da vegetação que poderiam afetar o desempenho do edifício.

Figura 10 - Esquema de modelagem da parede viva



Fonte: Stav e Lawson (2012)

Nesse caso, foram considerados parâmetros físicos da planta e substrato como, altura das folhas, índice de área foliar, espessura do substrato, e propriedades térmicas da vegetação como a emissividade, refletividade, e a quantidade de água retida no substrato. Apesar de obter bons resultados com a simulação, os autores alertaram sobre algumas limitações técnicas do modelo utilizado. Como esse módulo não foi planejado para uma superfície vegetada, os dados de umidade e ventilação não são tão precisos.

Com a intenção de melhorar a técnica das simulações de fachadas verdes, Larsen, Filippín e Lesino (2014) apresentaram dois modelos alternativos simplificados para simular o efeito térmico do sistema com o *EnergyPlus*:

- No primeiro modelo, chamado de *Building Shading Object (BS)*, os autores indicaram modelar uma geometria (qualquer formato) e programar as propriedades do material com a transmitância de um material opaco.
- No segundo, chamado de *Window Shading Device Object (WSD)*, a fachada verde deve ser simulada como um dispositivo de sombreamento em frente à janela. Esse dispositivo de sombreamento no *EnergyPlus* é uma camada considerada paralela ao vidro e é definida com o objeto *WindowMaterial: Shade*. Esse objeto requer a configuração de propriedades térmicas, sendo possível ajustar com as propriedades térmicas da vegetação.

Nas duas opções, só é possível configurar propriedades térmicas (referente ao efeito térmico da planta), como: refletância solar, emissividade e condutividade.

No ano seguinte, Larsen, Filippín e Lesino (2015) também propuseram um método para simular as condições de uma parede viva usando *EnergyPlus*. Ao invés de utilizar o módulo de “telhado verde” como é comum nos outros trabalhos, os autores criam uma camada paralela à edificação para substituir as características de uma parede viva, e adicionam propriedades térmicas e parâmetros físicos modificados da folhagem e do substrato.

Pulselli et al. (2014) também utilizaram o *EnergyPlus* para avaliar o efeito de sombreamento de paredes vivas e seu impacto térmico no ambiente representando-o como um elemento externo opaco, que se comporta como um dispositivo de sombreamento paralelo à fachada do edifício. No entanto, além das propriedades térmicas da vegetação, como emissividade e absorvância da planta, a simulação inclui parâmetros físicos como índice de área foliar, densidade e altura das folhas. Esses dados foram extraídos de experimentos físicos que não foram apresentados.

Com o objetivo de investigar os efeitos no consumo de energia em edifícios durante o inverno em Portugal, Carlos (2015) também fez simulações de parede viva no *EnergyPlus*. Neste caso, o autor optou por analisar uma configuração diferente, modelando um dispositivo com caixas de plantio, preenchidas com substrato e espécies perenes. A configuração das propriedades para a simulação também incluiu o módulo de “telhado verde” com as mesmas características citadas no trabalho de Stav e Lawson (2012).

Alguns anos depois, os autores Li et al. (2019) experimentaram o *software* de modelagem *DesignBuilder* para avaliar uma proposta de *retrofit* com fachada verde utilizando o *Energy Plus*. Os autores utilizaram a metodologia de simulação antes da instalação da fachada verde no edifício estudado para poder quantificar previamente os impactos positivos do sistema. O único parâmetro da vegetação citado pelos autores foi o coeficiente de sombreamento da vegetação (parâmetro físico) retirado de referências anteriores.








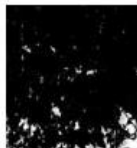

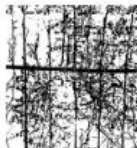
Recentemente, Assimakopoulos et al. (2020) também utilizaram o *DesignBuilder* e o *EnergyPlus* com o módulo de “telhado verde” para avaliar diferentes tipos de plantas e materiais de isolamento para o substrato. Os parâmetros

configurados para a simulação levam em conta os parâmetros físicos da planta (altura e índice de área foliar) e propriedades térmicas (refletividade, emissividade, e resistência estomática) focadas no efeito térmico do sistema. Esses dados foram assumidos de acordo com a literatura.

No trabalho apresentado por Lesjak, Pajek e Kosir (2020) o modelo citado por Larsen, Filippín e Lesino (2014) serviu de base para simular o efeito de sombreamento da vegetação. O *software* utilizado para a modelagem foi o *DesignBuilder* com o *EnergyPlus*. Os parâmetros de entrada da simulação foram coletados de um protótipo em escala real, considerando as características físicas e térmicas da vegetação.

Esse estudo chama atenção pelo procedimento utilizado para a extração dos dados físicos da vegetação (cobertura foliar), pois se assemelha com o desta tese. Como o objetivo era maximizar o sombreamento durante o verão e minimizá-lo durante o inverno, os autores acompanharam o fechamento da cobertura foliar de uma trepadeira decídua (glicínia), e registram o desenvolvimento da folhagem através de fotografias mensais (Figura 11). Esse parâmetro possibilitou que a simulação pudesse comparar diferentes condições físicas da espécie, levando em conta a sua transformação ao longo de cinco meses do ano.

Figura 11 - Taxa de cobertura das folhas da espécie utilizada

	16 th June	20 th July	13 th August	5 th September	30 th October
Photo of plant overgrowth					
Photo negative of plant overgrowth					
Calculated f_c	65 %	78 %	94 %	63 %	31 %

Fonte: Lesjak, Pajek e Košir (2020)

Outro estudo que chama atenção pelo procedimento de extração de dados físicos da vegetação é o trabalho de Widiastuti et al. (2020a). Eles apresentam uma série de pesquisas, nas quais a cobertura foliar foi usada como o principal parâmetro de entrada nas simulações paramétricas. Para a extração desses dados, os autores

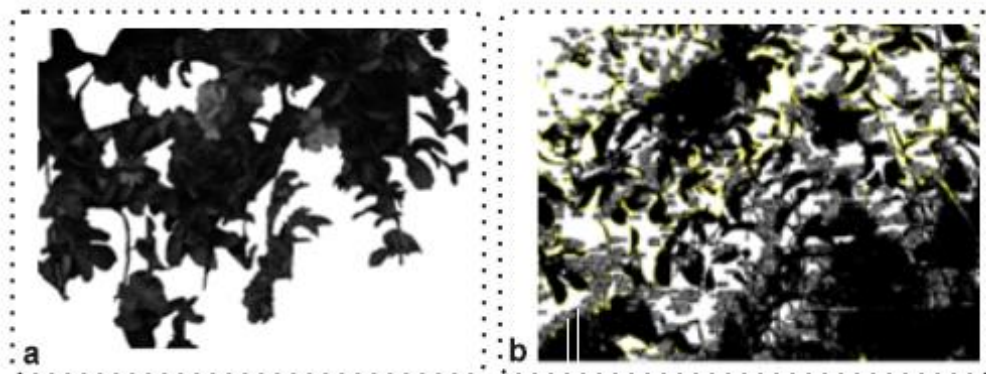
apresentam duas metodologias: uma utilizando o *software AutoCAD* (WIDIASTUTI et al. 2018) e outra aplicando o *software ImageJ* (WIDIASTUTI; CAESARENDRA; ZAINI, 2019). Pelo método do *AutoCAD* (Figura 12a) eles seguem o cálculo baseado na teoria de dominação de Odum (1993), conforme segue a Equação (1):

$$LD = \frac{L^1 \times 100\%}{L^2} \quad \dots (1)$$

Onde LD = é a densidades de folhas em %; L 1 = a área coberta pela fachada verde em m2; L 2 = área inteira de medição do objeto em m2.

Já o processo utilizando o *software ImageJ*, calcula a área de cobertura da folhagem utilizando imagens binárias e a contagem de pixels das áreas cobertas pelas plantas (Figura 12b). As espécies utilizadas para a pesquisa foram: *Passifloraflavicarva* e *Pseudocalymmaalliaceum*.

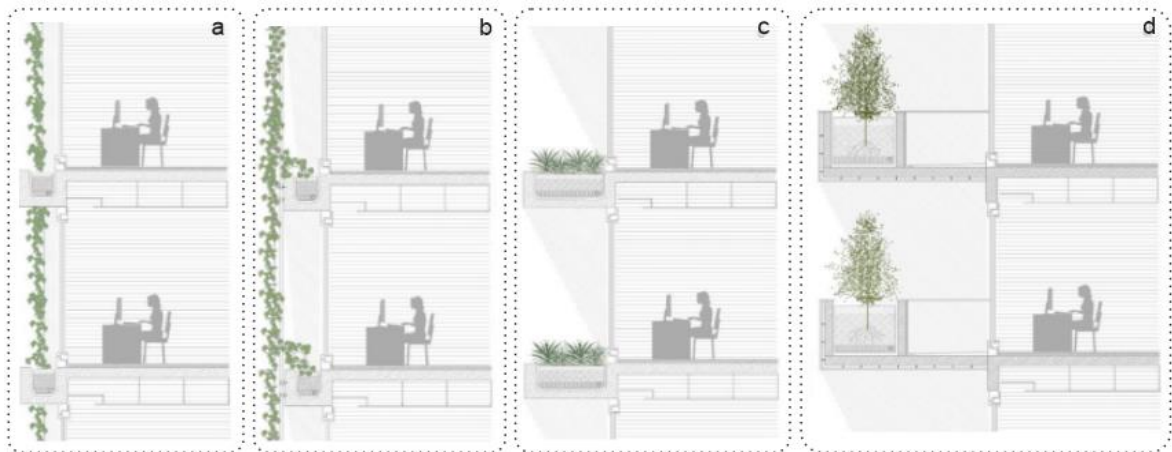
Figura 12 -a) Cobertura foliar pelo software AutoCAD b) Cobertura foliar pelo software ImageJ



Fonte: Widiastuti et al. (2018) e Widiastuti, Caesarendra e Zaini (2019)

Em um estudo recente, Bano e Dervishi (2021) apresentam a simulação de várias alternativas de fachadas com vegetação (Figura 13) que diferem na configuração espacial e sombreamento da vegetação para quantificar o impacto em paredes opacas, e em superfícies envidraçadas. Entre as configurações testadas, duas se configuram como fachada verde: (a) trepadeiras em vasos usando malhas para suporte, (b) trepadeiras em vasos usando venezianas externas para suporte. Já as outras duas foram simuladas com: (c) arbustos decíduos usando vasos salientes à edificação e (d) árvores decíduas usando vasos de plantio em varandas, sendo que ambas não se enquadram em fachada verde.

Figura 13 - Configurações com vegetação em fachada para simulação



Fonte: Bano e Dervishi (2021)

A edificação hipotética foi modelada no *DesignBuilder* e simulada com *EnergyPlus*. Assim como outros trabalhos citados anteriormente, os autores utilizaram o módulo de “telhado verde” e para simulação energética, usaram como base o modelo numérico de Stav e Lawson (2012) para mapeamento quantitativo da contribuição dos parâmetros da vegetação na economia de energia.

Antes da simulação, Bano e Dervishi (2021) fizeram uma revisão de literatura para encontrar os parâmetros mais utilizados em simulações de vegetação. Utilizaram então parâmetros físicos da folhagem e propriedades térmicas da vegetação e do substrato. Os autores ressaltam, assim como Hunter et al. (2014), que ainda existe uma lacuna na literatura quanto à análise quantitativa de parâmetros relacionados às propriedades térmicas e físicas das plantas.

Uma outra temática em simulação que se mostrou muito recorrente na revisão de literatura se relaciona à quantificação dos benefícios da vegetação em áreas urbanas. Esses trabalhos discutem os efeitos das ilhas de calor e como os edifícios com jardins verticais afetam positivamente esses ambientes. Os *software* que permitem fazer essa simulações geralmente são: *Envi-met Version*, *RayMan Pro*, *SOLWEIG*, e *Simscape*. Nos trabalhos coletados sobre o tema, as pesquisas consideram as duas tipologias de jardins verticais para simulação, fachada verde e parede viva, e sempre aparecem acompanhadas de estudos experimentais para coleta de dados.

O trabalho de Jänicke et al. (2015), por exemplo, contribuiu para o entendimento dos efeitos térmicos de uma fachada verde para o microclima urbano.

Esse estudo utilizou os *software Envi-met* para modelagem e *RayMan Pro* e *SOLWEIG* para simulação. Para a entrada de parâmetros dessa simulação, os autores assumiram como base as equações numéricas de Susorova et al. (2013), que definem as propriedades térmicas da planta.

Afshari (2017) utilizou a caixa de ferramentas *Simscape* do *Matlab* para simular efeitos da aplicação de fachada verde no microclima urbano, inserindo parâmetros físicos, como índice de área foliar e profundidade foliar, e propriedades térmicas da espécie de trepadeira *Hedera*.

Para simular o efeito térmico de uma parede viva em áreas urbanas, Dahanayake e Chow (2017) optaram por utilizar o módulo de telhado verde do *EnergyPlus* para definição dos parâmetros da vegetação. Além disso, o modelo de parede viva de Malys, Musy e Inard (2016) também foi utilizado como base. O modelo final adaptado por eles define parâmetros físicos, como índice de área foliar e altura da vegetação, e as propriedades térmicas de uma camada de vegetação e substrato.

Li et al. (2019b) utilizaram a nova versão do *software Envi-met* para modelar e simular os benefícios térmicos de diferentes projetos de paredes vivas em uma rua de pedestres. Essa versão do *Envi-met* tem um módulo específico para parede viva e permite inserir vários parâmetros referentes às características da vegetação. A simulação testou quatro projetos de paredes vivas com configurações e características diferentes. Tanto os parâmetros físicos da espécie *Hedera* e do substrato foram assumidos e configurados, como índice de área foliar, profundidade foliar e altura das folhas. Para o substrato, propriedades térmicas e parâmetros físicos foram incluídos.

Outra pesquisa avaliando esses efeitos em áreas urbanas com o *Envi-met* é a de Peng et al. (2020). Os autores realizaram coleta de dados experimentais para configuração dos parâmetros térmicos e físicos das espécies *Hedera*, *Nephrolepis* e *Hosta*. Como parâmetros físicos, foram selecionados o índice e densidade da área foliar, espessura das folhas e profundidade do substrato. Para as propriedades térmicas: transmitância foliar, quantidade de água retida, e o calor volumétrico do substrato. Os autores ressaltaram a importância de validar o módulo de parede verde para obter parâmetros de entrada mais específicos relacionados ao processo térmico do sistema.

Bandurski et al. (2020) apresentaram um estudo para comprovar a eficiência do sombreamento e evapotranspiração da planta. Neste trabalho, um mobiliário urbano foi coberto por plantas (Figura 14) visando melhorar o microclima e aumentar a biodiversidade local. O trabalho foi conduzido com a implementação e monitoramento do mobiliário para medição dos dados, e validado com base na simulação paramétrica.

Figura 14 - Localização e estrutura do mobiliário



Fonte: Bandurski et al. (2020)

Para a construção do mobiliário foram utilizadas cerca de 120 espécies de plantas, e durante a seleção das plantas foram consideradas a cor das folhas ou flores e suas necessidades para adaptação local, como clima, tipo de rega e plantio. Neste artigo, o *software TRNSYS* foi utilizado para a simulação.

2.3.2 Modelagem numérica de elementos vegetados

Em paralelo aos estudos anteriores, visto a dificuldade em simular os efeitos fisiológicos das plantas, alguns estudos tentaram explorar os efeitos cumulativos dos jardins verticais, contribuindo tanto para simulações que envolvem pesquisa na escala da edificação quanto na escala urbana. Esses estudos resultaram em equações que podem ser integradas em *software* de simulação, para avaliar o desempenho térmico (SUSOROVA et al. 2013; SCARPA; MAZZALI; PERON, 2014; ŠUKLJE; MEDVED; ARKAR, 2016; KENAI et al. 2020; CONVERTINO; VOX; SCHETTINI, 2019; ŠUKLJE et al. 2019), energético (BLANCO et al. 2018) e acústico (GUILLAUME; GAUVREAU; L'HERMITE, 2015) de ambientes construídos e para o micro clima urbano (WONG et al. 2009; MAZZALI; PERON; SCARPA, 2012; ŠUKLJE; MEDVED; ARKAR, 2016; MALYS; MUSY; INARD, 2016).

Em relação à fachada verde, Susorova et al. (2013) e Šuklje, Medved e Arka, (2016) propõem um modelo que simula o fluxo de calor através de uma camada vegetada e uma superfície construída. Os modelos consideram vários parâmetros físicos e térmicos da planta, como índice de área foliar, dimensão média da folha, assim como sua absorvidade e evapotranspiração. Alguns anos depois, Šuklje et al. (2019) apresentam um novo modelo, também baseado nos dados experimentais de seu estudo anterior (ŠUKLJE; MEDVED; ARKAR, 2016) para modelar a resposta térmica da fachada verde como uma camada homogênea ao envelope do edifício com propriedades aparentes.

Scarpa, Mazzali e Peron (2014) apresentam um estudo que permite avaliar o comportamento térmico de dois sistemas de jardins verticais, um considerando uma parede viva com cavidade fechada e outra com fachada verde com cavidade aberta. Nesse estudo, o índice de área foliar, a evapotranspiração, a emissividade e o tipo de cavidade de ar foram considerados.

Além dos efeitos térmicos, os estudos de Convertino, Vox e Schettini (2019) avaliaram o balanço energético de uma fachada verde. O objetivo específico foi entender a tendência da evapotranspiração em relação a todos os outros fatores fisiológicos da vegetação. Os dados extraídos do modelo físico foram aplicados em um modelo teórico, registrado em uma fachada verde experimental. No ano seguinte, os autores apresentaram um artigo definindo as trocas de calor que ocorrem nas superfícies externas de uma fachada verde. Novamente, os estudos apoiaram-se em dados empíricos extraídos no experimento anterior (CONVERTINO; VOX; SCHETTINI, 2020).

Kenai et al. (2020) apresentaram a simulação numérica do efeito do sombreamento criado por uma fachada verde sobre o desempenho térmico e energético de uma envoltória em clima temperado. Recentemente, Blanco et al. (2021) definiram um modelo numérico do comportamento térmico de uma fachada verde para realizar análises estatísticas e avaliar os fluxos de calor. Os resultados destas investigações contribuem para o conhecimento dos efeitos proporcionados pela fachada verde em termos de arrefecimento e aquecimento.

Malys, Musy e Inard (2016) propuseram um modelo térmico de parede viva para a implementação em um *software* de simulação de microclima urbano e

compararam os resultados da simulação com os dados experimentais obtidos para três amostras de parede viva. Guillaume, Gauvreau e L’Hermite (2015) também apresentaram um estudo sobre o impacto acústico de superfícies vegetadas, destacando os efeitos da vegetação para absorção de ruído na escala urbana. O modelo numérico utiliza dados empíricos como a taxa de cobertura verde e a localização da vegetação introduzida nas superfícies dos edifícios.

Ambos os estudos aparecem como referência para os demais estudos de modelagem e simulação paramétrica encontrados. A maior parte deles teve como foco o desempenho térmico e balanço energético do edifício perante aplicação da vegetação. Alguns focaram no efeito do microclima urbano e apenas um em análises acústicas. Além dessas pesquisas, esta revisão não encontrou registros de modelagem numérica para análises estruturais dos sistemas vegetados ou para o crescimento de plantas.

2.5 MODELAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA DE ELEMENTOS VEGETADOS COM GEOMETRIA ASSOCIATIVA

Além do método de simulação paramétrica, alguns estudos utilizaram a modelagem algorítmico-paramétrica para simular o comportamento de plantas, como a cobertura foliar para sombreamento (LI; BYRNE; KESIK, 2014; ALLAN; KIM, 2016), o isolamento térmico do substrato de paredes vivas (OLIVIERI et al. 2017), e opções para fabricação e aplicação de paredes vivas (WANG et al. 2020a; BRISCOE, 2020).

Esse método, consiste em criar modelos que são programados por código, gerando uma geometria associativa, facilitando a alteração da forma de acordo com as necessidades do projeto através da manipulação de parâmetros (KOLAREVIC, 2000; CAETANO; SANTOS; LEITÃO, 2020). O *software* mais utilizado como interface gráfica para este tipo de modelagem é o *Rhinoceros*, ferramenta *CAD* (*computer-aided design*) traduzido para “Desenho assistido por computador” que tem como diferencial um sistema baseado em *NURBS* (*Non Uniform Rational Bases Spline*).

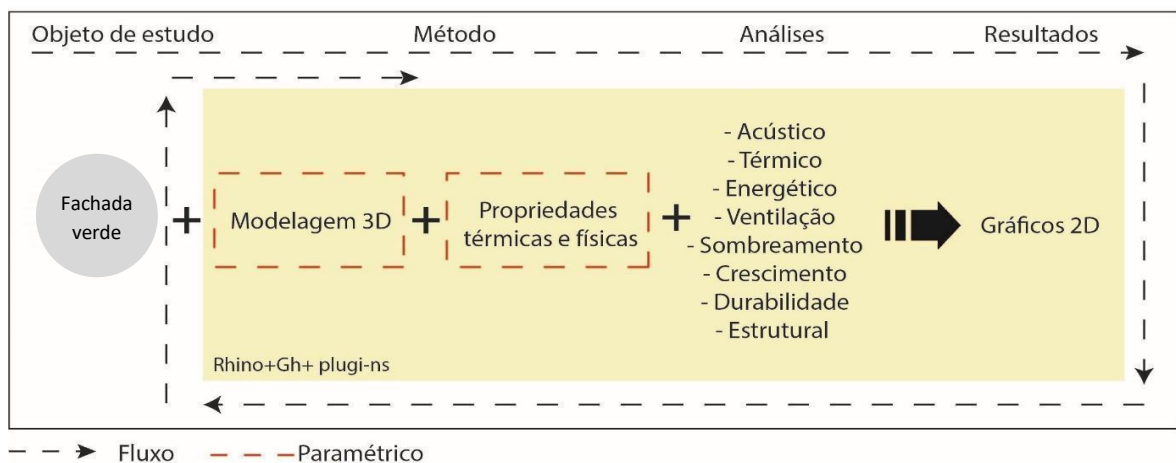
Além do *software CAD*, existem as ferramentas *BIM* (*Building Information Model*) que em português pode ser traduzido para “Modelo de Informação da Construção” que aplicam a modelagem paramétrica em tempo real. Os dois principais *software* que trabalham com esta tecnologia são o *ARCHICAD* e *Revit*. No

ARCHICAD, o *plug-in* necessário para esta interação também é o *Grasshopper*. No *Revit*, a interface gráfica de programação é o *Dynamo*.

Com esse método é possível ter maior controle do modelo e as propriedades da vegetação de forma simultânea, fazendo com que o projetista tenha menos retrabalho ao alterar alguma informação entre modelo e propriedades da vegetação. Outra vantagem, é a apresentação dos resultados, que podem ser extraídos graficamente utilizando o *plugin Ladybug*. Esse é um *plugin* para o *Grasshopper* que permite importar e analisar dados meteorológicos no ambiente de modelagem do *Grasshopper*. Com ele podemos ilustrar os resultados com diagramas, analisar sombreamento, radiação e ventilação sem o uso de outros *software*.

A Figura 15 traz um diagrama para simplificar como é o fluxo de projeto desse método utilizando como exemplo um modelo de fachada verde. Nesse caso, o código criado permite controlar os parâmetros do modelo 3D e das propriedades da vegetação simultaneamente. Depois das definições podemos simular e extrair algumas análises de projeto, como, percentual de cobertura foliar, tipo de crescimento da espécie, durabilidade, métodos construtivos, peso estrutural, além de análises ambientais.

Figura 15 - Processo de projeto com modelagem algorítmico-paramétrica para fachada verde



Fonte: Os autores, 2022.

Uma das diferenças de simular com este método comparado ao anterior, é que este possibilita avaliar os resultados das simulações graficamente no mesmo *software* de modelagem e também, permite fazer outras análises além do desempenho térmico, como simulação estrutural, arquitetônica, fabricação, e análise de iluminação para arquitetura. Com esse método podemos automatizar processos muito repetitivos, ao

criar um código que permite a variação de parâmetros e o seu uso em diferentes projetos.

2.4.1 Síntese metodológica

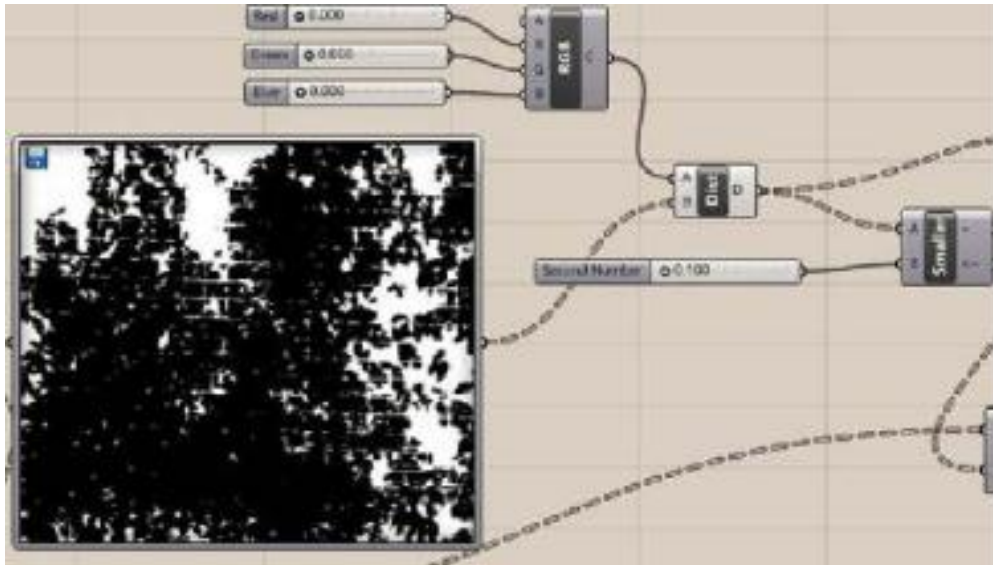
A simulação de estruturas vegetais complexas na natureza ainda é uma área que necessita de mais pesquisa em computação gráfica (LIAO, 2020). Devido à natureza distinta desse campo que combina Biologia, Física, Matemática e Arquitetura, sua integração em modelos de sistemas únicos torna-se um desafio. Portanto, sua tradução em lógica algorítmica e sua combinação em uma ferramenta paramétrica pode ser uma solução unificadora para este problema.

A natureza dinâmica e transformadora da vegetação apresenta um desafio que é incomum para o domínio das estruturas estáticas na arquitetura. Enquanto a maioria das ferramentas digitais na arquitetura limitam-se a prever o desenvolvimento de uma estrutura apenas até o seu processo de fabricação e montagem, esse método pode descrever uma estratégia holística que permite projetar construções de plantas vivas com base em fundamentos botânicos e regras de crescimento.

Pelos registros científicos, o primeiro estudo com fachadas verdes utilizando modelagem algorítmico-paramétrica foi o estudo de Li, Byrne e Kesik (2014), onde os autores exploraram as metodologias de modelagem e simulação paramétrica para avaliar os efeitos do sombreamento de fachadas verdes nas temperaturas superficiais da parede. Para essas análises, os autores definiram um algoritmo dentro da plataforma *Rhinoceros + Grasshopper* com os *plugins: Ladybug, Honeybee e Diva*. Destaca-se nesse estudo, a técnica utilizada para extração de dados da folhagem, e a forma que a modelagem foi configurada para representar o sombreamento da espécie de trepadeira Virginia.

Para as medições, os autores realizaram o procedimento de registro fotográfico da cobertura da espécie para simular o sombreamento. Essa medição ocorreu uma única vez, em uma seção de 1x1 m do protótipo real. A imagem foi tratada no *software Adobe Photoshop* e convertida para uma imagem binária. Para a definição do código, a imagem binária foi adicionada com o componente *Image Sampler* do *Grasshopper*, e uma superfície foi configurada para mapear essa imagem através de *pixels* (Figura 16). Assim, foi construído uma série de modelos 3D simplificados da geometria de sombreamento no *Rhinoceros*.

Figura 16 - Imagem binária no Grasshopper para gerar geometria de sombreamento

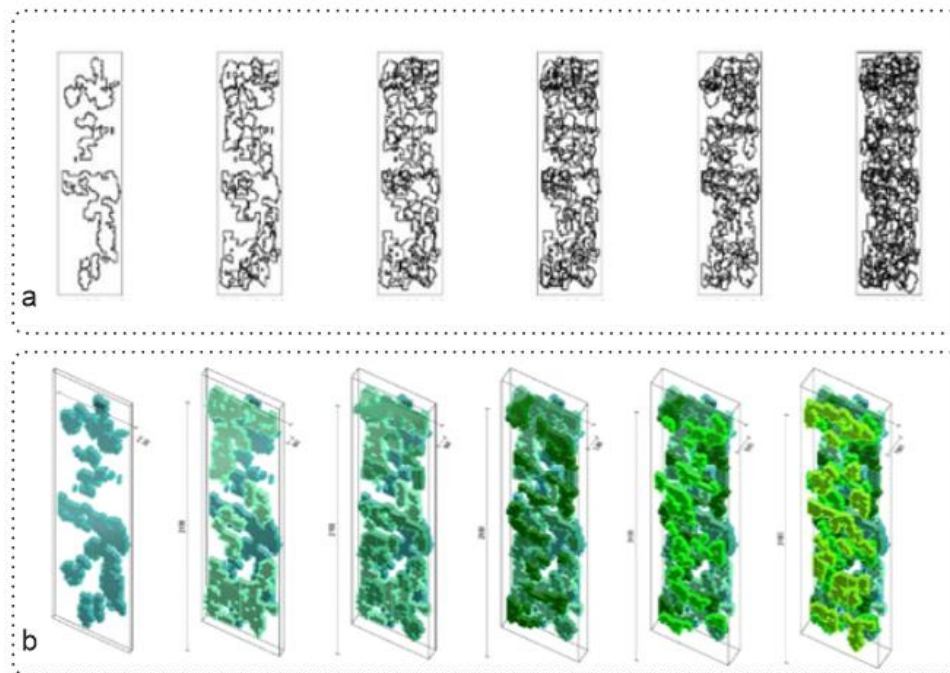


Fonte: Li, Byrne e Kesik (2014)

Depois de ajustar as definições da geometria no modelo 3D no *Grasshopper* Li, Byrne e Kesik (2014) realizaram simulações luminosas com o *plugin DIVA-for-Rhino*. O método das simulações permite alcançar resultados confiáveis apenas para os efeitos que o sombreamento da vegetação tem no desempenho térmico geral de uma fachada verde. Ao calibrar os resultados calculados com medições de campo, Li, Byrne e Kesik (2014) ressaltaram a necessidade de mais estudos obtidos e forneceram essas informações sobre a taxa de cobertura foliar de outras espécies para fachada verde. Esses dados permitem que outros estudos de simulação sejam feitos rapidamente usando um *software* de simulação.

Allan e Kim (2016) estudaram a eficiência e precisão do BIM em processar a vegetação vertical digitalmente para justificar a viabilidade da fachada verde e seu desempenho para a construção. O processo de modelagem do código seguiu um fluxo de trabalho envolvendo *software* como *AutoCad* e *Adobe Photoshop* para definição do percentual de fechamento foliar do modelo 2D (Figura 17a), *Rhinoceros* para modelagem 3D (Figura 17b) da profundidade da planta no painel e definição do edifício base, e o *plugin Grasshopper* para simulação térmica com *plug-ins Ladybug*, *Honeybee* e *Diva*.

Figura 17 - Modelo 2D: crescimento da planta b) Modelo 3D: profundidade da planta



Fonte: Allan e Kim (2016)

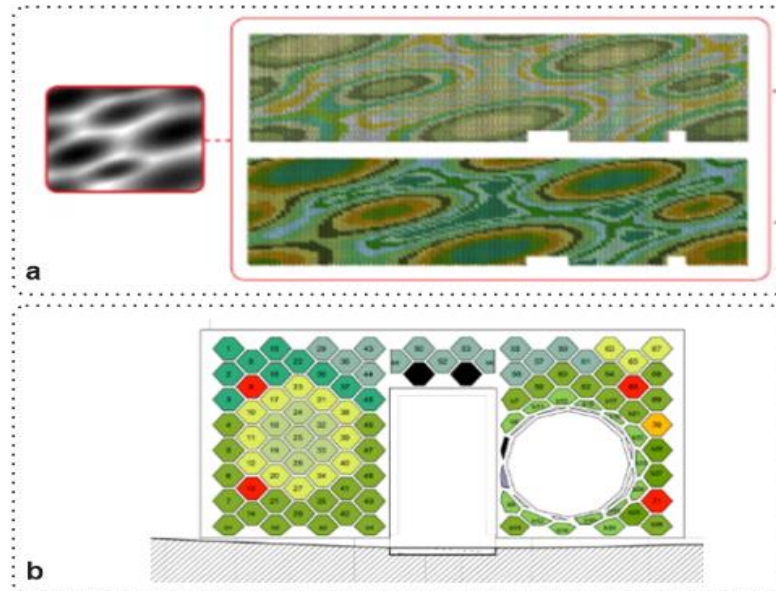
Um dos focos dessa simulação era entender a capacidade de sobrevivência de plantas às temperaturas superficiais das fachadas dos edifícios, assim como avaliar a redução da demanda energética de um edifício base utilizando o sombreamento de fachadas verdes. Uma das principais limitações apontadas nesta pesquisa, assim como em outras anteriormente apresentadas, foi a falta de um banco de dados referente aos parâmetros físicos e propriedades térmicas de plantas para serem incluídos em *software* de simulação. Além disso, o tempo para o processamento de simulação fez com que os autores precisassem simplificar o modelo base, o que acabou afetando a precisão dos resultados.

Já os trabalhos apresentados por Briscoe (2014; 2018; 2020) fazem parte de uma sequência de estudos focados em paredes vivas. Em 2014, Briscoe fez testes com estudos de Diagrama de *Voronoi*¹ padrão para definir a geometria da parede viva (Figura 18a), aumentando as possibilidades de modelagem e estudos de *layout* da fachada. Para isso utilizou o *Revit* e o *plugin Dynamo*, para organizar uma lista de plantas de acordo com um gráfico de *bitmap* (Figura 18b). A programação deste

¹ **Diagrama de Voronoi** é um tipo especial de decomposição de um dado espaço, por exemplo, um espaço métrico, determinado pela distância para uma determinada família de objetos (subconjuntos) no espaço.

código permitiu fornecer as informações de custo, quantidade, tipo de planta, previsão do *layout* para alocar as plantas, e organização documentada das espécies.

Figura 18 - Gráfico baseado em bitmap para organizar e mapear as plantas



Fonte: Briscoe (2014) e Briscoe (2018).

Em 2020, Briscoe (2020) documenta o potencial térmico da parede viva, e apresenta o fluxo de trabalho no *BIM* e em outras plataformas de programação visual de apoio ao projeto, a fabricação, e a construção da fachada customizada com plantas e ecohabitats. As medições e análises de desempenho da parede foram feitas utilizando o *Arduino*², sensor de temperatura e umidade, detector de som e sensor de distância infravermelho.

Outra pesquisa envolvendo análises do efeito térmico com parede viva foi estudada por Olivieri et al. (2017). Esse trabalho avaliou o efeito da espessura do isolamento no desempenho energético de uma parede viva utilizando a modelagem paramétrica para simulação e otimização do sistema. A validação da simulação ocorreu utilizando dados experimentais. As análises e modelagem do sistema foram realizadas no ambiente de modelagem *Rhino+Grasshopper*. Para a simulação foram utilizados os *plug-ins Ladybug e Honeybee* e para otimização o *plugin Galápagos para Grasshopper*. Para simular o comportamento da parede viva, Olivieri et al. (2017) também utilizaram como base de entrada parâmetros físicos e

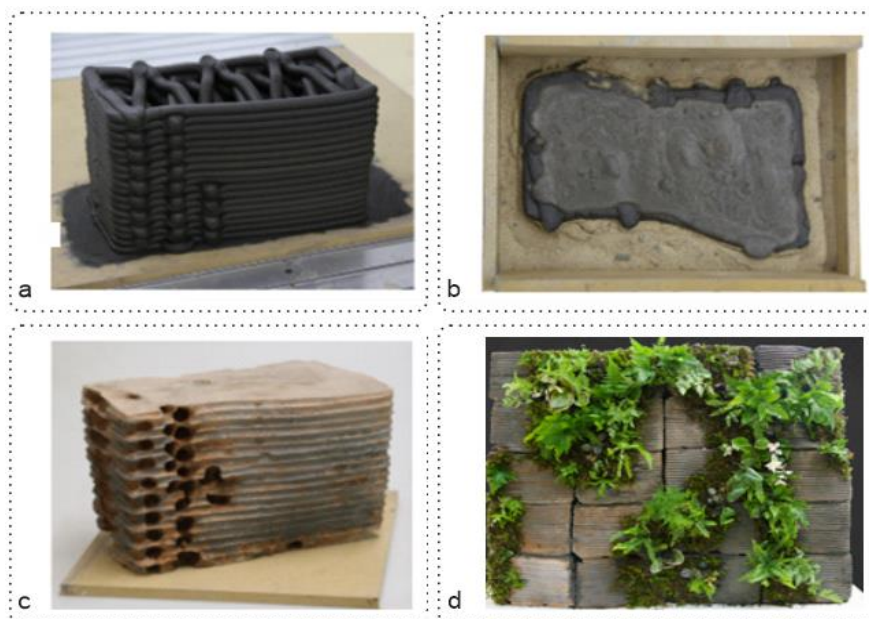
² **Arduino** é uma placa de prototipagem eletrônica de código aberto.

propriedades térmicas da vegetação do módulo de telhados verdes acoplados ao *EnergyPlus*.

A parede viva geralmente é construída com módulos ou mantas verticais fixadas nas superfícies. As plantas são alocadas nesses módulos ou em bolsos da manta com substrato (MEDL; STANG; FLORINETH, 2017). Para facilitar o crescimento das plantas, o sistema de parede viva sempre contém os elementos necessários, como estrutura de suporte, meio de cultivo, irrigação e drenagem. Pensando nessas necessidades, Wang et al. (2020a) propõem uma fabricação de parede viva que integra os elementos funcionais para nutrir o crescimento das plantas em paredes de concreto, sem a necessidade de acessórios extras como estruturas de suporte.

Para isso, Wang et al. (2020a) desenvolveram um molde para blocos cerâmicos que podem ser impressos e reaproveitados. O método da pesquisa envolve três etapas: modelagem paramétrica, método de fabricação digital com Clay Robotics (Wang et al. 2017) para produzir moldes de argila para fundição de concreto via extrusão, e construção final. Esse processo fabrica o molde com nervuras internas que guiam o crescimento das raízes das plantas (Figura 19).

Figura 19 - Processos de fabricação dos blocos: a) molde, b) concretagem, c) módulo desinformado e d) montagem da parede.



Fonte: Wang et al. (2020).

O estudo imprimiu 20 moldes, todos com características distintas para criar uma superfície orgânica e natural. Para pesquisas futuras, os pesquisadores pretendem ampliar as possibilidades estruturais do bloco cerâmico e diversificar o tamanho das nervuras internas, pois algumas espécies de plantas exigem um espaço mais amplo para crescimento e desenvolvimento. O estudo não citou os *software* utilizados para a modelagem dos protótipos.

2.6 SÍNTESE GERAL

Este capítulo forneceu o conhecimento publicado nos últimos dez anos referente à modelagem e simulação paramétrica de jardins verticais. A revisão ajudou a entender os principais processos de modelagem, reunir os parâmetros da vegetação mais utilizados, assim como fazer o levantamento do *software* que permite fazer análises desses elementos.

A revisão identificou duas metodologias principais para o **processo de modelagem** de jardins verticais, uma envolvendo *software* para “simulação paramétrica” e outro *software* para “modelagem algorítmico-paramétrica”. A principal diferença entre elas está relacionada ao processo de criação e controle da forma geométrica do modelo estudado, sendo que:

- Os trabalhos que estão considerando a simulação paramétrica como metodologia nesta revisão são aqueles cuja as variáveis da geometria (suporte da vegetação) não estão sendo alteradas, somente as propriedades dos materiais (vegetação). Ou seja, no caso destes estudos, a simulação paramétrica está voltada exclusivamente para o desempenho térmico e energético dos jardins verticais a partir das propriedades dos materiais, ou seja, da vegetação, e não da forma geométrica do jardim vertical estudado. Outra diferença é que quando necessário alguma modificação na forma geométrica, todos os processos posteriores precisam ser reajustados e configurados novamente para rodar a simulação.
- Quanto ao método de modelagem algorítmico-paramétrica, os trabalhos avaliados nesta revisão estão simulando e modelando jardins verticais a partir de um código visual no *Grasshopper*. A principal diferença entre o

método anterior está relacionada à liberdade que o código traz para a alteração da forma do modelo juntamente com as propriedades dos materiais da vegetação. Ou seja, com esse método temos maior controle para manipular os parâmetros da forma e do material simultaneamente. Assim, quando necessário alguma modificação em qualquer etapa do processo, tudo é reajustado ao mesmo tempo sem ter o retrabalho de refazer etapas anteriores ou posteriores.

Embora exista essa diferença entre os processos, ambos os métodos aplicados ainda estão focando no mesmo objetivo, desempenho térmico ou energético, e seguem os mesmos procedimentos para configurar a forma do elemento vegetado “fachada verde” e “parede viva”, sendo que:

- A modelagem de “fachada verde”, tem sido associada ao mecanismo de sombreamento causado pela folhagem da espécie, portanto, sua configuração leva em conta duas etapas: primeiro é feita a modelagem da geometria representativa das folhas. Depois esse material é configurado com propriedades de um material “opaco” ou utilizando as propriedades térmicas de um brise (componente embutido no *software EnergyPlus*) com alterações para parâmetros térmicos da vegetação.
- Quanto à modelagem de “parede viva”, o foco está voltado para o isolamento do sistema, por isso, três camadas de configuração têm sido consideradas: o isolamento e umidade do sistema (devido às características do substrato), parâmetros físicos e as propriedades térmicas da vegetação. Devido à maior complexidade do sistema, as pesquisas utilizam como base de entrada o módulo de “telhado verde”, do *EnergyPlus*. Esse módulo tem todas as configurações necessárias para inserir os parâmetros de uma parede viva, no entanto, ele apresenta algumas restrições referentes a umidade do substrato, pois a capacidade que um telhado tem de reter a água é muito maior que uma parede na vertical.

Para a configuração desses modelos, é necessário ter como entrada uma série de parâmetros físicos e propriedades térmicas da vegetação, os quais precisam ser extraídos com estudos experimentais em campo e validados por modelagem numérica. Alguns autores utilizam dados extraídos com pesquisas próprias realizadas

anteriormente, e outros assumem dados já publicados por outros autores na literatura científica. Essa tem sido a maior limitação entre essas pesquisas para modelar ou simular jardins verticais, visto que nem sempre é possível definir essas propriedades de forma precisa.

O Quadro 7 reúne todos os parâmetros que a parede viva e a fachada verde consideram nesses 162 trabalhos. Como a maioria dos estudos referentes a jardins verticais está focado no desempenho térmico e energético desse sistema, os parâmetros extraídos e configurados nos modelos têm focado nas propriedades térmicas do substrato, umidade retida e propriedades da folhagem.

Diante disso, é importante ressaltar que esses dados (Quadro 7) não serviram de *input* para alimentar o código feito nesta pesquisa, isso porque, como foi dito, os parâmetros encontrados na literatura até o momento, estão focados em propriedades térmicas da vegetação. Embora a revisão tenha abordado os 162 artigos, o nosso objetivo era encontrar dados sobre as condições de crescimento, permeabilidade/visibilidade, massa vegetada e densidade de trepadeiras. E como esses fatores não foram identificados com a revisão, o método experimental (item 3.3) foi de suma importância para esse levantamento de dados e *input* do código.

Quadro 7 - Parâmetros da vegetação para entrada da simulação em cada sistema

Propriedades físicas				Propriedades térmicas														Ref.	
Alt.	IAF	Esp.	Refl.	Emis.	Resi.	Rugs.	Cond.s	Dens.s	Cal.	Abs.t	Abs.s	Cont.1	Cont.2	Cont.3	Tax.i	Abs.s	Res.t		Tran.s.
0,1/0,2/0,3/0,5 m	1,0/3,0/5,0	0,08 m	0,25	0,98	180 s/m	Médio	0,4	641	1100 J/(kg·K)	0,95	0,8	0,4	0,01	0,2%	0,2 m, 0,1hr	0,70	-	-	Stav and Lawson, 2012.
0,12 m	-	-	-	0,96	-	Médio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	R=0,36 m ² .K/W	-	Scherer, 2014.
-	-	0,001 m	0,3	0,95	-	-	0,59 W/mK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	Larsen, Filippín and Lesino, 2014.
-	2,0	0,30 m	0,05	0,95	160 s/m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2/0,5	Larsen, Filippín and Lesino, 2015.
0,15 m	-	-	0,15-0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Djedjig, Bozonnet and Belarbi, 2015.
0,27 m	1,85	-	-	-	-	-	-	-	23.10–25.71	-	-	-	-	0,25%	-	-	-	-	Jänicke et al., 2015.
0,06 m	3,0	0,08 m	0,22	0,95	180 s/m	Médio	0,4 W/mK	641 kg/m ³	1100 J/(kg·K)	0,95	0,8	0,4	0,01	0,2%	-	-	-	-	Carlos 2015.
-	2,0	0,20 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	Malys, Musy and Inard, 2015.
-	-	0,03 m	-	-	-	Bruta	0,05 W/mK	1201 kg/m ³	100 J/kgK	0,9	0,7	-	-	-	-	-	-	0,25/0,40/0,55/0,70/0,85/100	Allan and Kim, 2016.
-	2,0-3,0	-	-	0,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	Afshari, 2017.
0,20 m	4,0	0,08 m	0,50	0,80	300 s/m	Muito bruta	0,20 W/mK	1500 kg/m ³	1100 J/kgK	0,9	0,7	0,30	0,10	0,30	-	0,40	R=0,420 m ² .K/w	-	Olivieri et al., 2017.

-	2,0-3,0	0,30 m	-	0,98	-	-	-	-	23.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lin et al., 2019
0,3/0,6 015/0, 55 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Pérez, et al., 2021.
0,35 m	3,5	0,15 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55	-	-	-	-	0,3	Peng et al., 2020.
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3/ 0,6	Lesjak, Pajek, and Košir, 2020.
-	-	-	-	-	-	-	0,36 W/mK	533.28 0 kg/m ³	2.8 J/kgK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Widiastuti wt al., 2020.
0,20 m	3,2	0,038 m	-	0,85	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	Perera et al., 2021.
0,25 m	3,0-5,0	0,5 m	-	-	-	-	0,34 W/mK	656 kg/m ³	2252 J/kgK	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20 /0,2 5	Arengghi, Perra and Caffi, 2021.
-	-	0,08 m	-	-	-	-	0,4 W/mK	641 kg/m ³	1100 J/kgK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bano and Dervishi, 2021.
0,16 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50	Faezeh et al., 2021.
-	1,5	-	-	0,95	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	Li and Zheng, 2022.

Legenda dos termos:

Alt.	Altura da planta	Cond. s	Condutividade do solo seco	Cont. 3	Conteúdo inicial de umidade volumétrica da camada do solo
IAF	Índice de área foliar	Dens. s	Densidade do solo seco	Tax. i	Taxa diária de irrigação
Esp.	Espessura do substrato	Cal.	Calor específico do solo	Abs. s.	Absorbância solar
Refl.	Refletividade da folha	Abs. t.	Absorbância térmica	Res. t	Resistência térmica
Emis.	Emissividade	Abs. s.	Absorbância solar	Trans.	Transmitância solar
Resi.	Resistencia estomática	Cont. 1	Umidade volumétrica de saturação da camada de solo		
Rugs.	Rugosidade	Cont. 2	Umidade volumétrica residual da camada de solo		
* Vários	Consultar referência				

Fonte: Os autores, 2023.

Embora os trabalhos cite esses parâmetros, raramente trazem a discussão metodológica dos procedimentos utilizados para a sua extração em campo. Os parâmetros físicos são mais simples de coletar, por isso aparecem com maior frequência na metodologia dos estudos, e com procedimentos fáceis de executar. No entanto, a extração dos parâmetros térmicos da vegetação, não são declarados ou explicitados pelos autores nesses estudos. Isso dificulta a continuidade de trabalhos nessa temática, o que demonstra a importância de explorar métodos mais precisos e adequados.

Assim, como já foi relatado por outros autores, para a evolução desses estudos é de suma importância ter a disponibilidade de um banco de dados botânicos que possa servir de biblioteca para rodar a simulação de novos estudos. Além disso, é necessário ampliar a variabilidade de parâmetros e espécies para que seja possível a simulação de outras condições físicas das plantas, como por exemplo: percentual de fechamento foliar de espécies caducas e perenes, massa vegetada, forma de fixação no suporte, características da lâmina foliar, e estudar espécies em outros climas, permitindo ampliar a regionalidade das pesquisas.

O Quadro 8 apresenta todos os **software** que estão sendo utilizados em pesquisas e que atualmente permitem a modelagem e configuração de parâmetros de sistemas vegetados. Ao comparar os dois métodos, podemos identificar que 75% dos **software** disponíveis são apenas de modelagem paramétrica e 25% são **software** que focam também na manipulação e criação de códigos para simulação de jardins verticais. Entre estes **software** alguns *plug-ins* rodam como mecanismo de simulação, outros servem de interface gráfica para modelagem e manipulação do código e modelo, e alguns focam especificamente na simulação da vegetação em áreas urbanas.

Quadro 8 - Software utilizados para modelagem e simulação de jardins verticais

Método	Software	Ref.
Simulação e modelagem paramétrica 53 %	<i>DesignBuilder</i>	Scherer, M. J. (2014), Lin, H.; Xiao, Y.; Musso, F.; Lu, Y. (2019), Li, Z.; Chow, D. H.C.; Yao, J.; Zheng, X.; Zhao, W. (2019), Lesjak, V.; Pajek, L.; Košir, M. (2020), Parhizkar, H.; Khoraskani, R. A.; Tahbaz, M. (2020), Bano, P.; Dervishi, S. (2021)

Continua...

Continuação...

	<i>Energy Plus</i>	Stav, Y. Lawson, G. (2012), Susorova, I.; Angulo, M.; Bahrami, P.; Brent, S. (2013), Scherer, M. J. (2014), Carlos, J. S. (2015), Larsen, S. F.; Filippín, C.; Lesino, G. (2014), Larsen, S. F.; Filippín, C.; Lesino, G. (2015), Dahanayake, K. W.D.; Kalani C.; Chow, Cheuk L. (2017), Olivieri, F.; Grifoni, R. C.; Redondas, D.; Sánchez-R. J. A.; Tascini, S. (2017), Li, Z.; Chow, D. H.C.; Yao, J.; Zheng, X.; Zhao, W. (2019), Assimakopoulos, M.-N.; De Masi, R. F.de R. F.; Papadaki, D.; Ruggiero, S. (2020), Lesjak, V.; Pajek, L.; Košir, M. (2020), Parhizkar, H.; Khoraskani, R. A.; Tahbaz, M. (2020), Arengi, A.; Perra, C.; Caffi, M. (2021), Bano, P.; Dervishi, S. (2021)
	<i>Envi-met</i>	Jänicke, B.; Meier, F.; Hoelscher, M.-T.; Scherer, D. (2015), Li, J.; Zheng, B.; Shen, W.; Xiang, Y.; Chen, X.; Qi, Z. (2019), Peng, L. L. H.; Jiang, Z.; Yang, X.; He, Y.; Xu, T.; Chen, S. S. (2020), Bandurski, K.; Bandurska, H.; Kazimierczak-Grygiel, E.; Koczyk, H. (2020), Ornam, K.; Triyadi, S.; Wonorahardjo, S.; Sutjahja, I. M.; Martonohadi, P.; Assegaf, S.; Kimsan, M. (2021), Perera, T. A.N.T.; Jayasinghe, G. Y.; Halwatura, R. U.; Rupasinghe, H. T. (2021), Li, J.; Zheng, B. (2022)
	<i>SOLWEIG</i>	Jänicke, B.; Meier, F.; Hoelscher, M.-T.; Scherer, D. (2015)
	<i>Ray Man</i>	Jänicke, B.; Meier, F.; Hoelscher, M.-T.; Scherer, D. (2015)
	<i>TRNSYS</i>	Djedjig, R.; Bozonnet, E.; Belarbi, R. (2015), Bandurski, K.; Bandurska, H.; Kazimierczak-Grygiel, E.; Koczyk, H. (2020), Azkorra-Larrinaga, Z.; Erkoreka-González, A.; Flores-Abascal, I.; Pérez-Iribarren, E.; Romero-Antón, N. (2022)
	<i>SOLENE</i>	Malys, L.; Musy, M.; Inard, C. (2016)
	<i>Solidworks</i>	Widiastuti, R. Caesarendra, W.; Zaini, J. (2020), Widiastuti, R.; Caesarendra, W.; Zaini, J. (2019)
	<i>IES VE</i>	Bagheri, M. F.; Fort, M. J. M.; Navarro, D. I.; Redond. D. E. (2021)
	<i>CFD</i>	Lin, H.; Xiao, Y.; Musso, F.; Lu, Y. (2019), Widiastuti, R. Caesarendra, W.; Zaini, J. (2020), Widiastuti, R.; Caesarendra, W.; Zaini, J. (2019)
Modelagem algorítmico visual 16 %	<i>Matlab</i>	Afshari, A. (2017), Pérez, G.; Aleandre, E.; Joan, R. R.; Coma, J.; Roger, A.; Bernart, M.; Cabeza, L.; Eduard, G. (2021)
	<i>Simscape</i>	Afshari, A. (2017)
Modelagem algorítmico-paramétrica 31%	<i>Rhinoceros + Grasshopper</i>	Li, X. S.; Byrne, U.; Kesik, T. (2014), Allan, S.; Soon, T.; Kim, H. (2016), Olivieri, F.; Grifoni, R. C.; Redondas, D.; Sánchez-R. J. A.; Tascini, S. (2017)
	<i>Revit + Energy Analysis</i>	Sudimac, B. S.; Ignjatovic, N. D. C.; Ignjatovic, D. M. (2018)
	<i>Revit + Dynamo</i>	Briscoe, D. (2014), Briscoe, D. (2018), Briscoe, D. (2020)

Fonte: Os autores, 2023.

Pela revisão, o *EnergyPlus* tem sido o mais utilizado para simular os jardins verticais, seguido pelo o *Envi-met*, um *software* voltado para análises térmicas de áreas urbanas e que recentemente disponibilizou um módulo específico para parede viva que permite simular os efeitos térmicos da vegetação da fachada no clima externo. E na sequência temos o *Rhinoceros* com o *plugin Grasshopper*.

Alguns *software* como *EnergyPlus* e *Envi-met*, trazem módulos específicos para configuração e entrada dos parâmetros referentes à vegetação. Outros como *SOLWEIG*, *Ray Man*, e *SOLENE*, são *software* que permitem a inclusão de parâmetros da vegetação. No entanto, não são específicos para jardim vertical, e sim para arbustos, como árvores. Como o *TRNSYS* e o *CFD* simulam fluidos no geral, as propriedades de entrada são focadas no efeito térmico causado pela vegetação após sua aplicação em um modelo, ou seja, não permite a configuração das propriedades da vegetação para simulação. Quanto ao *Matlab* e *Simscape*, ambos são *software* de modelagem algorítmica visual e trabalham juntos. E por fim, os *software* *Rhinoceros* e *Revit* com seus plug-ins *Grasshopper* e *Dynamo* focam na modelagem algorítmico-paramétrica com códigos visuais, e utilizam como motor de simulação o *EnergyPlus* para configurar e simular os parâmetros da vegetação.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos 10 anos, a simulação paramétrica de superfícies vegetadas tem evoluído e ganhado destaque em pesquisas que buscam ter uma prévia da eficácia do sistema, antes da execução do projeto. No entanto, apesar de haver algumas contribuições nesse campo, esse processo de modelagem ainda é muito limitado. Os modelos disponíveis não são específicos para as características de jardins verticais e permitem a configuração de poucos parâmetros de vegetação, com foco principal no efeito térmico da planta.

Ainda que estudos sobre a simulação paramétrica da vegetação apresentem resultados plausíveis, é relevante considerar que há limitações em simular a vegetação como um elemento estático, sem considerar o dinamismo e a transformação da folhagem ao longo do ano. Ao modelar e simular esses elementos, precisamos levar em conta suas condições fisiológicas como, perda de folhas, deficiência nutricional, adaptação local e de plantio, assim como possíveis doenças

que podem afetar o desenvolvimento da cobertura foliar. Portanto, não podemos assegurar que suas propriedades físicas e fisiológicas sejam sempre estáveis.

Em paralelo às restrições encontradas nas simulações paramétricas, a modelagem algorítmico-paramétrica vem apresentando alguns avanços referentes às condições dinâmicas da vegetação como: previsão do crescimento de árvores para compor elementos estruturais de fachadas; métodos para estudar a configuração geométrica de paredes verdes e contabilizar seus custos; métodos para prever a cobertura foliar da vegetação a longo prazo e propostas de fabricação de módulos de paredes verdes que permitem estimular o crescimento de espécies vegetais. No entanto, ainda há ausência de pesquisas que utilizem dados físicos da vegetação para avaliar com modelagem algorítmico-paramétrica questões estéticas, durabilidade, ou então diretrizes para sua construção, envolvendo estudos que somem a massa vegetada da planta para análises estruturais.

Por fim, embora a revisão tenha apresentado uma quantidade maior de estudos focados no efeito térmico e energético desses sistemas, essa tese não pretende seguir essa abordagem, e sim ampliar o conhecimento referente à modelagem e simulação do comportamento da vegetação durante seu desenvolvimento na fachada, buscando assim, preencher as lacunas citadas acima. Além disso, essa tese focou apenas no sistema de jardim vertical de tipologia fachada verde, uma vez que este permite verificar o parâmetro físico referente à cobertura foliar para sombreamento, um dos interesses dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABEL SUAREZ, P.; CORREA, É.; CANTÓN, M. A. Thermal performance of traditional east facing green facades in tract housing located in arid climates. **Habitat Sustentable**, v. 10, n. 2, p. 82–93, 2020.
- ADRIAENSSENS, S.; RHODE-BARBARIGOS, L.; KILIAN, A.; BAVEREL, O.; CHARPENTIER, V.; HORNER, M.; BUZATU, D. Dialectic form finding of passive and adaptive shading enclosures. **Energies**, v. 7, n. 8, p. 5201-5220, 2014.
- AFSHARI, A. A new model of urban cooling demand and heat island—application to vertical greenery systems (VGS). **Energy and Buildings**, v. 157, p. 204–217, 2017.
- AISH, R.; WOODBURY, R. Multi-level interaction in parametric design. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 3638, p. 151–162, 2005.
- AKOS, G.; PARSONS, R. **Foundations: The Grasshopper Primer**. Third Edition. New York, 2014. Disponível em: <<http://modelab.is/grasshopper-primer/>>. Acesso em: 03 de jul. 2021.
- ALLAN, S. S. T.; KIM, H.-I. A Study of Workflow for Simulations of Vertical Greenery Systems. **Architecture Research**, v. 6, n. 6, p. 142–153, 2016.
- ARENCHI, A.; PERRA, C.; CAFFI, M. Simulating and comparing different vertical greenery systems grouped into categories using energyplus. **Applied Sciences**, v. 11, n. 11, 2021.
- ASCIONE, F.; ROSA, F. M.; MARGHERITA, M.; SILVIA, R.; GIUSEPPE, P. V. Green walls, a critical review: Knowledge gaps, design parameters, thermal performances and multi-criteria design approaches. **Energies**, v. 13, n. 9, 2020.
- ASSIMAKOPOULOS, M.-N.; MASI, R. F.; ROSSI, F.; PAPADAKI, D.; RUGGIERO, S. Green wall design approach towards energy performance and indoor comfort improvement: A case study in Athens. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 9, 2020.
- BANDURSKI, K.; BANDURSKA, H.; KAZIMIERCZAK-GRYGIEL, E.; KOCZYK, H. The green structure for outdoor places in dry, hot regions and seasons-providing human thermal comfort in sustainable cities. **Energies**, v. 13, n. 11, 2020.
- BANO, P.; DERVISHI, S. The impact of vertical vegetation on thermal performance of high-rise office building facades in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 236, p. 23, 2021.
- CRUCIOL BARBOSA, M. C.; FONTES, M. S. G. DE C. Jardins verticais: modelos e técnicas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 7, n. 2, p. 114, 2016.
- BEGHINI, L.; BEGHINI, A.; KATZ, N.; BAKER, W.; PAULINO, G. **Connecting architecture and engineering through structural topology optimization** in Engineering Structures, vol 59, pg 716-726. Editora Elsevier, 2014.
- BIANCO, L.; SERRA, V.; LARCHER, F.; PERINO, M. Thermal behaviour assessment of a novel vertical greenery module system: first results of a long-term monitoring campaign in an outdoor test cell. **Energy Efficiency**, v. 10, n. 3, p. 625–638, 2017.
- BLANCO, I.; CONVERTINO, F.; SCHETTINI, E.; VOX, G. Energy analysis of a green façade in summer: an experimental test in Mediterranean climate conditions. **Energy and Buildings**, v. 245, p. 111076, 2021.
- BLANCO, I.; SCHETTINI, E.; VOX, G. Effects of vertical green technology on building surface temperature. **International Journal of Design and Nature and Ecodynamics**, v. 13, n. 4, p. 384–394, 2018.

- BRERETON, P.; KITCHENHAM, B. A., BUDGEN, D., TURNER, M.; KHALIL, M.L. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. **Journal of Systems and Software**, Software Performance5th International Workshop on Software and Performance. v. 80, n. 4, p. 571–583, abril 2007.
- BRISCOE, D. Living Wall. Information Workflow and Collaboration. Computing for a better tomorrow - Proceedings of the 36th eCAADe Conference. **Anais...** v 1, p.207 – 202, 2018.
- BRISCOE, D. Living wall: Digital design and implementation. **Journal of Digital Landscape Architecture**, n. 5, p. 646–653, 2020.
- BRISCOE, D. Parametric Planting Green Wall System Research + DESIGN USING BIM. ACADIA 2014. **Anais...**2014
- BUKHARI, F. A. **A Hierarchical Evolutionary Algorithmic Design (HEAD) system for generating and evolving building design models**. 2011. Tese de Doutorado. Queensland University of Technology.
- BURRY, M; KOLAREVIC, B. Between intuition and process: parametric design and rapid prototyping. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**, p. 148-162, 2003.
- CAETANO, I.; LEITÃO, A. Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. **Architectural Science Review**, v. 63, n. 2, p. 165–174, 2020.
- CAETANO, I.; LEITÃO, A. Integration of an algorithmic BIM approach in a traditional architecture studio. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 3, p. 327-336, 2019.
- CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 287–300, 2020.
- CALDAS, Luisa. Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. **Advanced Engineering Informatics**, v. 22, n. 1, p. 59-70, 2008.
- CAMERON, R. W. F.; TAYLOR, J. E.; EMMETT, M. R. What's "cool" in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. **Building and Environment**, v. 73, p. 198–207, 2014.
- CAMPOS, F. M. DE. **Estudo do uso de parametrização e simulações computacionais nas etapas iniciais do processo de projeto visando à otimização**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, 2017.
- CARLOS, J. S. Simulation assessment of living wall thermal performance in winter in the climate of Portugal. **Building Simulation**, v. 8, n. 1, p. 3–11, 2015.
- CARPO, M. **The digital turn in architecture 1992-2012**. Ed. John Wiley & Sons, 2013.
- CELANI, G.; GIACAGLIA, M. E.; KOWALTOWSKI, D. C. C. K. CAD - o lado criativo duas experiências educacionais visando mudar a forma como estudantes de arquitetura usam o CAD. Pós. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, 2003.
- CELANI, G.; VAZ, C.; PUPO, R. Sistemas generativos de projeto: classificação e reflexão sobre o ponto de vista da representação e dos meios de produção. **Revista Brasileira de Expressão Gráfica**. V. 1, n. 1, 2013.

- CELANI, G.; VAZ, E. C. V. Scripts Em Cad E Ambientes De Programação Visual Para Modelagem Paramétrica: uma Comparação Do Ponto De Vista Pedagógico. **Tic**, v. 1, n. 1, 2011.
- CELANI, M. G. C. **Beyond analysis and representation in CAD: a new computational approach to design education**. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology. 2002.
- CHAIPONG, S. Indoor Plant Species Survival Under Different Environment in Indoor Vertical Garden. **International Journal of GEOMATE**, v. 18, n. 68, p. 15–20, 2020.
- CHÈRAUD, F. Beyond design freedom. Providing a set-up for material modelisation within Kangaroo Physics. **Proceedings...**, v. 1, p. 459–468, 2020.
- COMA, J.; PÉREZ, G.; GRACIA, A.; BURÉS, S.; URRESTARAZU, M.; CABEZA, L. F. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. **Building and Environment**, v. 111, p. 228–237, 2017.
- CONVERTINO, F.; VOX, G.; SCHETTINI, E. Convective heat transfer in green façade system. **Biosystems Engineering**, v. 188, p. 67–81, 2019.
- CONVERTINO, F.; VOX, G.; SCHETTINI, E. Thermal barrier effect of green façades: Long-wave infrared radiative energy transfer modelling. **Building and Environment**, v. 177, n. April, p. 106875, 2020.
- COSTA, F. M. **Comparação estatística de duas séries de material particulado (MP10) na cidade de São Paulo**. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - UFL, Lavras, 2010.
- DAHANAYAKE, K. W. D. K. C.; CHOW, C. L. Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 47–59, 2017.
- DAVIS, D.; PETERS, B. Design Ecosystems: Customising the Architectural Design Environment with Software Plug-ins. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p. 124-131, mar. 2013.
- DIMOPOULOS, G. KONTAXAKIS, D.; SYMEONIDOU, I.; TSINIKAS, N. From analog to digital: Double curved lightweight structures in architectural design education. **Proceedings...**, v. 2, p. 181–188, 2020.
- DINO, I. Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. **METU Journal of Faculty of Architecture**, v. 29, n. 1, p. 207-224, 2012.
- DUNNETT, N. KINGSBURY, N. **Planting green roofs and living walls**. In: Timber Press, Inc. p. 254. Portland, Oregon, USA. 2008.
- DURAND, J. N. L. **Précis des leçons d'architecture données à l'École polytechnique**. chez l'auteur, à l'Ecole polytechnique, 1809.
- FAGUNDES, C. V. M. **Sistema generativo como ferramenta de otimização do processo exploratório do Design de Produto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.
- FISCHER, T.; HERR, C. M. Teaching generative design. In: **Proceedings** of the 4th International Conference on Generative Art. Milan, Italy. 2001.
- FLORIO, W. Modelagem Paramétrica, Criatividade e Projeto: duas experiências com estudantes de arquitetura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 6, n. 2, p. 43-66, 2011.

- FLORIO, W. Notas sobre pensamento e cognição em projetos paramétricos. **Encontro da associação nacional de pesquisa e pós-graduação em arquitetura e urbanismo**, v. 2, 2012.
- FRAZER, J. Parametric Computation: History and future. **Architectural Design**, Vol 86, p. 18.23. 2016.
- FRAZER, J.; FRAZER, J.; LIU, X.; TANG, M.; JANSSEN, P. **Generative and evolutionary techniques for building envelope design** in *Generative Art 2002: 5th International Generative Art Conference GA2002*. Itália, Milão, dezembro de 2002.
- GARBER, R. **BIM design: realising the creative potential of building information modelling**. Ed. John Wiley & Sons, 2014.
- GENGNAGEL, C.; MAGNA, R.; RAMSGAARD, T. M.; TAMKE, M. Shaping hybrids – Form finding of new material systems. **International Journal of Architectural Computing**, v. 16, n. 2, p. 91–103, 2018.
- GHAZALLI, A. J. BRACK, C.; BAI, X.; SAID, I. Physical and Non-Physical Benefits of Vertical Greenery Systems: A Review. **Journal of Urban Technology**, v. 26, n. 4, p. 53–78, 2019.
- GLASSMAN, E. J.; REINHART, C. Otimização de fachada usando projeto paramétrico e cenários climáticos futuros. In: **Anais da 13ª Conferência da International Building Performance Simulation Association, Chambéry, França**. p. 26-28. 2013.
- GLASSMAN, E.; REINHART, C. F. Facade Optimization using Parametric Design and Future Climate Scenarios. In: **13th CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 2013, Chambéry, França. Anais...** Chambéry, França, 2013.
- GUILLAUME, G.; GAUVREAU, B.; L'HERMITE, P. Numerical study of the impact of vegetation coverings on sound levels and time decays in a canyon street model. **Science of the Total Environment**, v. 502, p. 22–30, 2015.
- GUO, J.; XU, S.; YAN, D. M.; CHENG, Z.; JAEGER, M.; ZHANG, X. Realistic procedural plant modeling from multiple view images. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 26, n. 2, p. 1372–1384, 2020.
- HENSEL, M; MENGES, A; WEINSTOCK, M. **Techniques and Technologies in Morphogenetic Design** (Architectural Design March April 2006 Vol. 76 No. 2). 2006.
- HUMPPPI, H; OSTERLUND, T. Algorithm-aided BIM. eCAADe. **Anais...**p. 601-609. 2016.
- HUNTER, A. M.; WILLIAMS, N. S. G.; RAYNER, J. P.; AYE, L.; HES, D.; LIVESLEY, S. J. Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. **Ecological Engineering**, v. 63, p. 102–113, 2014.
- IWAMOTO, L. **Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.
- JÄNICKE, B.; MEIER, F.; HOELSCHER, M. T.; SCHERER, D. Evaluating the effects of façade greening on human bioclimates in a complex Urban environment. **Advances in Meteorology**, v. 2015, 2015.
- KENAI, M. A.; LIBESSART, L.; LASSUE, S.; DEFER, D. Impact of plants obscuration on energy balance: Theoretical and numerical study. **Journal of Building Engineering**, v. 29, 2020.

- KÖHLER, M. Green facades: a view back and some visions. **Urban Ecosystems, Neubrandenburg**, v.11, p. 423-436, 2008.
- KOLAREVIC, B. Digital Morphogenesis and Computational Architectures. SIGRADIS - Constructing the digital space. **Anais...** p. 1–6, 2000.
- KONTOLEON, K, J; EUMORFOPOULOU, E, A. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. **Building and Environment**, 45(5), pp.1287-1303, 2010.
- KOYAMA, T.; YOSHINAGA, M.; HAYASHI, H.; MAEDA, K.; YAMAUCHI, A. Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. **Building and Environment**, v. 66, p. 96–103, 2013.
- LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. **Solar Energy**, v. 121, p. 56–67, 2015.
- LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. Thermal simulation of a double skin façade with plants. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1763–1772, 2014.
- LEACH, N. **Parametrics Explained**. Next Generation Building, v.1, 2014, p. 1–10.
- LEENHARDT, J.; LAMBERTINI, A. **Vertical Gardens**. London: Verbavolant, 2007.
- LESJAK, V.; PAJEK, L.; KOŠIR, M. Indirect green façade as an overheating prevention measure. **Gradjevinar**, v. 72, n. 7, p. 569–583, 2020.
- LI, C.; WEI, J.; LI, C. Influence of foliage thickness on thermal performance of green façades in hot and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 72–87, 2019a.
- LI, J.; ZHENG, B.; SHEN, W.; XIANG, Y.; CHEN, X.; QI, Z. Cooling and energy-saving performance of different green wall designs: A simulation study of a block. **Energies**, v. 12, n. 15, 2019b.
- LI, X. S.; BYRNE, U.; KESIK, T. Experimental design of energy performance simulation for building envelopes integrated with vegetation. Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design. **Anais...**Tampa, Florida, USA: 2014.
- LI, Z.; CHOW, D. H.C.; YAO, J.; ZHENG, X.; ZHAO, W. The effectiveness of adding horizontal greening and vertical greening to courtyard areas of existing buildings in the hot summer cold winter region of China: A case study for Ningbo. **Energy and Buildings**, v. 196, p. 227–239, 2019c.
- LIAO, H. **Fractal simulation of plants**. Monograph. Department Of Mathematics. Växjö, Suécia. 2020.
- LIN, H.; XIAO, Y.; MUSSO, F.; LU, Y. Green façade effects on thermal environment in transitional space: Field measurement studies and computational fluid dynamics simulations. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 20, p. 1–21, 2019.
- LOH, S. Paredes vivas - uma maneira de tornar o ambiente construído mais verde. **Guia de design de ambiente**, p. 1-7, 2008.
- LOTFI, Y. A.; REFAAT, M.; EL ATTAR, M.; SALAM, A. A. Vertical gardens as a restorative tool in urban spaces of New Cairo. **Ain Shams Engineering Journal**, 2020.
- LORENZI, H.; SOUZA, H. M. **Plantas ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras**. 3. ed. Nova Odessa: Plantarum, 2001. 1088 p.
- LUDWIG, F. BAUBOTANIK - Designing Growth Processes. (U. of Stuttgart, Introduction, Eds.) Symposium "Form-Rule | Rule-Form 2014". **Anais...**2014.

LUDWIG, F. **Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf**. Universität Stuttgart zur Erlangung, 2012.

LUDWIG, F. **Lebende Konstruktionen - Eine historische Einführung in die Baubotanik**. **ResearchGate**, abril. 2018.

LUDWIG, F.; MIHAYLOV, B.; SCHWINN, T. **Emergent Timber: A tool for designing the growth process of Baubotanik structures**. 2013.

LUDWIG, F.; SCH, D.; VEES, U. **Baubotanik - Building Architecture with Nature**. 1st European Green Urban Infrastructure Conference. **Anais...**Vienna: 2015.

MAGLIOCCO, A.; PERINI, K. The perception of green integrated into architecture: installation of a green facade in Genoa, Italy. **AIMS Environmental Science**. **Anais...**2015.

MALYS, L.; MUSY, M.; INARD, C. Direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, greenwalls and green roofs. **Energies**, v. 9, n. 1, 2016.

MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J. Green wall systems: A review of their characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 863–871, 2015.

MARTINO, J. **Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura**. 2015. 282 f. Tese de Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

MASHALY, I. A.; RASHED, Y. M.; ADEL, M.; NASSAR, K. **The effect of vegetation on daylight availability**. Building Simulation Applications. **Anais...**2015

MAZZALI, U.; PERON, F.; SCARPA, M. Thermo-physical performances of living walls via field measurements and numerical analysis. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**. **Anais...**2012.

MCCORMACK, J; DORIN, A; INNOCENT, T. **Generative Design: A Paradigm for Design Research**. 2004.

McNEEL, R. **McNeel North America**. Disponível em: <<https://www.mcneel.com/en/>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

MEDL, A; STANGL, R; FLORINETH, F. Vertical greening systems—A review on recent technologies and research advancement. **Building and Environment**, 125, pp.227-239, 2017.

MEMBRANA PARAMÉTRICA. **A importância de Frei Otto e Gaudi para o período moderno**. 2019. Disponível em: <<https://membranaparametrica.com/otto-gaudi/>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MITCHELL, W. J. From sketchpad to city of bits. **Cadria**. **Anais...**Kumamoto: 2006.

MITCHELL, W. J. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 2, n. 2, p. 127–150, 1975.

MITCHELL, W. J. **A lógica da arquitetura: Design, computação e cognição**. Imprensa do MIT, 1990.

MORELLI, D. D. DE O. **Desempenho de paredes verdes como estratégia bioclimática**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, p. 1–161, 2016.

MUÑOZ, L. S.; BARBOSA, M. C.; FONTES, M. S. G. DE C.; FARIA, J. R. G. Desempenho térmico de jardins verticais de tipologia fachada verde. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, v. 10, p. 1–20, 2019.

ODUM, E. P.; EKOLOGI, Dasar-Dasar. Universitas Gajah Mada Press: Yogyakarta, Indonesia, 1993. **Bahasa**.

OLIVIERI, F. et al. An experimental method to quantitatively analyse the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall. **Energy and Buildings**, v. 150, p. 132–148, 2017.

OLIVIERI, F.; OLIVIERI, L.; NEILA, J. Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate. **Building and Environment**, v. 77, p. 61–76, 2014.

OXMAN, R. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, v. 29, n. 2, p. 99–120. 2008.

PARÂMETRO. In: **MICHAELIS moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/index.php?lingua=portugues-portugues&palavra=parametro>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

PARHIZKAR, H.; KHORASKANI, R. A.; TAHBAZ, M. Double skin façade with Azolla; ventilation, Indoor Air Quality and Thermal Performance Assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119313, 2020.

PATIÑO, E; MAYA, J. Construction of a repertoire of analog form-finding techniques as a basis for computational morphological exploration in design and architecture. In: **International Conference on Computational Intelligence in Music, Sound, Art and Design**. Springer, Cham. p. 50-63. 2018.

PAZINI, E. Z. **Arquitetura Paramétrica: mensuração do fenômeno de engajamento no processo de projeto contemporâneo**. Faculdade Meridional - IMED, 2018.

PENG, L. L. H.; JIANG, Z.; YANG, X.; HE, Y.; XU, T.; CHEN, S. S. Cooling effects of block-scale facade greening and their relationship with urban form. **Building and Environment**, v. 169, n. November 2019, p. 106552, 2020.

PÉREZ GALLARDO, N.; ROGÉRIO, A.; NEVES, G. Z. F.; VECCHIA, F. A.; RORIZ, V. F. Reacción frente al frío de edificaciones con envolventes vegetales para climas tropicales. Fachadas verdes y cubiertas ajardinadas TT - Thermal Response to cold in buildings with Green covers for tropical climate. Green facades and green roofs. **Revista ingeniería de construcción**, v. 33, n. 1, p. 15–28, 2018.

PÉREZ, G.; COMA, J.; MARTORELL, I.; CABEZA, L. F. Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 139–165, 2014.

PÉREZ, G.; COMA, J.; SOL, S.; CABEZA, L. F. Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. **Applied Energy**, v. 187, p. 424–437, 2017.

PÉREZ, G; RINCÓN, L; VILA, A; GONZÁLEZ J, M.; CABEZA, L, F. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. **Applied Energy**, 88, pp. 4854-4859, 2011.

- PERINI, K.; ROSASCO, P. Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. **Building and Environment**, v. 70, p. 110–121, 2013.
- PERINI, K; OTTELÉ, M; HAAS, E, M; RAITERI, R. Greening the building envelope, façade greening and living wall systems. **Open Journal of Ecology**, 1(01), p.1, 2011.
- PULSELLI, R. M.; PATRIZI, N.; PULSELLI, F. M.; BASTIANONI, S. A sustainability evaluation of vertical greenery systems based on energy. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 165, p. 229–238, 2012.
- PULSELLI, R. M.; PULSELLI, F. M.; MAZZALI, U.; PERON, F.; BASTIANONI, S. Energy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems. **Energy and Buildings**, v. 73, p. 200–211, 2014.
- RADIĆ, M.; DODIG, M. B.; AUER, T. Green facades and living walls-A review establishing the classification of construction types and mapping the benefits. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 17, p. 1–23, 2019.
- RISBERG, D; MIKAEL, R; LARS, W. Investigation of thermal indoor climate for a passive house in a sub-Arctic region using computational fluid dynamics. **Indoor and Built Environment** 28, no. 5: 677-692. 2019.
- RUTTEN, D. **Grasshopper Algorithmic Modeling for Rhino**. Disponível em: <<http://www.grasshopper3d.com/>>. Acesso em: 03 jul. 2021.
- SAFIKHANI, T; ABDULLAH, A, M; OSSEN, D, R; BAHARVAND, M. A review of energy characteristic of vertical greenery systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 40, pp.450-462, 2014.
- SCARPA, M.; MAZZALI, U.; PERON, F. Modeling the energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate. **Energy and Buildings**, v. 79, p. 155–163, 2014.
- SCHERER, M. J. **Cortinas Verdes na arquitetura: desempenho no controle solar e na eficiência energética de edificações**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- SCHERER, M; FEDRIZZI, B, M. **Arquitetura e paisagismo vertical: Alternativa estética e de qualificação ambiental**. Vitruvius. 2016. Disponível em:<<https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.188/5907>>. Acesso em 25 de junho de 2021.
- SCHLEICHER, S.; MAGNA, R. Bending-active plates. **ACADIA 2016: Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines - Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture**, p. 260–269, 2016.
- SEDREZ, M.; MARTINO, J. The future of architects' digital records: how to preserve algorithmic design. SIGRADI. **Anais...** 2018.
- SHARP, R. **Introduction to Green Walls: Technology, Benefits & Design**. In: Green Roofs for Healthy Cities, 2008. Disponível em <http://www.greenroofs.net/components/com_lms/flash/Green%20Walls%20Intro%200908b.pdf>, acesso em 12 mai. 2021.
- STAV, Y.; LAWSON, G. Vertical vegetation design decisions and their impact on energy consumption in subtropical cities. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 155, p. 489–500, 2012.
- STEC, W. J.; VAN PAASSEN, A. H. C.; MAZIARZ, A. Modelling the double skin façade with plants. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 5, p. 419–427, 2005.

- STEC, W.; VAN PAASSEN, D. Defining the performance of the double skin facade with the use of the simulation model. In: **8th International IBPSA Conference Building Simulation**. p. 1243-1250. 2003.
- SUDIMAC, B. S.; IGNJATOVIC, N. D. C.; IGNJATOVIC, D. M. Experimental study on reducing temperature using a modular system for vegetation walls made of perlite concrete. **Thermal Science**, v. 2018, 2018.
- ŠUKLJE, T.; HAMDY, M.; ARKAR, C.; HENSEN, J. L. M.; MEDVED, S. An inverse modeling approach for the thermal response modeling of green façades. **Applied Energy**, v. 235, n. November 2018, p. 1447–1456, 2019.
- ŠUKLJE, T.; MEDVED, S.; ARKAR, C. On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. **Energy**, v. 115, p. 1055–1068, 2016.
- SULPIZIO, C.; FIORE, A.; DEMARTINO, C.; VANZI, I.; BRISEGHIELLA, B. Optimal design criteriosa for form-finding of double-curved surfaces. **Procedia Manufacturing**, v. 44, n. 2019, p. 28–35, 2020.
- SUSOROVA, I.; ANGULO, M.; BAHRAMI, P.; BRENT S. A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. **Building and Environment**, v. 67, p. 1–13, 2013.
- SUZUKI, S.; KNIPPERS, J. A. N. Topology-driven form-finding. Implementation of an evolving network model for extending design spaces in dynamic relaxation. **Proceedings ...**, p. 489–498, 2017.
- SYMEONIDOU, I. Flexible matter: A real-time shape exploration employing analogue and digital form-finding of tensile structures. **International Journal of Architectural Computing**, v. 14, n. 4, p. 322–332, 2016.
- TERZIDIS, K. **Algorithmic architecture**. Ed. Routledge, 2006.
- WANG, J. W.; POH, C. H.; TAN, C. Y. T.; LEE, V. N.; JAIN, A.; WEBB, E. L. Building biodiversity: Drivers of bird and butterfly diversity on tropical urban roof gardens. **Ecosphere**, v. 8, n. 9, 2017a.
- WANG, S.; DRITSAS, S.; MOREL, P.; HO, K. Clay Robotics: Um processo de fundição de impressão 3D híbrido. In: **Desafios para a inovação tecnológica: uma agenda para o futuro**. CRC Press, p. 83-88. 2017b.
- WANG, S.; LIU, C. H. I.; ZHANG, G. U. O. L. I.; LUO, Q. I. H.; XU, W.; RASPALL, F. Digital planting: Fabrication of Integrated Concrete Green Wall via Additive Manufacturing. **CAADRIA. Anais...Hong Kong**: 2020a.
- WANG, X.; GARD, W.; BORSKA, H.; URSEM, B.; VAN DE K. J. W. G. Vertical greenery systems: from plants to trees with self-growing interconnections. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 5, p. 1031–1043, 2020b.
- WIDIASTUTI, R.; CAESARENDRA, W.; PRIANTO, E.; BUDI, W. S. Study on the leaves densities as parameters for effectiveness of energy transfer on the green facade. **Buildings**, v. 8, n. 10, 2018.
- WIDIASTUTI, R.; CAESARENDRA, W.; ZAINI, J. Observation to building thermal characteristic of green façade model based on various leaves covered area. **Buildings**, v. 9, n. 3, 2019.
- WIDIASTUTI, R.; ZAINI, J.; CAESARENDRA, W. Field measurement on the model of green facade systems and its effect on building indoor thermal comfort. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 166, p. 108212, 2020b.

WIDIASTUTI, R.; ZAINI, J.; WIBOWO, M. A.; CAESARENDRA, W. Indoor thermal performance analysis of vegetated walls based on CFD simulation. **CFD Letters**, v. 12, n. 5, p. 82–90, 2020a.

WONG, N. C. N. H.; TAN, A. Y. K.; TAN, P. Y.; WONG, N. C. N. H. Energy simulation of vertical greenery systems. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 12, p. 1401–1408, 2009.

YANG, F; YUAN, F; QIAN, F; ZHUANG, Z; YAO, J. Summertime thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai. **Sustainable Cities and Society**, 39, pp.43-51, 2018.

ZBOINSKA, M. A. Hybrid CAD/E platform supporting exploratory architectural design. **Computer-Aided Design**, v. 59, p. 64-84, 2015.

CAPÍTULO 3

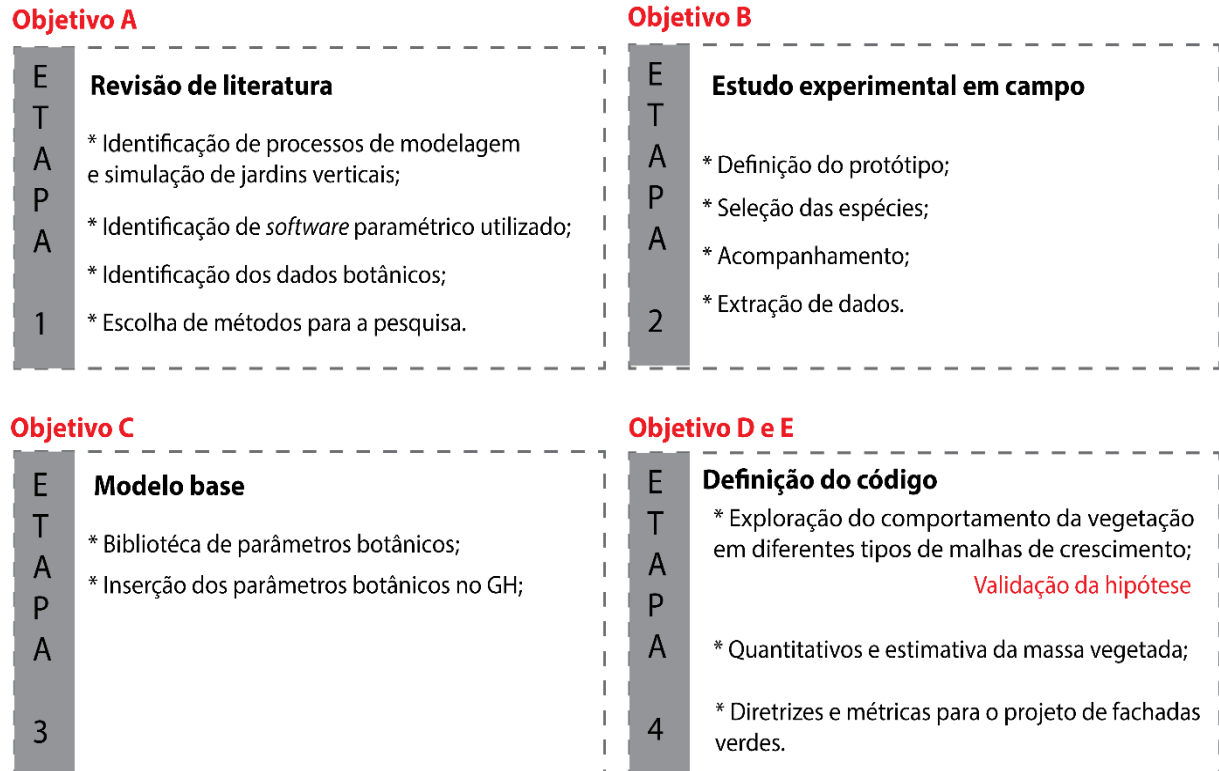
MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentamos todos os métodos e procedimentos adotados para cada etapa da pesquisa. O desenvolvimento metodológico da presente pesquisa é do tipo exploratória e com desenvolvimento experimental (GROAT, 2013) envolvendo etapas de modelagem algorítmico-paramétrica.

3.1 ETAPAS METODOLÓGICAS

Para alcançar o objetivo do trabalho, a pesquisa foi dividida em 4 etapas: (1) Revisão de literatura; (2) Experimento em campo, (3) Definição do modelo base, e (4) Definição do código em modelagem algorítmico-paramétrica. Cada etapa apresenta objetivos específicos a serem concluídos para o correto andamento da pesquisa, e seguem metodologias e procedimentos específicos que serão apresentados nos próximos tópicos. Na Figura 20 apresentamos resumidamente essas etapas.

Figura 20 - Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Os autores, 2023.

3.2 ETAPA 1 - REVISÃO DE LITERATURA

Nesta etapa apresentamos a fundamentação teórica e estado da arte da pesquisa, visando cumprir o objetivo específico A, resultando no Capítulo 2. Como procedimentos metodológicos adotado, inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica para entendimento e recorte da pesquisa, e posteriormente uma metodologia de revisão sistemática (BRERETON et al. 2007) com a finalidade de apresentar o estado da arte do conteúdo publicado nos últimos 10 anos, referente ao tema de jardins verticais com modelagem e simulação paramétrica. Os assuntos abordados para atender ao objetivo da pesquisa consistiram na análise das metodologias aplicadas, *software* paramétricos utilizados e dados botânicos necessários para a configuração desse elemento em ambientes digitais.

Mais informações sobre cada etapa e procedimento dessa metodologia podem ser consultadas no Capítulo 2.

3.3 ETAPA 2 – ESTUDO EXPERIMENTAL EM CAMPO

Esta etapa visou cumprir o objetivo específico B, e teve como objetivo estimar alguns parâmetros físicos de espécies trepadeiras para servir de entrada na modelagem algorítmico-paramétrica do *Grasshopper*. Detalhes da construção dos protótipos, acompanhamento para observação do desenvolvimento das espécies e os parâmetros que foram coletados, serão detalhados nos próximos tópicos. No entanto, antes é importante esclarecer alguns pontos referente ao método adotado como experimental.

Geralmente esse é um método realizado em ambientes controlados, como laboratórios ou casas de vegetação, seguindo um protocolo de análises sistemático. Porém, segundo Yin (2001) existe uma denominação chamada “quase-experimento”, onde algumas variáveis são controladas e outras não. Neste caso, os protótipos podem reproduzir mais ou menos detalhes do objeto real, de acordo com os objetivos da pesquisa e das limitações de execução, podendo ser simplificados. Portanto, esta é a situação deste estudo, uma vez que o experimento não foi executado em laboratório ou seguiu um protocolo de análises rígidas. Estamos trabalhando com uma área aberta a partir de protótipos com escala reduzida e que emulam as condições reais de uma fachada verde. Lembrando que esse método já foi utilizado

anteriormente em outros trabalhos a fim de acompanhar o desenvolvimento de espécies trepadeiras (SCHERER, 2014; MORELLI, 2016; PADOVAN, 2020).

3.3.1 Localização dos protótipos

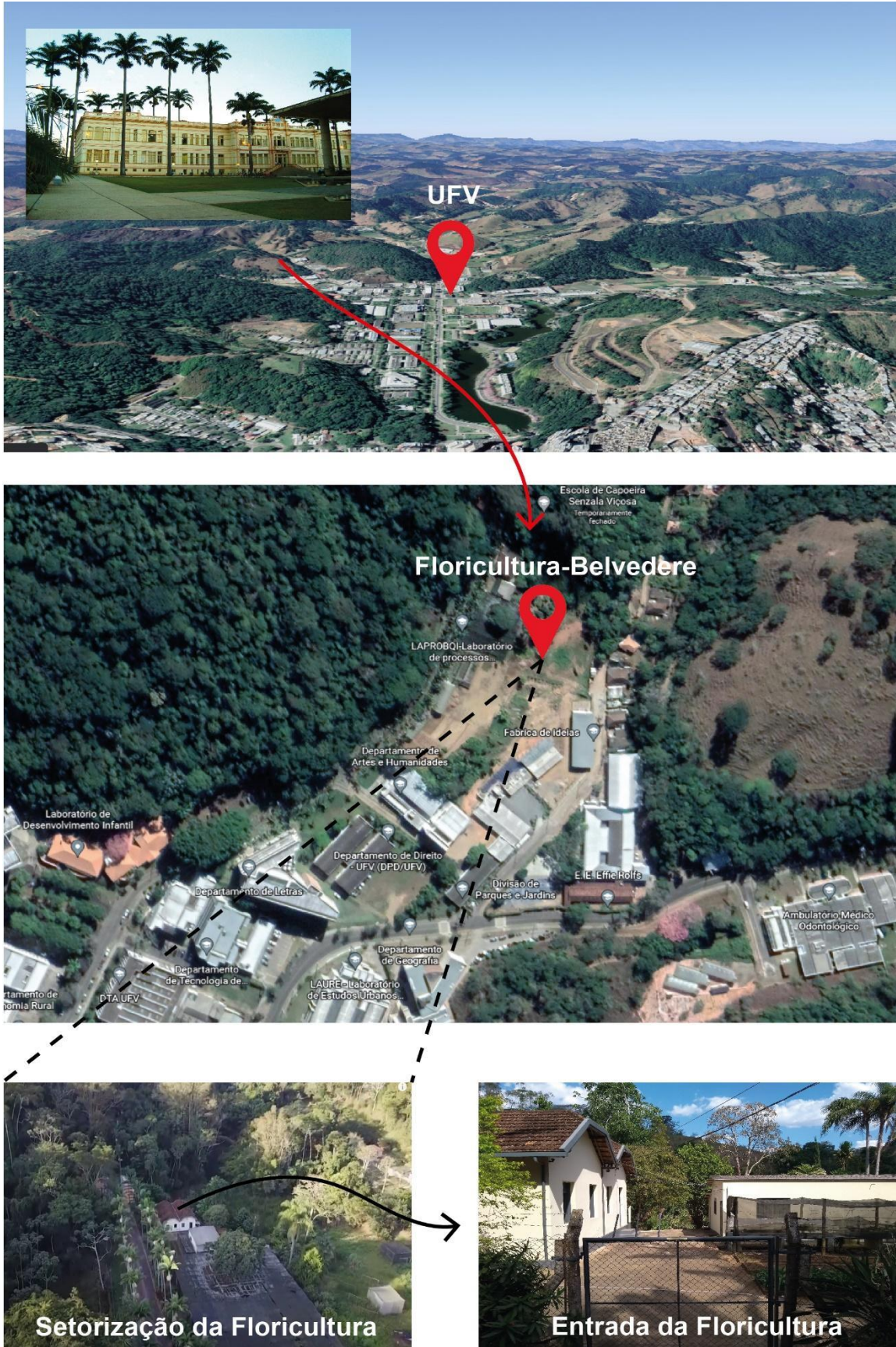
As fachadas verdes investigadas neste estudo foram executadas no Sudeste brasileiro na cidade de Viçosa (MG), na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) Floricultura-Belvedere, setor do departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa (Figura 21 e Figura 22).

Figura 21 - Localização geográfica do experimento em campo



Fonte: Imagens e mapas retirados do Google Earth. Edição feita pela autora, em 2023.

Figura 22 – Setorização do experimento na UFV



Fonte: Imagens e mapas retirados do Google Earth. Edição feita pela autora, em 2023.

O terreno fornecido para a execução dos protótipos tem aproximadamente 161,14 m de perímetro e área de 1.400,87 m² ³, e apresenta uma topografia regular com algumas casas de vegetação, conforme Figura 23 e 24.

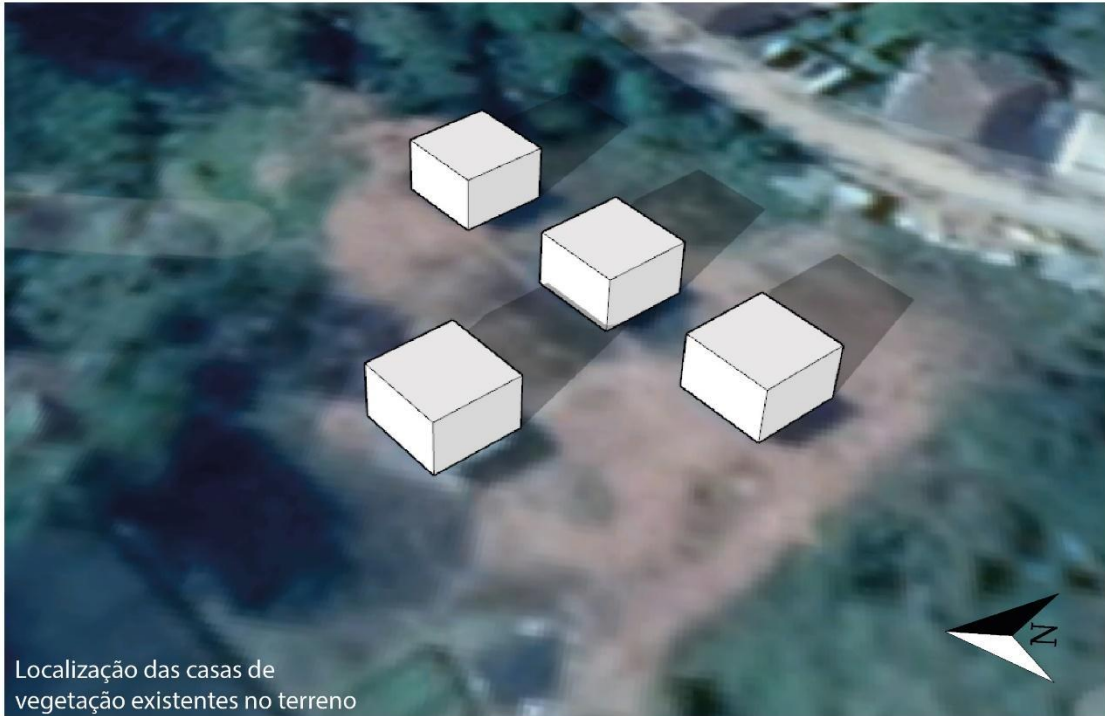
Figura 23 - Setorização e entorno do experimento



Fonte: Imagem coletada do local em 2019 e mapa do relevo retirado do Google Earth. Edição feita pela autora, em 2023.

³ Área mensurada a partir da ferramenta Google Earth.

Figura 24 - Localização das casas de vegetação no terreno

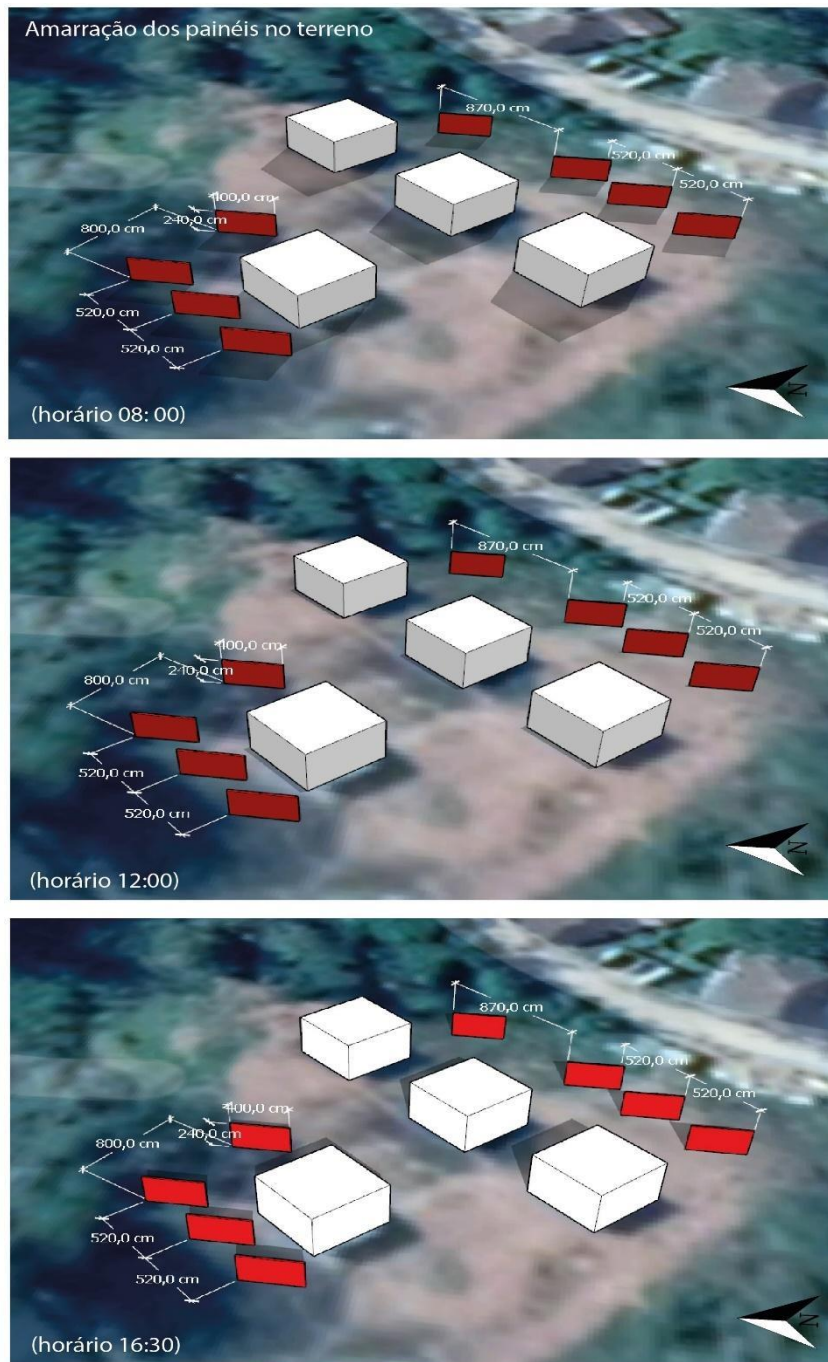


Fonte: Imagem coletada do local em 2019 pela autora, e mapa retirado do Google Earth. Edição feita pela autora, em 2023.

3.3.2 Implantação e preparação dos protótipos no terreno

Ao todo foram executados oito painéis independentes (4.00m de largura por 2.40m de altura) posicionados com o eixo do seu comprimento na direção norte-sul e faces da tela voltada para as orientações Leste e Oeste (Figura 25). Antes da execução, um estudo de insolação para identificar a melhor posição entre eles foi realizado no *software Sketchup* (versão 2021).

Figura 25 - Implantação e amarração dos protótipos no terreno



Fonte: Mapa retirado do Google Earth. Edição feita pela autora, em 2023.

Para o estudo, consideramos o início da manhã, meio dia, e final da tarde. Dessa forma, foi possível ver o percurso de sombreamento que o sol ocasionaria entre os painéis e definir uma posição mais favorável e livre de obstáculos que impedissem a radiação solar em ambas as faces durante o dia.

Para a construção dos painéis foram utilizados mourões de eucalipto tratado e malha interna quadriculada de 0.40 m x 0.40 m, composta por linhas de arame estendidas na vertical e horizontal, para o apoio da vegetação. Durante a fixação dos mourões, foi necessário utilizar uma máquina específica de perfuração de solo, por conta da rigidez em algumas áreas do terreno. Ao longo desse processo, alguns obstáculos foram identificados como, pedras e entulhos soterrados. Por isso, antes de plantar as mudas uma análise do solo também foi realizada para a correção de nutrientes e verificação da possibilidade de plantio nesta área (Figura 26, 27 e 28).

Figura 26 - Fixação e construção dos painéis



Fonte: Imagens coletadas pelos autores, 2019.

Figura 27 - Obstáculos encontrados e perfuração do solo



Fonte: Imagens coletadas pelos autores, 2019.

Figura 28 - Aplicação do arame para apoio das trepadeiras



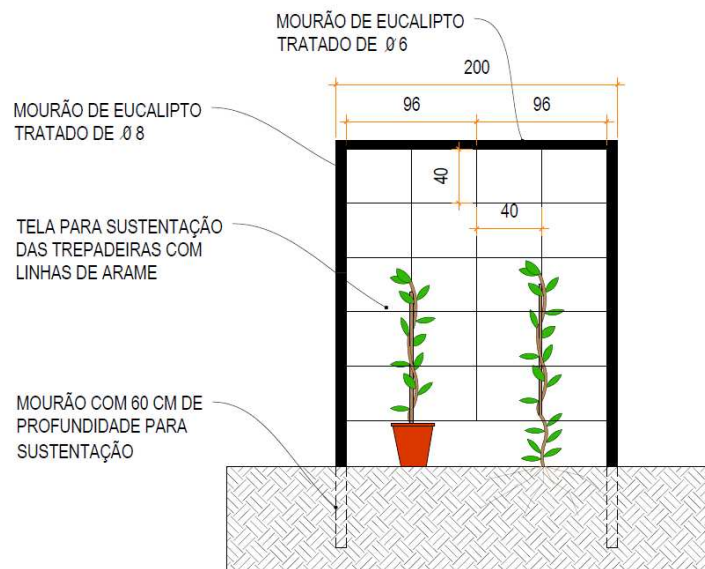
Fonte: Imagens coletadas pelos autores, 2019.

Assim que os painéis ficaram prontos, foram plantadas 5 mudas no perímetro de cada painel (Figura 29). No entanto, apenas 2 mudas de cada painel foram registradas e fotografadas durante 1 ano. As outras 3 mudas ficaram como reserva para possíveis imprevistos ao longo do acompanhamento do experimento. Sendo assim, o trabalho analisou 1 muda em vaso e 1 muda em solo para possibilitar comparações entre a forma de plantio (Figura 30).

Figura 29 - Plantio das mudas nos painéis



Figura 30 – Mudas selecionadas para análises



Fonte: Os autores, 2023.

As trepadeiras foram conduzidas para escalar a malha metálica e colocadas no lado Oeste de cada painel. O plantio das espécies ocorreu em janeiro de 2020, e foram

monitoradas até maio de 2021 para acompanhamento do seu crescimento e adaptação. O acompanhamento deste período incluiu visitas regulares para irrigação, adubação, fixação dos novos galhos, podas e registro fotográfico.

3.3.2.1 Escolha das espécies

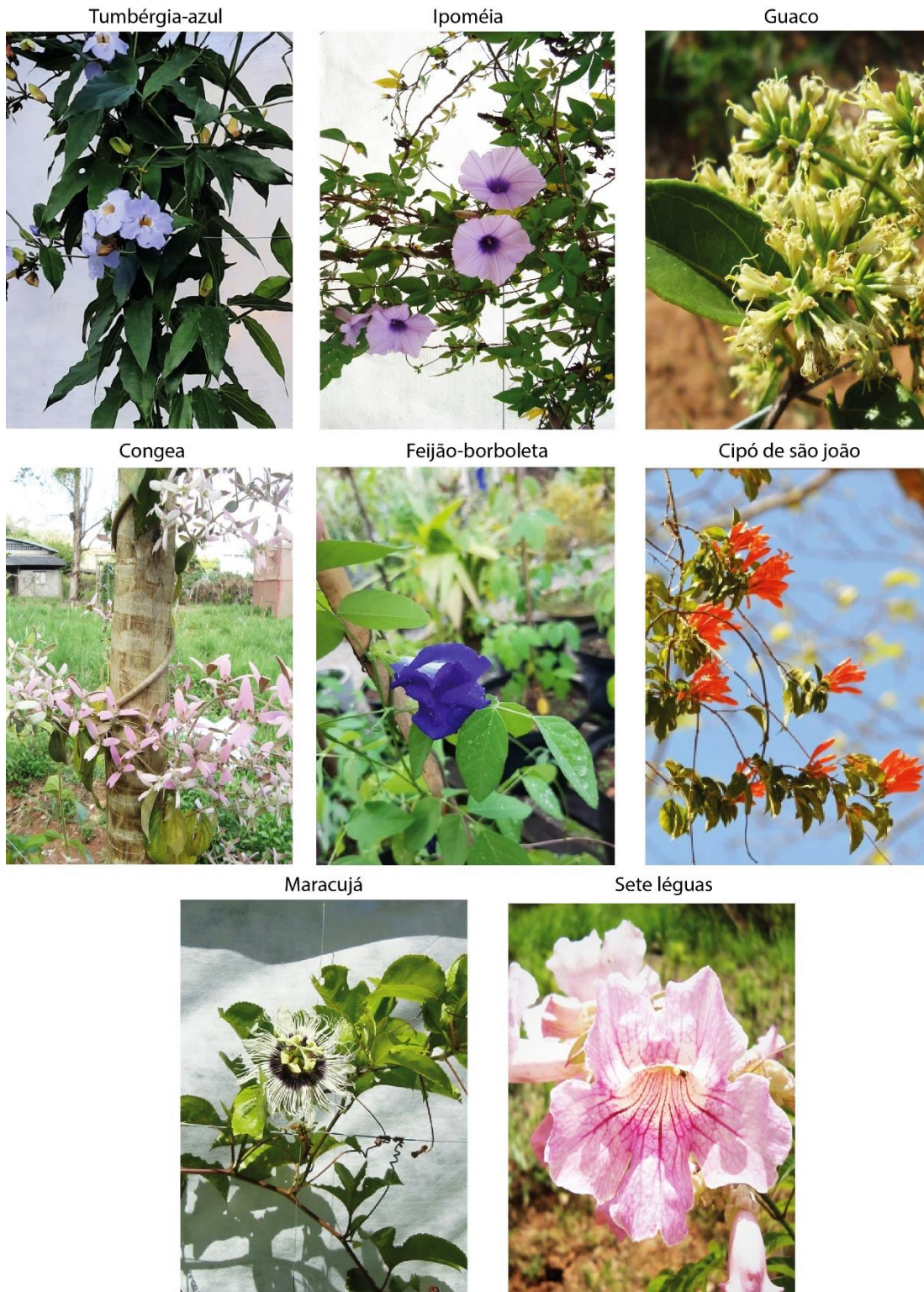
Para a escolha das espécies de trepadeiras deste estudo levou-se em conta os seguintes critérios:

- Custo-benefício;
- Baixa/fácil manutenção das espécies;
- Trepadeiras consideradas aptas ao clima local (tropical de altitude) e;
- Disponibilidade de mudas para aquisição na região e que já estivessem em um porte maior, tendo em vista o tempo para o seu completo desenvolvimento antes da coleta de dados da pesquisa.

Diante desses critérios, as espécies de trepadeiras selecionadas para o estudo foram (Figura 31):

- *Thunbergia grandiflora* (Tumbérgia-azul);
- *Batatas cavanillesii* G. Don (*Ipomoea* Cairica);
- *Mikania glomerata* Spreng (Guaco);
- *Congea tomentosa* (Congea);
- *Clitoria ternatea* (Feijão-borboleta);
- Corda-de-viola (Cipó-de-são-joão);
- *Passiflora edulis* Sims (Maracujá) e;
- *Pandorea ricasoliana* K.Schum (Sete-léguas).

Figura 31 - Espécies escolhidas



Fonte: Imagens coletadas pelos autores, 2020/2021.

Após a aquisição de todas as espécies, as mudas foram reproduzidas e armazenadas na casa de vegetação da Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão

(UEPE) Floricultura-Belvedere, para caso fosse necessária a reposição de algumas ao longo dos meses (Figura 32).

Figura 32 - Propagação das espécies

Propagação das espécies na casa de vegetação



Fonte: Imagens coletadas pelos autores, 2019.

É necessário pontuar que entre essas espécies, três não senesceu⁴ para as próximas etapas de extração e coleta de dados. Por esse motivo, as espécies Cipó-de-são-joão (*Bignonia ignea Vell*), Maracujá (*Passiflora edulis Sims*) e a Sete-léguas (*Pandorea ricasoliana K.Schum*) não foram registradas e consideradas nos resultados.

3.3.3 Extração de dados empíricos

Como o objetivo era estimar os parâmetros físicos das trepadeiras, extraímos dados sobre a cobertura foliar, profundidade foliar e a massa vegetada. Cada parâmetro seguiu objetivos e procedimentos metodológicos específicos, envolvendo etapas e períodos de coletas diferentes. Portanto, a seguir apresentamos essas etapas e procedimentos utilizados para cada parâmetro.

3.3.3.1 Cobertura foliar

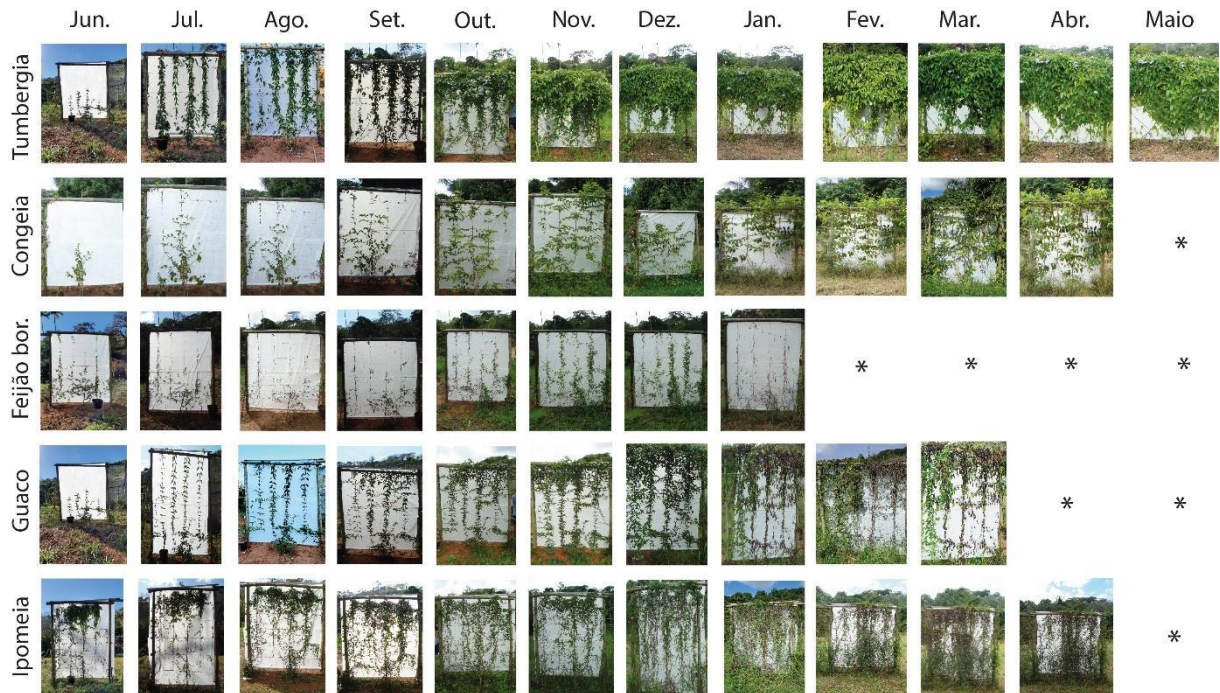
Esta etapa teve como objetivo acompanhar o desenvolvimento e crescimento da cobertura foliar das espécies trepadeiras. Para isso, um método indireto (não destrutivo) foi aplicado, por meio de registro fotográfico e processamento digital para análise quantitativa do percentual de cobertura foliar com o *software ImageJ*. Esse é um procedimento padrão na literatura e já foi adotado por vários autores como Ip, Lam, Miller, (2010), Koyama et al. (2013), Scherer, (2014), Suklje, Medved e Arkar, (2016) Pérez et al. (2017) e Lesjak, Pajek e Košir, (2020).

a) Aquisição das imagens

Assim que as espécies atingiram a altura da malha do painel, uma vez por mês foram capturadas imagens digitais, durante o período de 12 meses, passando por todas as estações do ano e modificações climáticas. Esses registros fotográficos começaram no mês de junho de 2020 e terminaram em maio de 2021. As imagens foram registradas entre os dias 05 e 10 de cada mês, de forma que os intervalos estivessem próximos dos 30 dias (Figura 33).

⁴ **Senesceu:** termo utilizado na Agronomia para referenciar quando uma planta não cresceu e desenvolveu-se como o esperado.

Figura 33 - Esquema com imagens coletadas ao longo dos 12 meses



Legenda: * As mudas senesceram antes de atingir o resultado esperado

Fonte: Os autores. Imagens coletadas de 2020 a 2021.

Após a aquisição de todas as imagens, todas elas passaram por um tratamento digital para a correta análise das mudas em vaso e solo, conforme a Figura 34. Dessa forma, definimos que as manchas coloridas representam a área contabilizada para a cobertura foliar de cada muda e as linhas tracejadas em vermelho representam a distribuição da malha para o apoio da vegetação.

Ao todo, foram capturadas e tratadas 52 imagens de mudas em vaso e 52 imagens de mudas em solo, totalizando 104 imagens para o banco de dados. As imagens referentes à área do vaso apresentam dimensões de 0.40 m de largura — 950 *pixels* na horizontal— e 2.40 m de altura —4330 *pixels* na vertical—, totalizando 4.113.500 *pixels* por imagem, com resolução de 600 dpi e tamanho 676 KB. Já as imagens referentes à área projetada para as mudas do solo apresentam dimensões de 1.00 m de largura —2363 *pixels* na horizontal— e 2.40 m de altura (4318 *pixels* na vertical) totalizando 10.203.434 *pixels* por imagem, com resolução de 600dpi e tamanho 1.55 MB.

Figura 34 - Estrutura do protótipo com a localização das espécies no painel e representação da área de amostra de cada muda (amarelo para o vaso e laranja para o solo)



Fonte: Os autores. Imagens coletadas em 2020.

Essas imagens foram capturadas do painel pelo lado que incide o sol no período da tarde (Oeste) sempre no mesmo horário (14 horas), com uma câmera digital *Sony* modelo DSC-W120, apoiada por um tripé sempre no mesmo ponto de referência para manter o alinhamento e padrão das imagens. Para facilitar o tratamento das imagens coletadas, um painel branco foi posicionado atrás do protótipo para destacar a folhagem do fundo em que o experimento estava inserido (Figura 34).

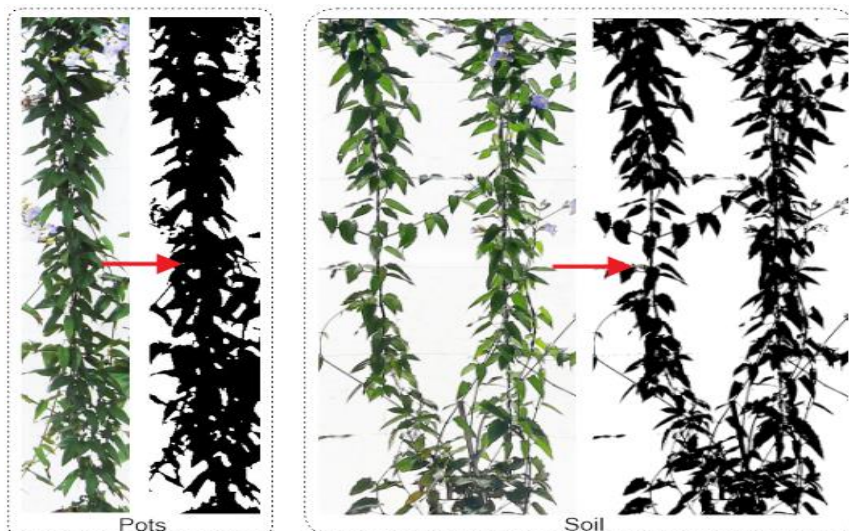
b) Processamento das imagens com o *software ImageJ*

A partir da aquisição das imagens originais, foi utilizado o *software Adobe Photoshop* para tratamento e enquadramento da imagem digital. Essa etapa foi necessária para dimensionar a imagem e recortá-la nas dimensões exatas da área selecionada do painel (2.00m x 2.40m). Em seguida, foi delimitada a área de corte da região para análise de planta em vaso (em amarelo) e no solo (em laranja). Na

sequência, as imagens foram processadas e analisadas quantitativamente com o *software ImageJ*. Esse processamento envolveu três etapas:

1. **Pré-processamento:** inicialmente foi necessário converter as imagens originais de 32 *bits* para 8 *bits* (níveis de cinza entre 0-255), depois as imagens passaram por uma correção do nível do brilho e realce da folhagem. A função dessa etapa foi melhorar a qualidade e a nitidez das imagens.
2. **Segmentação:** nesta etapa, foi realizada a segmentação da imagem para destacar a folhagem do fundo branco. A técnica utilizada para isso é chamada de binarização de imagens ou imagem “*Threshold*”. Na binarização, um nível de cinza é considerado como um limiar de separação entre os *pixels* que compõem os objetos e o fundo. Nessa técnica, obtém-se como saída do sistema uma imagem binária (Figura 35), com apenas dois níveis de luminância: preto e branco.
3. **Extração de dados:** como etapa final, foram extraídas as informações quantitativas da imagem processada. O objetivo dessa etapa foi reconhecer de forma automática a área total e o percentual dos objetos segmentados na imagem (área ocupada pelas cores branco e preto da imagem binarizada). Para isso, foi selecionada a função “*Analyze – Measure*”, tendo como resultado o percentual total da área que está em preto e branco, podendo assim fazer o quantitativo do desenvolvimento da planta ao longo dos meses.

Figura 35 - Conversão da imagem original em imagem binária utilizando a técnica “*Threshold*”. Da esquerda para a direita, imagens de mudas em vaso e solo transformadas em binárias.



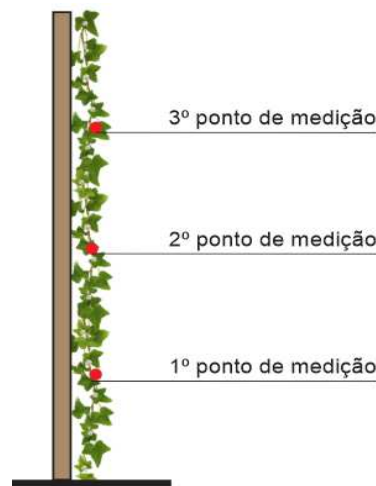
Fonte: Os autores. Imagens coletadas em 2020.

3.3.3.2 Profundidade foliar

Este parâmetro está relacionado com a profundidade da camada vegetal, e será utilizado para representar o modelo tridimensional 3D do dispositivo vegetado. Esse parâmetro poderá estimar como a profundidade da folhagem afeta na estética visual, sombreamento, massa vegetada, estrutura necessária para o seu crescimento e necessidade de afastamento da superfície. Portanto, após 1 ano, assim que a planta já estava desenvolvida no painel, aplicamos um método indireto (não destrutivo).

Para fazer essa medição, pontuamos 3 pontos diferentes de altura do crescimento da planta no painel conforme a Figura 36, com o intuito de encontrar uma média da profundidade foliar para cada espécie. Como ferramenta de medição utilizamos uma trena e definimos a unidade de medida em metros.

Figura 36 - Marcação para medição da profundidade da camada vegetal no painel



Fonte: Os autores 2022.

3.3.3.3 Massa vegetada

O objetivo de coletar esse parâmetro incide na necessidade de estimar aproximadamente a massa da vegetação no painel. Esse dado também poderá servir de entrada para rodar em simulações a partir do simulador estrutural *Karamba 3D*, *plugin* para o *Grasshopper*. Onde será possível estimar a sobrecarga da vegetação na malha do dispositivo e prever onde as cargas vão ser mais solicitadas para a construção do sistema.

Para a extração do parâmetro, aplicamos o método direto (destrutivo) após 1 ano de desenvolvimento da planta. Para termos a comparação entre as mudas plantadas em vaso e solo, sacrificamos uma de cada caso para pesar sua folhagem

(lâminas foliares) fresca e seca juntamente com as flores e caules (pecíolo). Ao sacrificar as mudas para a pesagem, levamos em conta a área de cobertura preenchida conforme a Figura 37, separando as mudas conforme a área em tracejado para vaso e solo.

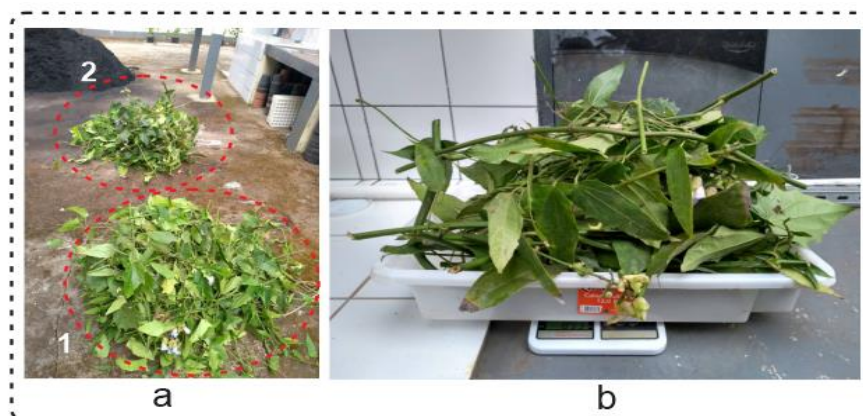
Figura 37 - Marcação das mudas que foram selecionadas para extração da massa vegetada



Fonte: Os autores. Imagem coletada em 2020.

O procedimento de pesagem foi realizado com uma Balança Digital da marca SF-400. Essa balança tem capacidade para até 10kg. Por esse motivo, precisamos separar essa muda em vários montinhos para fazer a pesagem em etapas, até somar toda a muda. Na Figura 38 temos da esquerda para a direita as mudas separadas para a pesagem em (1) solo e (2) vaso, e b) o montinho já separado para pesagem na balança.

Figura 38 - Procedimento de pesagem da folhagem, caules e flores



Fonte: Os autores. Imagem coletada em 2021.

Depois de pesar as mudas em seu estado fresco e seco (sem umidade), encharcamos a folhagem com água para ter uma estimativa da quantidade de água retida, e assim ter uma condição da sobrecarga da folhagem em dias de chuva.

3.4 ETAPA 3 – MODELAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA DO MODELO BASE

Esta etapa visou cumprir o objetivo específico C, tendo como resultado o Capítulo 4. O objetivo foi definir um modelo vegetado que configure todos os parâmetros botânicos extraídos em campo, e que possibilitasse reproduzir as características físicas de fachadas verdes, e assim, estimar o seu crescimento e percentual de cobertura foliar em diferentes épocas do ano. Para a elaboração do código, utilizamos a suíte de modelagem *Rhinoceros*, em conjunto com seu *plug-in* para modelagem paramétrica *Grasshopper* e alguns *plug-ins* para o *Grasshopper*.

3.4.1 Inserção dos parâmetros botânicos no *Grasshopper*

Nesta etapa exploramos alguns procedimentos utilizando os componentes e *plug-ins* do *Grasshopper* para inserir os parâmetros botânicos referente às condições físicas da vegetação no ambiente de modelagem algorítmico-paramétrico. Como ponto de partida para a criação do código, utilizamos as imagens binárias produzidas com o apoio do *software ImageJ* e os dados obtidos com a pesagem da folhagem. A inserção desses parâmetros na modelagem 3D possibilitou obtermos um modelo vegetado para testar em superfícies algumas aplicações e quantitativos do percentual de cobertura foliar, profundidade foliar e massa vegetada de cada espécie.

3.5 ETAPA 4 – DEFINIÇÃO DO CÓDIGO PARA APLICAÇÃO EM SUPERFÍCIES VERTICAIS

Esta etapa visou cumprir o objetivo específico D e E, tendo como resultado o Capítulo 5. O objetivo era ampliar a complexidade do código, explorando o modelo vegetado e seu comportamento de crescimento da vegetação em diferentes superfícies (2D e 3D), aplicando malhas e padrões diferentes. Assim, foi possível observar alguns quantitativos referente a quantidade necessária de mudas para cada caso, distanciamento mínimo/máximo entre elas, altura atingida, tipo de plantio (vaso ou solo), profundidade foliar da camada vegetal e o tipo de malha mais indicado para cada superfície. Além do aspecto visual, esses quantitativos podem ajudar a prever questões para otimizar o sombreamento e possíveis sobrecargas estruturais.

Todas as etapas do código foram elaboradas utilizando a suíte de modelagem *Rhinoceros*, em conjunto com seu *plug-in* para modelagem paramétrica *Grasshopper*. Além disso, o *plug-in Pufferfish*, para o *Grasshopper* foi utilizado para resolver algumas etapas do código.

REFERÊNCIAS

- BRERETON, P.; KITCHENHAM, B. A., BUDGEN, D., TURNER, M.; KHALIL, M.L. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. **Journal of Systems and Software**, Software Performance 5th International Workshop on Software and Performance. v. 80, n. 4, p. 571–583, abril 2007.
- CAMPOS, F. M. D. **Estudo do uso de parametrização e simulações computacionais nas etapas iniciais do processo de projeto visando à otimização**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- CAMPOS, F.; CELANI, G. **Estudo de otimização de coberturas responsivas à insolação através da parametrização**. XV ENTAC, Maceió, 2014.
- CARTANA, R. P. **Desempenho Térmico E Lumínico De Elementos De Controle Solar Para Fachadas Desenvolvidos com Modelagem Paramétrica e Fabricação Digital**., Tese de doutorado. Florianópolis. p. 348, 2018.
- ELIASSEN, M. H. A. **The Digital Workflow of Parametric Structural Design Developing Grid Shells in a Nordic Climate**. Tese de Mestrado, University in Trondheim, Noruega. 2018.
- GROAT, L.; WANG, D. *Architectural Research Methods*. Segunda Edição, Wiley, Nova Jersey, 2013.
- IP, K.; LAM, M.; MILLER, A. Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 81–88, 2010.
- KOYAMA, T.; YOSHINAGA, M.; HAYASHI, H.; MAEDA, K. ICHIRO; YAMAUCHI, A. Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. **Building and Environment**, v. 66, p. 96–103, 2013.
- LESJAK, V.; PAJEK, L.; KOŠIR, M. Indirect green façade as an overheating prevention measure. **Gradjevinar**, v. 72, n. 7, p. 569–583, 2020.
- MORELLI, D. D. DE O. **Desempenho de paredes verdes como estratégia bioclimática**. Tese de doutorado. Campinas, São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- PADOVAN, L. D. G. **Desempenho térmico de jardins verticais extensivos: estudo com uso da trepadeira Ipoméia horsfalliae**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2020. Universidade Estadual Paulista.
- PÉREZ, G.; COMA, J.; SOL, S.; CABEZA, L. F. Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. **Applied Energy**, v. 187, p. 424–437, 2017.
- PREISINGER, CLEMENS; HEIMRATH, MORITZ. Karamba—A toolkit for parametric structural design. **Structural Engineering International**, v. 24, n. 2, p. 217–221, 2014.
- PIRES, J. DE F. **A constituição de uma rede de conceitos da geometria complexa da arquitetura contemporânea: das teorias à modelagem paramétrica das superfícies**, 2018. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- ROUDSARI, M. S.; PAK, M.; SMITH, A. **Ladybug: A Parametric Environmental Plugin for Grasshopper to help Designers create an Environmentally-conscious Design**. In: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2013, p. 3129–3135.
- SCHERER, M. J. **Cortinas Verdes na arquitetura: desempenho no controle solar e na eficiência energética de edificações**, 2014. Tese de doutorado. Universidade Federal do

Rio Grande do Sul.

ŠUKLJE, T.; MEDVED, S.; ARKAR, C. On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. **Energy**, v. 115, p. 1055–1068, 2016.

VANNINI, V. C. **Otimização da forma para captação da radiação solar sobre superfícies de edifícios: um exercício de integração entre os programas Rhinoceros e Ecotect**, Dissertação de mestrado. 2011. Porto Alegre, RG.

WONOTO, N.; BLOUIN, V. Integrating grasshopper and matlab for shape optimization and structural form-finding of buildings. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 16, n. 1, p. 1–12, 2018.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

CAPÍTULO 4

DEFINIÇÃO E MODELAGEM ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA PARA FACHADA VERDE

Neste capítulo vamos apresentar os resultados referente a modelagem algorítmico-paramétrica de um modelo que pode ser aplicado em simulações de fachadas verdes. O capítulo foi dividido em três tópicos principais: Primeiro apresentamos a nossa biblioteca de parâmetros botânicos que foram coletados em campo e que serviram para input no código. Em segundo plano, mostramos como cada etapa do código foi pensada e organizada, resultando em três formas de aplicação do código em uma situação hipotética. Em terceiro, apresentamos algumas diretrizes de projeto para fachadas verdes, juntamente com a discussão sobre o desenvolvimento e cuidados mínimos de cada espécie.

4.1 BIBLIOTECA DE PARÂMETROS BOTÂNICOS PARA INPUT NO GRASSHOPPER

Como foi apresentado na revisão de literatura, existe uma carência por dados referente à condição física da planta trepadeira para modelagem e simulação paramétrica, o que acaba impedindo que outras investigações com esse tipo de elemento sejam realizadas. Pensando em resolver esse primeiro problema, alguns métodos foram utilizados para reunir dados da cobertura foliar, densidade e massa vegetada de cinco espécies trepadeiras. Assim, conseguimos montar uma biblioteca de dados para a criação e alimentação do código, como também, disponibilizar um banco de dados para que outras pesquisas possam obter resultados com processos diferentes.

Nos próximos tópicos os dados sobre a cobertura vegetal, profundidade foliar e massa vegetada são apresentados:

4.1.1 Cobertura vegetal

























Buscando resolver a questão visual da fachada verde, o primeiro parâmetro investigado para ser associado no *Grasshopper* foi a cobertura foliar. Para esse processo utilizamos os registros de imagens que foram coletadas em campo com o experimento. Além de possibilitar uma amostra visual da vegetação, essas imagens

são essenciais para mostrar a evolução fisiológica de crescimento da planta, tanto para condições plantadas em vaso como em solo.

Ao todo, conseguimos montar uma biblioteca de 104 imagens de 5 espécies trepadeiras (*Congea tomentosa* var.; *Ipomoea cavanillesii* Roem; *Thunbergia grandiflora* var.; *Pandorea ricasoliana* K.Schum; *Bignonia ignea* Vell; *Mikania* sp.; *Clitoria ternatea*, e *Passiflora edulis* Sims), passando por todas as estações do ano (inverno, primavera, verão e outono). Apesar da maioria ter apresentado um desenvolvimento satisfatório, o Quadro 9 apresenta alguns campos em branco porque naquele período a planta senesceu⁵ ou não tinha desenvolvido para início da coleta de dados.

Como um dos objetivos era observar o crescimento da espécie e quantificar o percentual da camada vegetal, antes de inseri-las no *software* de modelagem *Rhinoceros+Grasshopper*, optamos em tratá-las no *software ImageJ* para calcular e rastrear as áreas preenchidas pelas folhas, caules e flores. Assim, o resultado final foi uma imagem negativa/binária (canal preto e branco) com o percentual mensal, que permite simular a transformação da planta ao longo dos meses e gerar alguns quantitativos sobre sua aplicação em fachadas (Quadro 9).





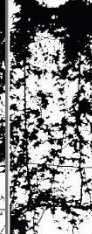







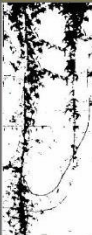











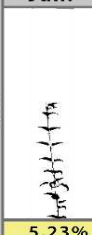
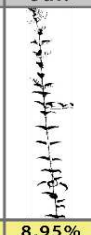


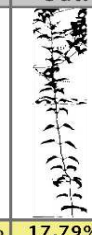











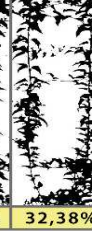































Quadro 9 - Imagens binárias com percentual de cobertura foliar das espécies

		TUMBERGIA AZUL											
		Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Vaso													
		13,14%	48,04%	62,01%	65,20%	69,07%	69,81%	91,79%	99,03%	95,82%	88,17%	99,26%	100%
Solo													
		12,95%	36,99%	43,84%	52,80%	49,88%	65,86%	82,98%	83,06%	92,70%	83,23%	90,78%	100%

Continua...

⁵ O termo senesceu é muito utilizado na Agronomia para referenciar que uma cultura ou espécie não desenvolveu ou veio a morrer durante seu crescimento.

Continuação...

IPOMEIA CAIRICA												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Vaso												
	21,58%	35,20%	30,35%	44,30%	50,33%	41,60%	42,80%	50,77%	77,92%	91,07%	95,16%	-
Solo												
	20,42%	33,82%	31,13%	55,88%	65,74%	60,02%	54,40%	49,76%	67,84%	84,75%	79,27%	-
GUACO												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Vaso												
	5,23%	8,95%	7,56%	11,23%	17,79%	40,02%	55,24%	67,79%	65,07%	71,69%	81,47%	-
Solo												
	10,01%	19,06%	21,80%	28,75%	32,38%	40,70%	51,65%	57,19%	61,68%	45,50%	-	-
CONGEA												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Vaso												
	-	0,72%	4,34%	10,66%	9,30%	41,70%	37,98%	41,81%	41,89%	68,54%	72,23%	-
Solo												
	2,73%	6,30%	9,02%	15,40%	15,24%	30,01%	34,21%	33,09%	61,83%	65,16%	69,85%	-

Legenda: * A muda ainda não tinha se desenvolvido para a coleta de dados

* A muda senesceu antes de atingir os resultados esperados

Continua...

Continuação...

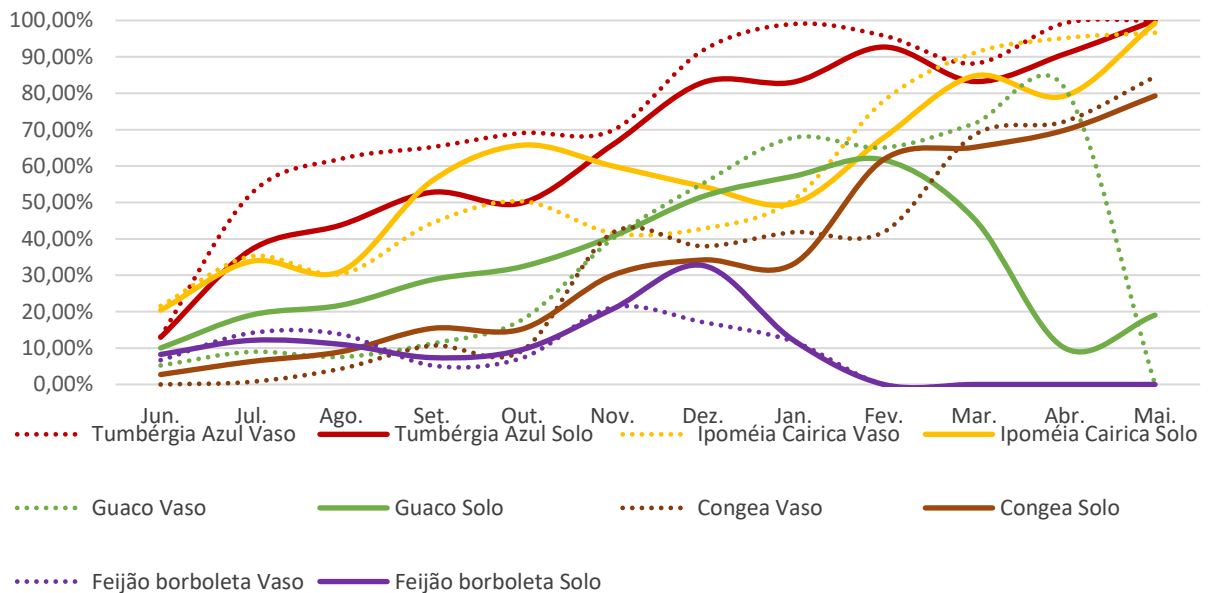
		FEIJÃO BORBOLETA											
		Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	Mar.	Abr.	Mai.
Vaso										*	*	*	*
		6,68%	14,13%	13,75%	5,21%	7,29%	21,18%	17,10%	11,80%	-	-	-	-
Solo										*	*	*	*
		8,25%	12,12%	11,00%	7,37%	9,59%	20,73%	32,67%	12,15%	-	-	-	-

Legenda: * A muda senesceu antes de atingir os resultados esperados

Fonte: Os autores, 2021.

Como resultado desses quadros, a Figura 39 mostra a curva de evolução de cada espécie, comparando as mudas plantadas no vaso e solo, iniciando em junho de 2020 e finalizando em maio de 2021, e assim completando um ano de evolução.

Figura 39 - Desenvolvimento entre as espécies plantadas no vaso e solo



Fonte: Os autores, 2021.

4.1.2 Desenvolvimento das espécies escolhidas

Além das imagens coletadas, uma observação qualitativa sobre o comportamento e necessidades de cada espécie ao longo dos 12 meses de experimento é apresentada:

***Thunbergia grandiflora* (Tumbérgia Azul)**



Essa espécie é uma trepadeira perene, semilenhosa, robusta e muito vigorosa. Espécie nativa da Índia, deve ser cultivada a pleno sol em regiões tropicais e subtropicais, de maneira isolada ou em grupos. Tolerante temperaturas amenas e deve ser contida regularmente com podas. Seu sistema axial é formado por folhas opostas e inteiras e com a base mais larga, podendo chegar até 0,08m. Sua cor é verde escura, e tem um indumento glabro de textura cartácea (áspera). Sua floração permanece o ano todo. Porém, essa espécie floresce com mais intensidade na primavera e verão. As flores são solitárias chegando até 0,08 m, de cor azul, atraindo principalmente besouros, seu principal polinizador (LORENZI; SOUZA, 2001).

Em comparação às outras espécies, a Tumbérgia Azul apresentou uma evolução equilibrada e contínua ao longo dos 12 meses tanto em vaso como no solo. Como é mostrado no Quadro 10, as mudas que foram plantadas no vaso tiveram uma boa adaptação e atingiram 52,35% em apenas dois meses. No decorrer dos meses continuou evoluindo satisfatoriamente até chegar em 99,03% em janeiro da cobertura foliar da área delimitada. Em fevereiro e maio houve uma queda de folhas, por consequência do volume de chuvas neste período. No entanto, a espécie mostrou ser muito resistente e de rápida recuperação, chegando aos 100% em maio.

Quadro 10 - Fechamento foliar da espécie Tumbérgia azul

Espécie		Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai
Tumbérgia	Vaso	13,1 4%	52,3 5%	62,0 1%	65,2 0%	69,0 7%	69,8 1%	91,7 9%	99,0 3%	95,8 2%	88,1 7%	99,2 6%	100 %
	Solo	12,9 5%	36,9 9%	43,8 4%	52,8 0%	49,8 8%	65,8 6%	82,9 8%	83,0 6%	92,7 0%	83,2 3%	90,7 8%	100 %

Fonte: Os autores. Dados coletados no primeiro semestre de 2021.

As mudas que foram plantadas no solo também se adaptaram ao local e mostraram boas condições no seu desenvolvimento. No entanto, nota-se que houve um desenvolvimento mais lento comparado às mudas que estão em vaso. Apesar desse progresso mais lento, a muda se desenvolveu bem ao longo dos meses e ramificou mais hastes para o cobrimento da superfície que estava apoiada. Por ser uma planta lenhosa que se enrola ao longo de um suporte, nota-se que a malha do painel é preenchida sempre verticalmente, concentrando toda a folhagem no eixo central que está envolvida. Em nove meses (fevereiro) a sua folhagem já tinha atingido 92,70% da área delimitada para a amostra. Em março, por conta do excesso de chuvas neste período, regrediu para 83,23% perdendo algumas folhas. Porém, em dois meses já havia atingido seu porte máximo de 100%.

A espécie apresentou boa adaptação com o clima local e tipo de solo plantado. Ao contrário das outras espécies, essa manteve seu crescimento contínuo durante os 12 meses e não foi afetada por nenhuma praga ou diferenças de temperaturas durante as estações do ano. Devido ao seu rápido crescimento, necessitou de podas mensais assim que atingiu o topo do painel. Ao observar a forma de plantio, em vaso e solo, foi possível confirmar que o desenvolvimento da espécie não é afetado quando plantada em vasos. No entanto, quando a mesma está plantada no solo, há mais possibilidades de a muda desenvolver novas hastes, o que ajuda a contribuir para um fechamento foliar mais denso. Vale ressaltar, que ao escolher a forma de plantio em vasos, deve-se optar por recipientes mais espaçosos e resistentes, pois a estrutura da raiz dessa espécie é formada por um sistema axial/pivotante, por isso vai necessitar de mais espaço para seu desenvolvimento.

***Batatas cavanillesii* G. Don (Ipoméia Cairica)**

Essa espécie é uma trepadeira herbácea nativa do Brasil, muito florida, perene e de crescimento moderado. Conforme as imagens do Quadro 11, é possível notar que o crescimento e fechamento foliar é bem espalhado, fixando-se em quase toda



área da malha aramada do painel. Isso justifica sua aparência mais irregular e densa. O sistema axial é formado por folhas opostas de formato lobadas mais largas ao centro, com um tom de verde escuro e indumento glabro e bem nítido, podendo chegar até 0.07m. A floração dessa espécie se mantém presente o ano todo, com flores solitárias de formato infundibuliforme, cor lilás com aproximadamente 0.10m de tamanho. Por conta dessa produção diária de muitas flores, juntamente com a coloração vistosa, torna essa espécie bem atrativa, o que, conseqüentemente,

contribui para a atração de polinizadores, como: abelhas, borboletas e besouros (LORENZI; SOUZA, 2001).

Quadro 11 -Fechamento foliar da espécie Ipomoea Cairica

Espécie	Mês												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	
Ipomeia	Vaso	21,5 8%	35,2 0%	30,3 5%	44,3 0%	50,3 3%	41,6 0%	42,8 0%	50,7 7%	77,9 2%	91,0 7%	95,1 6%	96,6 2%
	Solo	20,4 2%	33,8 2%	31,1 3%	55,8 8%	65,7 4%	60,0 2%	54,4 0%	49,7 6%	67,8 4%	84,7 5%	79,2 7%	99,2 7%

Fonte: Os autores, 2021.

Ao acompanhar o fechamento da cobertura foliar desta espécie nota-se que apesar do seu crescimento moderado, seu desenvolvimento ao longo dos meses permaneceu equilibrado e com variações positivas. Neste caso, é possível notar que essa espécie tem uma cobertura mais espalhada, fixando-se de forma irregular por toda a malha aramada do painel. As mudas que foram plantadas em vaso responderam de forma positiva e elevaram seu percentual satisfatoriamente até o mês

de outubro com 50,33%. Em novembro esse percentual regressou para 41,60%, onde houve a perda de muitas folhas. Isso foi motivado devido ao excesso de chuva neste período na região. Notou-se que essa espécie não gosta de um solo muito encharcado, por esse motivo o ideal é cultivá-la em locais com sol pleno e pluviosidade mais equilibrada, ou então, manter o solo bem arenado. Essa recomendação pode ser confirmada ao compararmos a muda do vaso com a do solo, sendo que a do vaso foi menos afetada, possivelmente porque o vaso conseguiu drenar mais o excesso de água em dias chuvosos. Outra característica importante dessa espécie, é que mesmo plantada em vaso, desenvolveu mais hastes para fixação na tela aramada, atingindo bons resultados em maio com 96,62%.

Ao observar a evolução da muda que foi plantada no solo, é possível notar que apesar da sua resistência e crescimento contínuo ao longo do ano, durante alguns meses do ano como agosto, novembro, dezembro e janeiro ocorreu uma queda na evolução da muda. Neste período houve muita frequência de chuva e como dito anteriormente, essa espécie não tolera solo encharcado do solo. Por isso, durante esse período a espécie demorou para recuperar as folhas e se desenvolver novamente. No entanto, em fevereiro com a pausa das chuvas e o aumento da temperatura a espécie se recuperou e atingiu 67,84% progredindo positivamente até completar o ciclo de coletas em maio, chegando a 99,27% de cobertura foliar.

De modo geral, a espécie apresentou uma boa adaptação com o clima local e necessitou pouca manutenção ao longo do ano. Ao todo foram necessárias apenas duas podas no decorrer de 12 meses, e a espécie não foi atingida por nenhuma praga. Em comparação ao tipo de plantio, a muda plantada no vaso teve um desenvolvimento mais positivo em comparação às que foram inseridas diretamente no solo. Apesar dessa espécie apresentar um sistema das raízes axial/pivotante, não houve uma ruptura do vaso por conta do crescimento profundo das raízes. No entanto, caso seja escolhida para plantio em floreiras/vasos, é importante escolher um vaso com dimensões mais robustas, para o adequado desenvolvimento da planta. Vale ressaltar que essa espécie apresentou resultados muito próximos às plantas em vaso e solo, confirmando sua adaptação e desenvolvimento rápido em ambos os casos.

***Mikania glomerata* Spreng (Guaco)**

Também é uma trepadeira nativa do Brasil e pode atingir de 2 a 3 metros de altura, com folhagem densa e perene. É indicada para cultivo em climas subtropical e



tropical, e para o seu florescimento depende da incidência direta dos raios solares em, pelo menos, uma parte do dia. Por isso, a planta pode ser cultivada em local de meia-sombra. É uma espécie rústica com densidade moderada, que tolera as oscilações de temperatura que estão sujeitas a ocorrer durante o ano e em outras regiões do país. Seu sistema axial é formado por folhas opostas com folhas de formato inteiro, mais largas na base. Com folhas em tom de verde escuro e indumento glabro e nítido, suas folhas podem atingir até 0.08m. Sua floração de cor branca é

formada por cachos de até 0.30m bem perfumados, aparecendo durante o inverno e primavera e tendo como polinizadores as abelhas (LORENZI; SOUZA, 2001).

Ao analisarmos o desenvolvimento dessa espécie ao longo dos meses, percebe-se que o grau de cobertura da folhagem é constante e com variações positivas, crescendo de forma rápida e vigorosa tanto para a muda em vaso quanto a do solo. As imagens mostram que nos primeiros meses (junho até setembro) a muda plantada no vaso se ramificou verticalmente até atingir o topo do painel, chegando a 11,23% em setembro. Em outubro com o início da primavera a espécie avançou e manteve seu desenvolvimento positivo até abril, atingindo 81,47% do fechamento foliar da área de amostra. Embora a espécie tenha mostrado ser muito resistente a diversos fatores climáticos como seca, excesso de chuvas, altas e baixas temperaturas, infelizmente a pragas de formigas pretas causaram a destruição total da muda. Por esse motivo, o último mês (maio) não apresentou resultados no Quadro 12. Apesar da perda da muda, os resultados foram satisfatórios quando plantadas em vaso e a espécie mostrou ser muito promissora, atingindo uma cobertura foliar positiva para as amostras.

Quadro 12 - Fechamento foliar da espécie Guaco

Espécie	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
	Guaco											
Vaso	5,23 %	8,95 %	7,56 %	11,2 3%	17,7 9%	40,0 2%	55,2 4%	67,7 9%	65,0 7%	71,6 9%	81,4 7%	*
Solo	10,01 %	19,0 6%	21,8 0%	28,7 5%	32,3 8%	40,7 0%	51,6 5%	57,1 9%	61,6 8%	45,5 0%	10,0 1%	19,0 6%

Legenda: *A muda senesceu antes de atingir os resultados esperados
Fonte: Os autores, 2021.

Em relação à mudança do solo, notou-se uma adaptação inicial mais rápida que a do vaso e seu desenvolvimento progrediu positivamente ao longo dos meses. Inicialmente sua muda desenvolveu duas hastes em junho, já no mês de julho passou a ter novas hastes auxiliares para a cobertura foliar da área de amostra. Até o mês de fevereiro a muda tinha atingido 61,68% e estava saudável. Em março, a muda foi atingida por pragas de formigas pretas e ao decorrer dos meses foi totalmente destruída. Como tentativa de controlar a praga, foi passado inseticida nos ninhos encontrados ao redor do painel, no entanto, a espécie não conseguiu se recuperar e por esse motivo não apresenta resultados nos meses de abril e maio no Quadro 9.

Em geral, a espécie apresentou boas condições físicas e adaptativas ao clima local. Não necessitou de muitas podas, e se desenvolveu de forma rápida. No entanto, essa espécie atrai formigas pretas, e por esse motivo, ao longo dos meses, as mudas receberam tratamento adequado para controle e prevenção contra pragas. Uma observação importante neste caso, é que a muda que foi plantada no solo foi mais afetada pelas formigas. Foi constatado que as formigas se alimentam das raízes das mudas, levando a destruição total da planta. Já a muda que estava no vaso, demorou mais tempo para ser atingida e continuou se desenvolvendo bem até o mês de abril.

***Congea tomentosa* (Congea)**

Esta é uma espécie de trepadeira lenhosa, muito vigorosa, perene, originária da Índia e Malásia, de ramagem numerosa, bastante densa e de florescimento notável. Suas folhas são opostas e do tipo elíptico-ovaladas, tomentosas, cartáceas, marcadas pelas nervuras impressas na face superior, descolores, de aproximadamente 10-16 cm de comprimento. Suas flores aparecem em ramos desprovidos de folhas, em



grande quantidade, de cor branca, pequenas, quase despercebidas, porém providas de brácteas rosa-arroxeadas que formam massa densa e espetacular de inflorescências bastante duráveis, formadas no fim do inverno e primavera. É indicada para revestimento de caramanchões, grades e cercas, a pleno sol. Tolerante podas de contenção, muito necessárias dado o grande vigor de crescimento. É muito sensível a geadas, sendo indicada apenas para regiões tropicais e subtropicais de inverno quente. Multiplica-se por alporquia e mais facilmente por estacas preparadas

após o florescimento (LORENZI; SOUZA, 2001).

Analisando o Quadro 13 percebe-se que a muda plantada no vaso demorou para se adaptar. No mês de junho não mostra resultados porque a planta ainda não tinha atingido a altura do painel. Essa espécie apresentou bastante instabilidade nos primeiros meses. Por ser uma trepadeira volúvel e muito lenhosa é possível notar que seu desenvolvimento foi direcionado de acordo com o eixo da malha aramada dos painéis. Em setembro atingiu a altura do painel e por conta do início da primavera passou a produzir mais folhas e flores. Em novembro teve uma evolução significativa de 41,70%, mas em dezembro, por conta do excesso de chuvas deste período, a planta voltou a perder folhas e estagnar. Com a chegada do verão e já adaptada com o local, atingiu 41,89% até fevereiro e em maio fechou com 84,52% de fechamento foliar.

Quadro 13 - Fechamento foliar da espécie Congea

Espécie		Jun.	Jul.	Ago	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Congea	Vaso	*	0,72 %	4,34 %	10,6 6%	9,30 %	41,7 0%	37,9 8%	41,8 1%	41,8 9%	68,5 4%	72,2 3%	84,5 2%
	Solo	2,73 %	6,30 %	9,02 %	15,4 0%	15,2 4%	30,0 1%	34,2 1%	33,0 9%	61,8 3%	65,1 6%	69,8 5%	79,3 0%

Legenda * A muda ainda não tinha se desenvolvido para a coleta de dados.

Fonte: Os autores, 2021.

Quanto à mudança do solo, a espécie atingiu bons resultados e evoluiu gradualmente sem muitos picos negativos ou perdas de folhas. Ao comparar com a muda do vaso, plantada no solo, essa espécie mostrou um crescimento constante, e ramificou mais hastes, distribuindo 3 hastes novas ao longo da malha do painel. Em setembro essas hastes alcançaram o topo do painel chegando a um percentual de 15,40% e desde então novas folhas foram preenchendo a área da amostra, chegando a 79,30% em maio. Essa é uma espécie rústica, e sua estrutura axial é mais pesada. Por isso é muito indicada como arbusto ou cercas delimitadoras. Caso utilizada em fachadas para sombreamento, necessita de podas com frequência para manter um visual limpo e harmonioso.

Analisando os dados anteriores, é notável que essa espécie não teve uma boa adaptação no local que foi inserida. Essa é uma espécie que necessita de climas quentes e pluviosidade equilibrada, pois não suporta solo muito encharcado, como é o caso do solo onde o experimento foi executado. A muda que estava no vaso foi a única que avançou com mais vigor, perdendo folhas apenas nos períodos mais frios. Por conta da evolução lenta da planta, não foi necessário realizar manutenções de podas, e não foi identificado nenhuma praga ao longo dos 12 meses.

***Clitoria ternatea* (Feijão-Borboleta)**

Essa é uma espécie de trepadeira herbácea, perene e nativa do Brasil, ainda pouco utilizada para compor arranjos ornamentais na Arquitetura. É indicada para cultivo a pleno sol em climas com temperaturas mais elevadas, pois não tolera baixas



temperaturas. Seu sistema axial do caule apresenta ramos longos e maleáveis, atingindo cerca de 3.00m a 6.00m de comprimento com composição irregular, precisando de apoio para crescer. Suas folhas são pequenas, compostas e arredondadas com uma textura aveludada, e quando atingem o máximo de área foliar proporcionam uma cobertura média. Sua floração é composta de arranjos solitários de aproximadamente 0.04m com tom roxo, permanecendo em todas as estações do ano, com mais intensidade na primavera e

verão (LORENZI; SOUZA, 2001).

Ao analisar as imagens do Quadro 14, percebe-se que esta espécie está em desvantagem em relação ao desenvolvimento das outras espécies. A muda plantada no vaso teve muita instabilidade e não avançou durante os 12 meses, atingindo no máximo 21,18% durante oito meses. Apesar de tratar-se de uma espécie perene e de crescimento rápido, não conseguiu se manter estável e progredir positivamente na evolução da cobertura foliar. Suas piores médias ocorreram em meses mais chuvosos e temperaturas baixas.

Quadro 14 - Fechamento foliar da espécie Feijão Borboleta

Espécie	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fe v.	Ma r.	Ab r.	Ma i.	
Feijão borboleta	Vaso	6,68 %	14,13 %	13,75 %	5,21 %	7,29 %	21,18 %	17,10 %	11,80 %	*	*	*	*
	Solo	8,25 %	12,12 %	11,00 %	7,37 %	9,59 %	20,73 %	32,67 %	12,15 %	*	*	*	*

Legend
a:

*

A muda senesceu antes de atingir os resultados esperados.

Fonte: Os autores, 2021.

A muda plantada no solo também não teve respostas positivas. No entanto, é notável que seu desenvolvimento foi mais equilibrado e ramificou mais hastes para fixação na tela. Por esse motivo ela atingiu os melhores percentuais, chegando em dezembro com 32,67%. Ficou claro que essa espécie não se adaptou ao local e nem ao clima, pois necessita de um solo bem drenado e temperaturas mais altas.

Essa foi a espécie que mais sofreu com as condições locais e climáticas. Ficou claro que a mesma não suporta temperaturas amenas, e necessita de uma rega frequente, mantendo seu solo sempre úmido, porém, bem drenado. É uma espécie que atrai bastante lagartas e pulgões, por esse motivo, é preciso aplicar inseticidas com frequência para manter a integridade da planta. Ao contrário das outras espécies, a muda que foi plantada no vaso não se desenvolveu com a mesma vitalidade que as mudas plantadas no solo. Por esse motivo, essa não seria uma espécie indicada para aplicação em fachadas verdes, por conta de sua instabilidade de desenvolvimento, atração de insetos predadores e necessidade de maior manutenção.

4.1.2.1 Análise comparativa entre as espécies

Analisando a variação do percentual da cobertura foliar das cinco espécies, pode-se verificar que cada uma possui particularidades distintas e relevantes em sua capacidade de sombreamento. Apesar dessas espécies serem recomendadas para o uso no clima tropical de altitude, as análises mostram que algumas espécies não se adaptaram às condições locais, refletindo em um percentual irregular com pouca variação no desenvolvimento ao longo dos 12 meses. É importante frisar que esse experimento foi executado em um terreno de aterro. Por isso, é bem provável que algumas espécies não tenham se adaptado com as condições do solo local, uma vez que este era muito seco e compacto. O ideal é plantar essas espécies em solos bem drenados e de boa qualidade.

O Feijão borboleta mostrou que apesar de ser considerado uma espécie perene, não suporta períodos longos de chuva e temperaturas amenas. Os meses com maior cobertura da sua folhagem ocorreu entre os meses mais secos (julho, agosto, novembro e dezembro com máxima de 21,18% plantada em vaso e 32,67% plantada no solo). Infelizmente essa espécie não resistiu às mudanças de clima e morreu em fevereiro. Outra espécie que não resistiu aos 12 meses de coleta de dados foi o Guaco. Apesar de ter mostrado bons resultados iniciais e atingir uma cobertura foliar positiva, essa espécie atrai formigas pretas que levaram à destruição total da planta em pouco tempo. Vale ressaltar que a muda do vaso resistiu por mais tempo, mas também foi destruída, o que não permitiu obter o resultado referente ao mês de maio.

Em relação a Ipoméia, embora seu percentual de cobertura foliar tenha variado ao longo dos meses, essa atingiu uma das médias mais altas entre as cinco espécies, chegando a 96,62% plantada no vaso e 99,27% plantada em solo. Embora apresente essa variabilidade entre os meses, a espécie se recuperou rapidamente, voltando a brotar novos ramos e uma floração, que é bastante expressiva e numerosa. Essa espécie chamou atenção por ser a única entre as cinco, que quando plantada em vaso ramificou novas hastes. Além disso, ela solta raízes auxiliares ao longo do seu crescimento vertical, e por isso sua aparência fica bem irregular, espalhando novos ramos por toda a malha do painel. Assim como a Ipomeia, a Tumbérgia Azul também atingiu índices altos no percentual de cobertura foliar, chegando a 100% da cobertura

em ambos os casos, vaso e solo. Essas espécies se adaptaram muito bem ao clima e local, e mantiveram uma sequência positiva na sua cobertura foliar.

A espécie que se mostrou menos favorável para suportes em fachadas de edifícios foi a *Congea*. Ela é uma espécie excelente quanto a cobertura foliar, no entanto, essa é uma trepadeira muito agressiva e rústica. Seu suporte precisa ser bem estruturado para suportar o peso da planta e a manutenção deve ser frequente, pois ela solta muitas hastes novas ao longo do seu desenvolvimento, e essas acabam se embaraçando ao longo da estrutura. Apesar de não ter boas características para aplicação em fachadas de edifícios, é uma planta muito indicada para cercas vivas, ou para contenção de barrancos. Analisando sua cobertura foliar, a espécie demorou para se adaptar, mas ao longo dos meses atingiu 84,62% plantada em vaso e 79,30% plantada no solo.

É importante ressaltar que cada espécie possui características distintas e que irão influenciar na sua capacidade de sombreamento como, por exemplo, o maior ou menor grau de cobertura da folhagem, sua velocidade de crescimento, seu porte, folhas perenes ou caducifólias. Ao comparar a *Ipoméia* e a *Tumbérgia Azul*, por exemplo, notamos que há uma diferença considerável entre o tamanho das folhas, sendo que a *Ipoméia* apresenta uma filotaxia de folhas lobadas e pequenas, com o centro da folha mais largo e arredondado. Já a *Tumbérgia Azul* é favorecida por ser composta de folhas inteiras, mais finas e alongadas. Isso ajudou a influenciar na cobertura mais rápida da espécie em comparação às outras.

Em relação às condições de plantio das cinco espécies, notou-se uma adaptação e evolução melhor das mudas que foram plantadas em vasos. No entanto, as mudas que estão plantadas no solo, desenvolveram mais hastes para ramificação, o que ajudou a aumentar a distribuição e cobertura foliar da área delimitada para a amostra. Essa informação é importante, pois na Arquitetura, em edifícios mais altos é comum utilizar jardineiras para plantar a vegetação em envoltórias. Sendo assim, diante do acompanhamento e análises feitas, foi possível observar que o desenvolvimento dessas espécies não é tão afetado por estarem plantadas em uma área menor.

Outra observação importante neste estudo, está relacionada às características físicas do protótipo, como a malha, quantidade e distância de mudas inseridas, assim

como o local de implantação. Para esse estudo os protótipos foram alocados em um ambiente livre de obstáculos que pudessem causar o sombreamento do painel. Por esse motivo, as plantas foram expostas a radiação máxima ao longo do dia, favorecendo o seu desenvolvimento. Sendo assim, para que os resultados sejam positivos é importante inserir as espécies em locais que recebam o máximo de radiação solar durante o dia. Quanto à malha do painel, ficou claro que ela pode influenciar positivamente no direcionamento e cobertura foliar da espécie. O uso de malhas mais fechadas, por exemplo, vai aumentar a profundidade foliar e influenciar na estética visual do crescimento da espécie. E por último, a quantidade de mudas e o distanciamento entre elas também pode acelerar e aumentar a profundidade foliar.

4.1.2.2 Conclusão

Um dos objetivos deste experimento era fornecer como resultado dados referentes à cobertura foliar de espécies trepadeiras que sirvam de entrada para novos estudos que utilizam a simulação como metodologia para analisar fachadas verdes. Com a metodologia experimental adotada, a pesquisa conseguiu reunir dados referentes a cinco espécies com características físicas diferentes. No entanto, esses dados são referentes a espécies aptas ao clima tropical de altitude, por isso, as simulações propostas devem ser consideradas para essas condições climáticas.

A utilização do *software ImageJ* como ferramenta para a quantificação de dados e processamento de imagens digitais, mostrou ser uma ferramenta de fácil utilização e eficaz na obtenção das medidas do percentual de cobertura da folhagem das trepadeiras estudadas. O *software* tem a vantagem de ser simples, de código aberto e com uma quantidade significativa de módulos *plug-ins* que permitem estender seus recursos. Apesar de não ser um método tão recente, na Arquitetura não é comum ser utilizado, porém, tornou o processo de análise mais fácil, rápido, econômico e não destrutivo. Diante dessas características é possível realizar pesquisas de qualidade com menor custo, mão-de-obra e com precisão equivalente aos métodos que utilizam o integrador de área foliar.

É importante ressaltar que uma das limitações dessa pesquisa foi seguir uma análise estatística sistemática para avaliar o comportamento de cada espécie estudada. Sabemos que um experimento precisa de muitas mudas e várias repetições para ser validado, no entanto, por termos uma área reduzida e pouca verba para a

construção dos protótipos, foi necessário simplificar o método e trabalhar com poucas mudanças por painel. Diante disso, ressaltamos a importância de trabalhos futuros aprofundar em análises estáticas, assim como, aumentar a variabilidade de espécies e parâmetros analisados.

4.1.2 Profundidade foliar

Para trabalhar com profundidade e tridimensionalidade da planta, a profundidade foliar também foi observada nas cinco espécies de trepadeiras (Quadro 10). Porém, como foi apresentado no Quadro 9, algumas espécies não resistiram os 15 meses para a coleta de dados completa de 1 ano, e por isso a profundidade foliar dessas espécies foram coletadas antes do prazo, no período em que a muda senesceu, como é o caso da Ipomeia, Guaco e Congea. Além dessas, o Feijão borboleta não apresentou porte suficiente para esse tipo específico de coleta de dados, e por esse motivo ele não apresenta resultados no quadro abaixo.

Quadro 15 - Profundidade foliar das espécies trepadeiras

Profundidade foliar na horizontal	Tumbérgia Azul	Ipomeia	Guaco	Congea	Feijão borboleta
Base	0.15 m	< * 0.05 a 8 m	* 0.10 m	* 0.20 m	-
Centro	0.20 m	< * 0.08 a 0.13 m	* 0.20 m	* 0.25 m	-
Topo	0.60 m	< * 0.15 a 0.20 m	* 0.25 m	* 0.50 m	-

Legenda: * Resultado coletado antes de completar 12 meses
 - A espécie não atingiu porte para essa medição
 < Espécie que apresentou variação na profundidade foliar ao longo dos meses

Fonte: Os autores. Dados coletados entre abril e maio de 2021.

Entre as cinco espécies, a Tumbérgia, Congea e o Guaco foram as que apresentaram uma profundidade maior e constante no decorrer do seu crescimento, sempre aumentando em profundidade no painel. Entretanto, a Ipomeia foi uma espécie que sofreu com a adaptação e clima do local, o que ocasionou a perda de folhas ao longo do ano. Por esse motivo, no período da coleta essa espécie teve variação na sua profundidade foliar e não apresentou uma estabilidade física permanente.

4.1.3 Massa vegetada

Por fim, o último parâmetro coletado em campo foi a massa vegetada de cada espécie. Lembrando que esses valores são referentes a todas as partes que compõem a muda, folhagem, flores e caule. Todos esses elementos foram considerados na versão molhada e seca, para ter uma estimativa da sobrecarga em dias de chuva, quando as folhas absorvem a umidade (Quadro 16).

Quadro 16 - Massa vegetal das espécies trepadeiras

1 muda	Tumbérgia Azul	Ipomeia	Guaco	Congea	Feijão borboleta
Vaso/seca kg	8.300 kg	* 5.100 kg	* 7.600 kg	* 9.100 kg	-
Solo/seca kg	14.400 kg	* 8.500 kg	* 10.230 kg	* 13.700 kg	-
Vaso/encharcada kg	9.400 kg	* 7.320 kg	* 8.800 kg	* 11.260 kg	-
Solo/encharcada kg	17.800 kg	* 10.650 kg	* 11.300 kg	* 15.015 kg	-

Legenda: * Resultado coletado antes do prazo de 1 ano
- A espécie não atingiu porte para essa medição

Fonte: Os autores. Dados coletados entre abril e maio de 2021.

No quadro acima, podemos notar que novamente algumas espécies foram coletadas antes do prazo final de 1 ano. Somente a Tumbérgia Azul fechou o ciclo de 12 meses e, o Feijão borboleta não atingiu o porte necessário para a extração desse parâmetro, sendo desconsiderado.

Vale ressaltar que para a coleta da massa vegetada extraímos dados de cada muda isolada, situação em vaso e situação em solo. Por isso, no ato da pesagem cada muda foi separada e removida dentro de cada limite determinado anteriormente no método apresentado do Capítulo 3. Sendo assim, os valores apresentados no Quadro 11 correspondem a Kg de cada muda em uma área mínima de 0.96m² para muda em vaso (0.40m x 2.40m), e 2.40m² para mudas em solo (1.00m x 2.40 m).

Embora esses resultados não tenham seguido uma análise estatística rigorosa como de costume e realizado em laboratórios de agronomia, conseguimos obter uma estimativa mínima para direcionar e adicionar em projetos de fachadas verdes. No próximo Capítulo iremos utilizá-lo e orientar como cada muda sobrecarrega de acordo com o seu tamanho, quantidade e tipo de espécie.

4.1.4 Características botânicas de cada espécie











Ao longo do acompanhamento e observação do experimento, outras informações referentes às características botânicas de cada espécie também foram identificadas. Apesar de nem todos eles terem sido aplicados neste trabalho, podem ser utilizados para dar um maior direcionamento em projetos, assim como, algumas orientações para manutenção da planta. Portanto, o Quadro 17, pode servir como um guia e manual de cada espécie para futuros projetos e pesquisas.

Quadro 17 - Ficha botânica das espécies trepadeiras

Ficha botânica das espécies trepadeiras						
Descrição geral	Parâmetros	Tumbéria Azul	Ipomeia	Guaco	Congea	Feijão borboleta
	Nome botânico	Thunbergia grandiflora var. laurifolia Benoit, Thunbergia grandiflora Roxb	Batatas cavanillesii G. Don., Convolvulus cairicus L., Ipomoea cavanillesii Roem. & Schult., Ipomoea pentaphylla Cav.	Mikania glomerata Spreng	Congea tomentosa var. oblongifolia Schauer., Calochlamys capitata C.Presl., Congea oblonga Pierre ex Dop., Congea petelotii Moldenke., Congea tomentosa var	Clitoria ternatea, asian pigeonwings, bluebellvine, ervilha azul, ervilha borboleta, feijão-borboleta, ervilha cordofan e ervilha Darwin
	Nome popular	Tumbergia-azul, Azulzinha, Tumbergia-azul, Enredaderade-trompeta-azul, Bignonia-azul	Corriola, Jetirana, Jitirana, Ipomoea, Compainhas, Boasnoites, Campanilla	Guaco, Guaco-trepador	Congea, Cõeça, Terciopelo	Feijão borboleta
	Família	Acanthaceae	Convolvulaceae	Compositae (Asteraceae)	Lamiaceae	Fabaceae
	Grupo	Liana ou Trepadora	Liana ou Trepadora	Liana ou Trepadora	Liana ou Trepadora	Liana ou Trepadora
	Uso	Pérgolas, treliças e caramanchões, Grades e alambrados	Forração, Coroamento de muros, Grades e alambrados	Uso medicinal e ornamental	Coroamento de muros, Pérgolas, treliças e caramanchões, Grades e alambrados	Pérgolas, treliças e caramanchões, Grades e alambrados
	Tempo de vida	Permanente	Permanente	Permanente	Perene	Permanente
	Origem	Índia	Brasil	Sul do Brasil	Malásia, Índia	Ásia, Tailândia e Malásia
Ambientação	Clima	Tropical de altitude, Tropical, Tropical úmido	Tropical de altitude, Tropical, Tropical úmido	Subtropical e Tropical	Tropical de altitude, Subtropical, Tropical, Tropical úmido	Tropical de altitude, Subtropical, Tropical, Tropical úmido
	Ambiente	Pleno Sol	Pleno sol (não tolera geadas)	Pleno Sol	Pleno sol (não suporta geadas)	Pleno Sol (Não suporta geadas e baixas temperaturas)
Aparência	Composição formal	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular
	Sombreamento	Média	Rala	Média	Alto	Média
	Tipo de fixação em superfícies	Volúvel e sem gavinhas	Volúvel e sem gavinhas	Volúvel e sem gavinhas	Volúvel e sem gavinhas	Volúvel e sem gavinhas
	Crescimento direcionado	Para um único lado (sinistrorso ou dextrorso)	Para um único lado (sinistrorso ou dextrorso)	Para um único lado (sinistrorso ou dextrorso)	Para um único lado (sinistrorso ou dextrorso)	Para um único lado (sinistrorso ou dextrorso)
Dimensões	Altura da muda	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,25 m
	Altura da planta	6 m	3 m	2,5 m	4 m	4 m
	Diâmetro do tronco	0,01 m	0 m	0,01 m	0,03 m	0
	Diâmetro da copa	2,5 m	2 m	2 m	2 m	1 m
Estrutura da raiz	Estrutura básica	Pivotantes / Profundas e fistuloso	Axial/Pivotante	Axial/Pivotante	Axial/pivotante	Axial/pivotante
	Direção de crescimento	Solo somente	Solo e suportes	Solo somente	Solo somente	.
	Raízes auxiliares	Sem presença de raízes auxiliares	Sem presença de raízes auxiliares e Lenticela	Sem presença de raízes auxiliares	Sem presença de raízes auxiliares	Com presença de raízes auxiliares
Sistema Axial/caule	Gemas axilares	Monopodial	Monopodial	Monopodial	Simpodial	Monopodial
	Arranjo das folhas/Fitolaxia	Oposta	Oposta	Oposta	Oposta	Oposta
	Forma de crescimento	Lenhosa e volúvel	Liana ou Trepadora	Liana ou Trepadora	Lenhosa e volúvel	Liana ou Trepadora
	Direcionamento	Sinistrorso e dextrorso	Sinistrorso (direita)	Sinistrorso e dextrorso	Sinistrorso (direita)	Sinistrorso e dextrorso
Estrutura básica da folhagem	Cor das folhas	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Arranjo das folhas/Fitolaxia	Folha inteira	Folha lobada	Folhas inteira	Folha inteira	Folha composta
		Pinatinérvea	Palmatisssecta	Pinatinérvea	Pinatinérvea	Pinaticomposta
	Forma da folha	Deltóide (Triangular)	Elíptica/Oval	Deltóide (Triangular)	Elíptica/ Oval	Elíptica/Oval
		Mais larga na base	Mais larga no centro	Mais larga na base	Mais larga no centro	Mais larga no centro
		Base foliar Obtusa	Base foliar arredondada	Base foliar cuneada	Base foliar decorrente	Base foliar cuneada
		Ápice foliar agudo	Ápice foliar arredondada	Ápice foliar agudo	Ápice foliar acuminado	Ápice foliar cuneado
	Tipo de margem da folha	Serreada	Inteira	Inteira	Repanda	Repanda
	Venação foliar	Camptódroma	Craspedódroma	Camptódroma	Reticulada	Craspedódroma
	Tamanho das folhas	0,08 m	0,07 m	0,08 m	0,08 m	.
	Persistência das folhas	Permanente	Permanente	Permanente	Caduca	Permanente
Indumento/tricoma/textura	Tricomas tectores	Tricomas tectores	Tricomas tectores	Tricomas tectores	Tricomas tectores	
	Glabro	Glabro	Glabro	Velutino	Pilosa/Aveludada	
	Cartácea	Nítida	Nítida	Rugosa	.	

Continua...

Continuação...

	Diversidade adaptativa	.	.	.	Algumas folhas não são fotossintéticas (brácteas)	.
	Imagem					
Floração	Cor da Floração	Azul	Rosa, Roxo	Branca	Rosa, Roxo	Roxa
	Forma das folhas	Gamopétala	Gamopétala	.	Bráctea	Carena
	Arranjo das folhas/Fitolaxia	Solitária	Solitária	Cacho	Cacho	Solitária
	Tamanho das Flores	0,08 m	0,1 m	0,03 m	0,01 m	0,04 m
	Odor	Sem odor	Com odor	Com odor	Sem odor	Sem odor
	Indumento/tricoma/textura	Tricomas tectores/Velutino e Cupuliforme	Tricomas tectores/Velutino	Tricomas tectores/Glabro	Tricomas tectores/ Velutino e Hifódroma	Tricomas tectores/Velutino
	Atração de polinizadores	Besouros	Abelhas	Abelhas	Sim	Lagartas
Época de Floração	Inverno, Outono, Primavera, Verão	Inverno, Outono, Primavera, Verão	Inverno, Primavera	Inverno e Primavera	Inverno, Outono, Primavera, Verão	
Imagem						
Frutos	Frutos	Não	Não	Sim	Não	Sim
	Época de frutificação	.	.	Primavera, Verão	.	O ano todo
	Tamanho do Fruto	.	.	0,20 a 0,30 m	.	0,05 a 0,75 m
Propagação	Formas de propagação	Estaquia	Mudas e sementes	Estaquia	Alporquia, Estaquia	Sementes
	Época de propagação	Inverno, Outono, Primavera, Verão	Inverno, Outono, Primavera, Verão	Primavera, Verão	Inverno, Primavera	Inverno, Outono, Primavera, Verão
	Aparência	Rústica	Rústica	Rústica	Rústica	Rústica
	Crescimento	Rápido	Médio	Rápido	Médio	Rápido
	Solos indicados	Humoso	Pobre ou pouco exigente	Solo arenoso e rico em matéria orgânica	Pobre ou pouco exigentes	Fértil
Manutenção	Pragas e doenças	Lagarta e doenças fúngicas
	Regas	Semanais	Três vezes por semana nos dias quentes, uma ou duas nos dias frios	Semanais	Três vezes por semana nos dias quentes, uma ou duas nos dias frios	Semanais
	Podas	Podar ramos mal formados, secos e/ou doentes	Podar para manter o visual adequado	Podar ramos mal formados, secos e/ou doentes	Podar para manter o visual adequado	Podar ramos mal formados, secos e/ou doentes
Observações	Floresce com mais intensidade na primavera e verão	É considerada como planta invasora. Muito usada para revestir cercas, muros e grades, no entanto, não é indicada para caramanchões. Suas sementes são tóxicas, suporta secas e não suporta pisoteio		Necessita de apoio para crescer	As flores verdadeiras, guarnecidas pelas brácteas rosa-arroxeadas, são brancas e passam despercebidas	Necessita de apoio para crescer. Evitar plantio em climas frios e com solos secos
		* IAF: $\hat{y} = 0.58 * LW$	*	*	* IAF: $\hat{y} = 1.18 + 0.61 * LW$	*

* Equação alométrica para estimar o IAF por m². Resultado obtido com trabalhos em colaboração com a Fitotecnia.

* Ainda não foi feita a equação alométrica.

Fonte: Os autores. Dados coletados em maio de 2021.

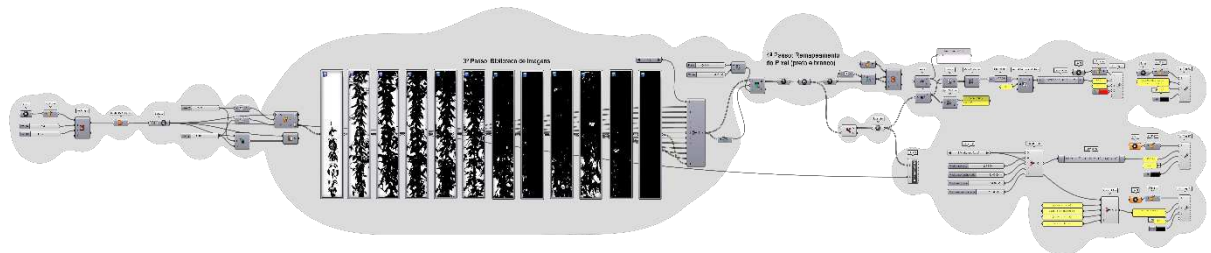
4.2 ORGANIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DO CÓDIGO PARA FACHADA VERDE

Nesta seção, iremos apresentar como cada etapa do código foi desenvolvida e resolvida utilizando o *software* de modelagem *Rhinceros* e seu *plug-in Grasshopper*. Para chegar no resultado desejado, organizamos a definição do código em 4 grupos principais, sendo eles: **1º Grupo:** Definição da cobertura vegetal; **2º Grupo:** Aplicação da cobertura vegetal em superfície plana; **3º Grupo:** Aplicação da cobertura vegetal em superfície orgânica; e o **4º Grupo:** Aplicação da cobertura vegetal em superfície em curva/linhas.

Grupo 1: Definição da cobertura vegetal

O primeiro grupo (Figura 40) foi pensado para reunir todos os paramentos botânicos coletados em campo, formando uma base de dados para os próximos grupos. Através dele, testamos e calibramos os quantitativos iniciais de cada espécie antes de aplicá-las em fachadas.

Figura 40 – Grupo 1: Definição da cobertura vegetal de cada etapa



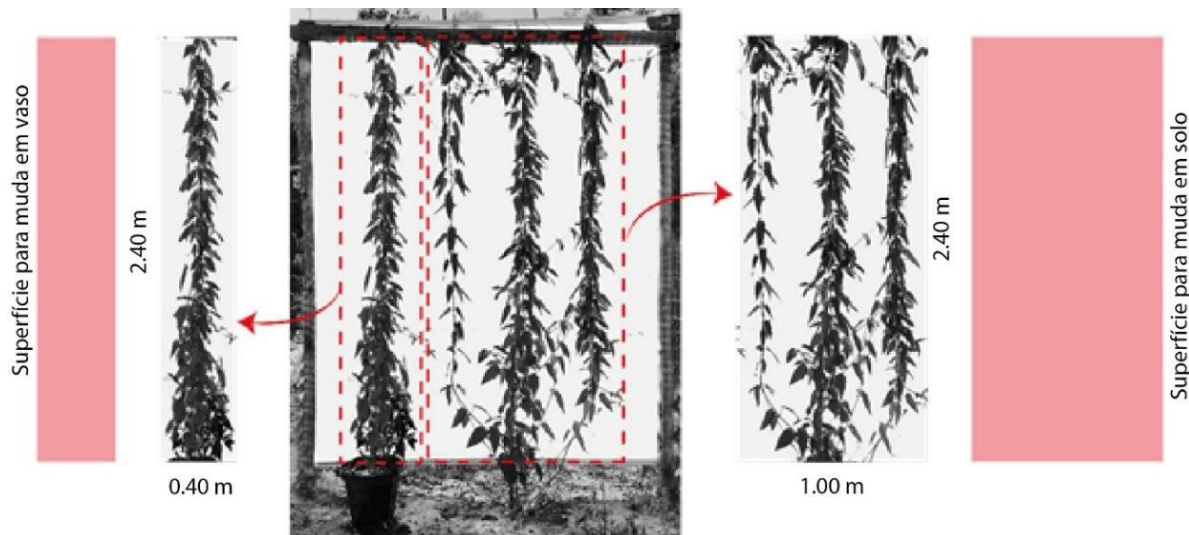
Fonte: Os autores, 2022.

Como resultado inicial temos a criação de um modelo base, que serve como geometria para o mapeamento em superfícies opostas. É nesse grupo que decidimos o tipo de muda que queremos simular e sua forma de plantio (vaso ou solo), acompanhamos o desenvolvimento da espécie durante as 4 estações do ano, analisamos os quantitativos referente a cobertura foliar e massa vegetada, e ajustamos alguns efeitos de textura, como cor, emissividade e transparência das folhas.

Em primeiro momento criamos uma superfície (simples e plana) utilizando o *Rectangle* levando em consideração o mesmo dimensionamento das imagens binárias registradas em campo (Figura 41). Ou seja, para imagens referentes a muda em vaso temos as coordenadas “X” e “Y” com: 0.40m por 2.40 m, e para as imagens referente a muda em solo as coordenadas “X” e “Y” são: 1.00 m por 2.40 (Figura 42).

Mantendo essas medidas conforme o tamanho original, o mapeamento pôde ser mais preciso, sem distorções e com maior fidelidade aos quantitativos encontrados.

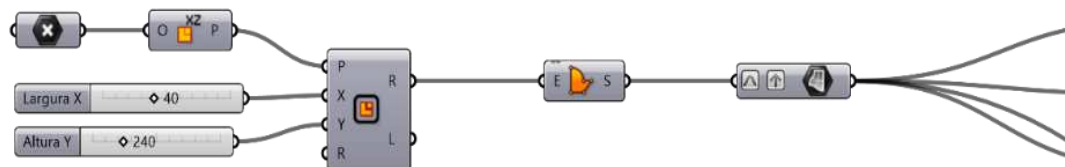
Figura 41 - Dimensões da superfície para a primeira etapa do código



Fonte: Os autores, 2021.

TUMBERGIA (VASO)

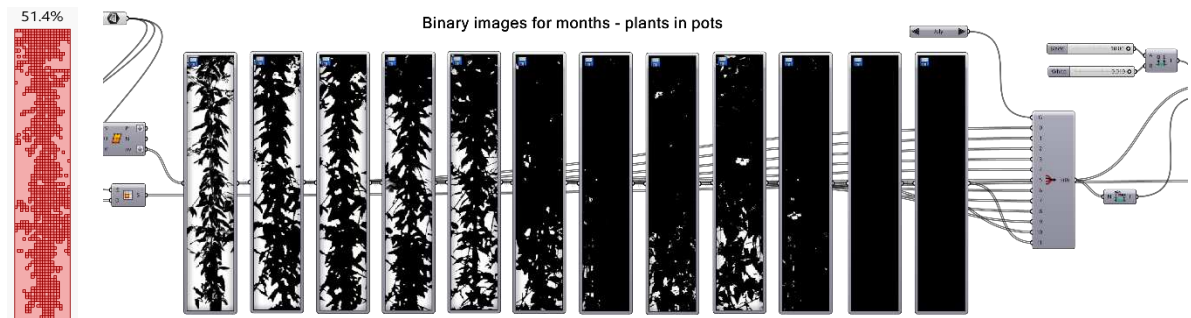
1º Passo: Dimensões (x, y) da planta



Fonte: Os autores, 2021.

O próximo passo foi fazer a subdivisão dessa superfície com o *Divide Domain* para dividir a superfície em domínios bidimensionais e em segmentos iguais juntamente com o *Isotrim* para definir o tamanho dos *pixels* utilizados no mapeamento das imagens binárias com o componente *Image sampler*. Como a intenção era ter uma simulação mensal do desenvolvimento da espécie, criamos uma sequência com as doze imagens binárias da muda representando os meses de evolução (Figura 42), e aplicamos o componente *Value list* pelo *Stream filter* para controlar sua alteração ao longo dos meses.

Figura 42 - Sequência de imagens binárias no Grasshopper

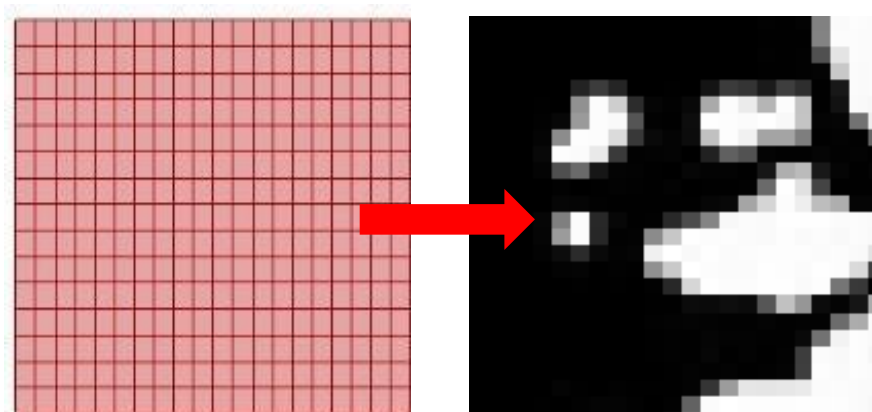


Fonte: Os autores, 2021.

Neste caso, temos imagens referente aos doze meses porque estamos utilizando a Tumbérgia, a única espécie que não senesceu durante a coleta de dados. No entanto, o código permite adicionar mais imagens ou menos imagens, vai depender dos dados e objetivo de cada pesquisa.

Outro objetivo era associar no código o valor referente ao percentual da cobertura foliar de cada muda. Para resolver isso, utilizamos o componente *Divide Surface* para dividir a superfície base em várias repartições de forma que se contabiliza a mesma quantidade de *pixels* da imagem binária (Figura 43). Por isso, dependendo do tamanho da imagem, essa superfície deve ser ajustada para atender as necessidades de cada projeto.

Figura 43 - Zoom parcial da superfície subdividida para leitura dos pixels



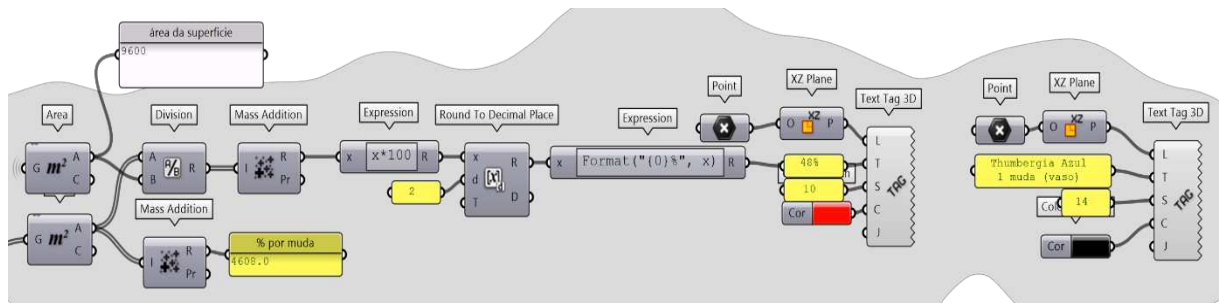
Fonte: Os autores, 2021.

Feita a configuração da quantidade de “*pixels*” *desejados*, as imagens passam pelo componente *Remap number* remapeando os valores numéricos do canal RGB (branco e preto) que o *Image sampler* determina, e com *Number sliders* controlamos

a quantidade de preto referente à folhagem até chegarmos o mais próximo da imagem original.

Depois de ajustar esses valores, o componente *Dispatch* seleciona todos os pontos pretos que representam a folhagem e direciona-os para uma expressão que calcula o percentual referente a folhagem (Figura 44). A expressão utiliza uma regra de três, dividindo a área coberta pelas folhas (canal preto) pela área (m²) total da fachada, resultando no percentual de cobertura foliar da fachada em determinada época do ano.

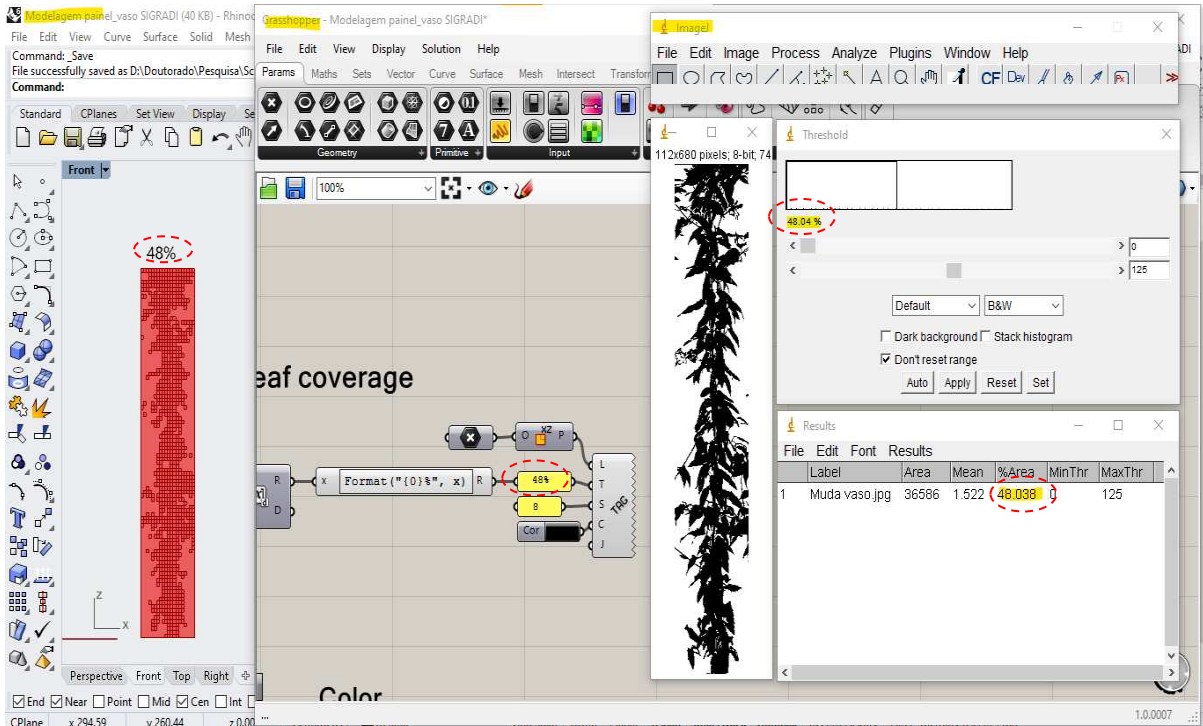
Figura 44 - Expressão para estimar o percentual de cobertura foliar



Fonte: Os autores, 2021.

Criando essa definição, foi possível ajustar os valores do percentual de acordo com os mesmos índices encontrados no *software ImageJ* (Figura 45). Portanto, quando o resultado era irregular com o valor obtido original, um ajuste na subdivisão dos *pixels* da superfície era alinhado até atingir o mesmo valor ou próximo ao do *software ImageJ*. E assim, foi feita a calibração de parâmetros para cada imagem binária.

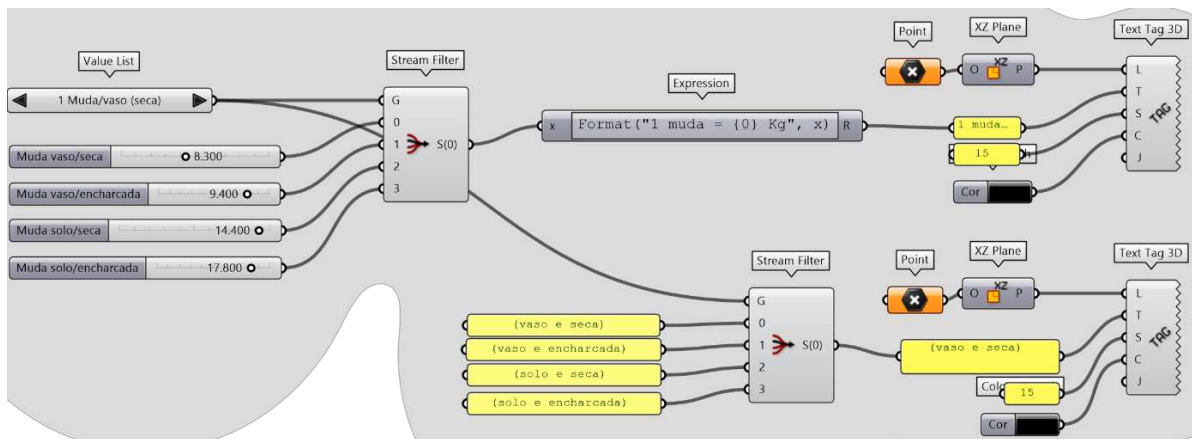
Figura 45 - Calibração do percentual de cobertura foliar: Grasshopper e ImageJ



Fonte: Os autores, 2021.

Outro quantitativo que criamos a partir de expressões matemáticas (Figura 46), foi estimar a massa vegetal aproximada da folhagem em condições seca e encharcada, para dias de chuva, por exemplo. A regra aplicada é a soma da quantidade de mudas (unidades) multiplicada pela massa vegetada (Kg) de 1 muda. Portanto, através do *Value list* e *Stream filter* escolhemos a condição física da muda (seca ou encharcada) e multiplicamos pela quantidade de mudas utilizadas na fachada para obtermos uma estimativa prévia de quanto essa camada vegetada sobrecarregará em Kg ao longo dos meses.

Figura 46 - Expressão para estimar a massa vegetada



Fonte: Os autores, 2021.

Por fim, a definição desse primeiro grupo contém uma seção que permite configurar a profundidade foliar e os canais de emissividade e transparência da folhagem, parâmetros que podem ajudar a analisar questões ambientais. Para esses processos utilizamos os componentes *Extrude*, *Custom preview* e *Create material*. Diante da configuração exposta, fechamos a definição da cobertura vegetal associando todos os parâmetros botânicos nesse primeiro grupo, utilizando processos e componentes simples do *Grasshopper*.

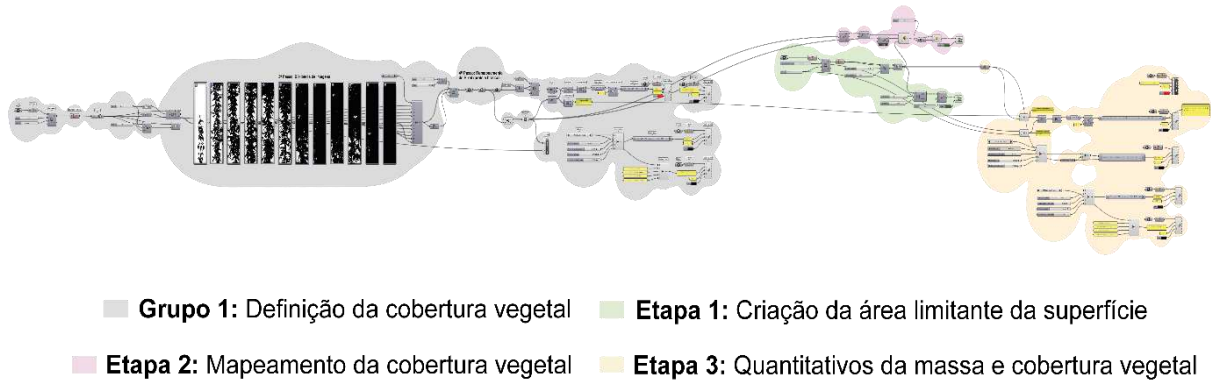
Com a definição da cobertura vegetal pronta onde temos todos os parâmetros fisiológicos reunidos, organizados por espécie e mensalmente ao longo de um ano, testamos algumas possibilidades de aplicação do modelo em superfícies hipotéticas diferentes. Geralmente, a superfície da fachada verde é simples, vertical e retangular sem grande complexidade. No entanto, além da superfície tradicional testamos outras possibilidades de aplicação com a modelagem algorítmica para aumentar o nível a variabilidade geométrica projetual da fachada, gerando superfícies mais complexas e não euclidianas (isto é, que além da largura e comprimento, possuem profundidade).

Sendo assim, as próximas etapas do código visam adaptar os parâmetros para configurações geométricas distintas.

Grupo 2: Aplicação da cobertura vegetal em superfície plana

A primeira superfície criada, é conhecida como a mais tradicional para a aplicação de fachadas verdes, uma superfície simples e plana, sem grandes deformações ou complexibilidade na sua forma, e que ao todo resultou em 3 etapas principais **Etapa 1:** Criação da área limitante da superfície; **Etapa 2:** Mapeamento da cobertura vegetal; e **Etapa 3:** Quantitativos da massa e cobertura vegetal (Figura 47): Na sequência segue a explicação de cada etapa.

Figura 47 - Definição completa para superfície plana



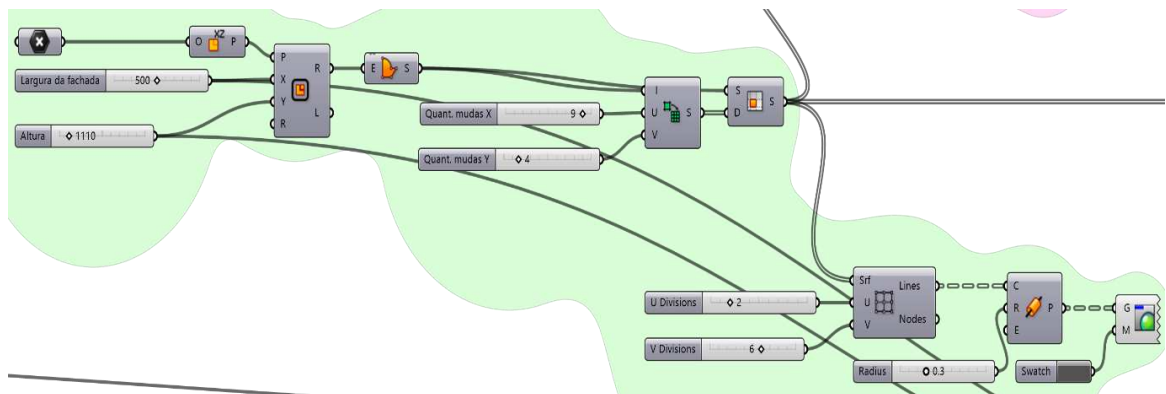
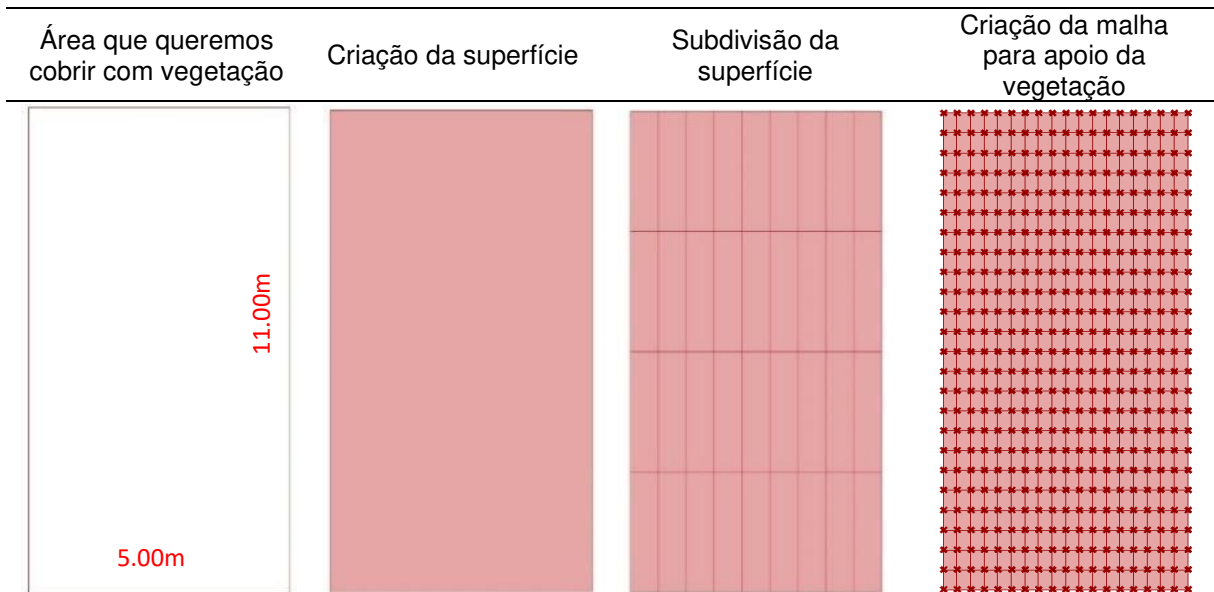
Fonte: Os autores, 2022.

Assim como explicado nos tópicos anteriores, iremos utilizar o **Grupo 1** para alimentar outros grupos do código. Portanto, antes de iniciar as próximas etapas do **Grupo 2** definimos o tipo da planta, plantio, e época do ano que queremos analisar a espécie escolhida (dados definidos no Grupo 1).

Tendo isso definido, entramos na **Etapa 1:** Criação da área limitante para a superfície: onde dimensionamos uma superfície que queremos cobrir com vegetação. Essas medidas podem ser definidas utilizando o componente *Rectangle* juntamente com o *Boundary surfaces* para aplainar a superfície. Depois aplicamos o componente *Isotrim* aliado com o *Divide domain* para criarmos subdivisões na superfície referente a quantidade de mudas que queremos para o eixo “X” e “Y”, formando assim, uma malha.

A imagem abaixo (Figura 48), por exemplo, apresenta uma superfície hipotética de 5.00m por 11.00m, que precisou de 9 mudas ao longo do eixo X e 4 para o eixo Y. Essa quantidade de mudas (quantidade de divisões na malha) precisa ser ajustada até não interferir na qualidade da imagem mapeada. Caso contrário, haverá distorções ou deformações dos *pixels*, e isso irá interferir no resultado final dos quantitativos. Por fim, voltamos na criação da superfície e adicionamos a malha para crescimento e apoio da vegetação, utilizando o *Grid structure* do *plugin LunchBox*.

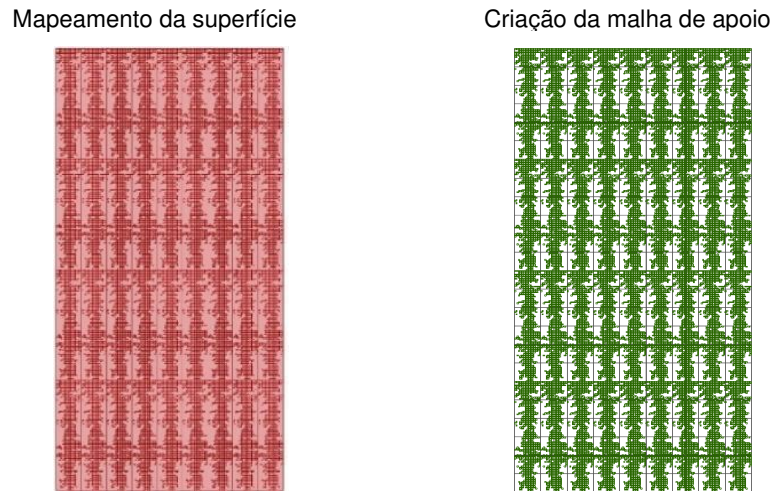
Figura 48 - Processo de criação da superfície Etapa 1



Fonte: Os autores, 2022.

Depois de definir a quantidade de mudas necessárias, seguimos para a **Etapa 2**: Mapeamento da cobertura vegetal, onde mapeamos o modelo do **Grupo 1** criado na etapa anterior para essa superfície utilizando *Map to surface* (Figura 49).

Figura 49 - Processo de mapeamento na superfície Etapa 2



Fonte: Os autores, 2022.

O resultado dessa geometria pode ser extrudado com o *Extrude* para criar a profundidade foliar da vegetação (Figura 50) e o acabamento de textura da folhagem com *Create material*.

Figura 50 - Resultado inicial da profundidade foliar

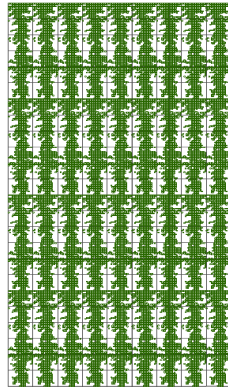


Fonte: Os autores, 2022.

É importante ressaltar, que esse é um processo que computa muitos dados e, portanto, exige um bom processador ou então ocorrerá muito travamento e falhas na modelagem. Outra observação a ser citada é que esse foi o ponto inicial para testar a profundidade da planta, sabemos que na vida real seu formato não segue uma forma tão alinhada e uniforme. Porém, foi dado o primeiro passo para que novos ensaios e simulações primárias possam ser realizadas e o acabamento das folhas mais explorado.

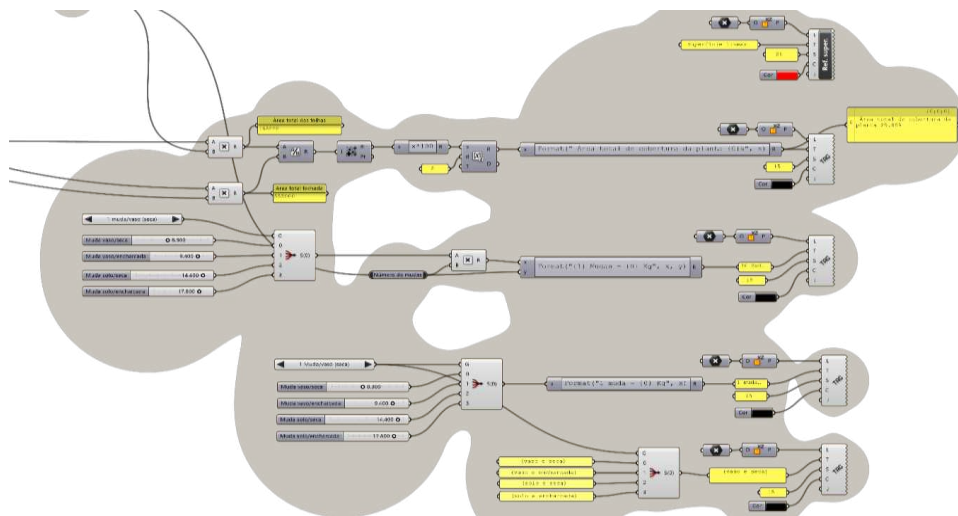
A **Etapa 3**: Quantitativos da massa e cobertura vegetal: é destinado para os quantitativos referente a área foliar e massa vegetada. Aplicamos as mesmas expressões criadas no Grupo 1, mantendo a mesma regra para o cálculo. Os resultados podem ser observados na imagem abaixo (Figura 51), onde temos 36 mudas que equivalem a 298.8kg de massa vegetada, e 29.89% de cobertura foliar.

Figura 51 - Quantitativos da superfície simples



Superfície simples

Área total de cobertura da planta: **29.89%**
 1 muda: **8.3 kg** (vaso e seca)
 36 mudas: **298.8 kg**

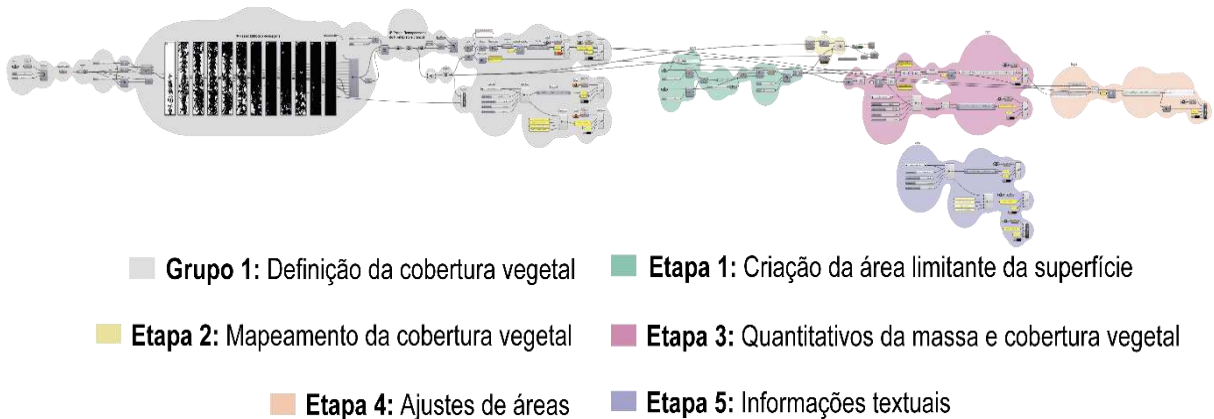


Fonte: Os autores, 2022.

Grupo 3: Aplicação da cobertura foliar em superfície orgânica

O **Grupo 3** tem intenção de explorar o mapeamento da vegetação (Grupo 1) em dimensões irregulares, e entender o crescimento e fechamento da vegetação quando aplicada em superfícies mais complexas. Por isso, a definição foi combinada em cinco etapas e pensada para uma superfície hipotética, podendo ser alterada de acordo com cada projeto ou necessidade específica (Figura 52). A intenção aqui, era prever possíveis erros de leitura no mapeamento ou cálculo nos quantitativos, e então corrigi-los. Na sequência segue a explicação de cada etapa.

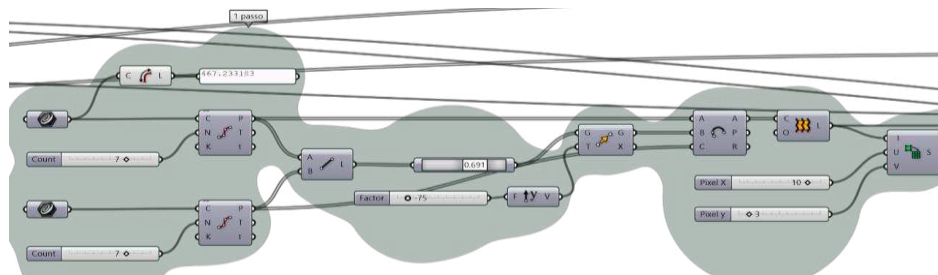
Figura 52 - Definição completa para superfície orgânica



Fonte: Os autores, 2022.

Na **Etapa 1 - Criação da área limitante da superfície**: Como o propósito era criar uma deformação na volumetria, optamos por iniciar a superfície utilizando curvas *splines*, pois elas nos dão alguns pontos de controle para ajuste da forma desejada. Essas curvas foram criadas no *Rhino*, e serviram de *input* no *Grasshopper* para utilizarmos o *Divide curve*, onde dividimos as curvas em partes iguais e duplicamos uma cópia para a coordenada “Z” (Figura 53).

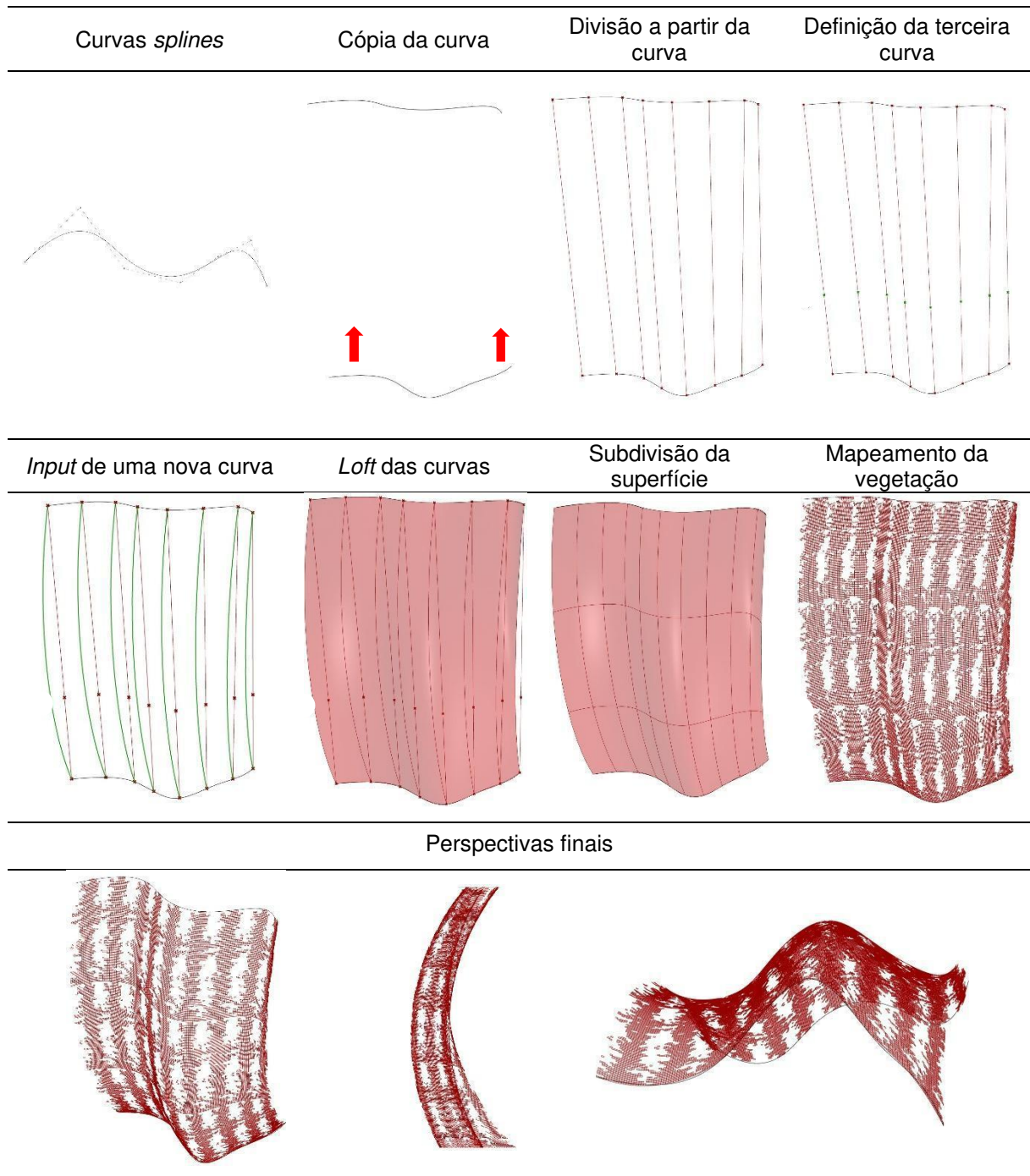
Figura 53 - Definição da Etapa 1



Fonte: Os autores, 2022.

Na sequência, ambas as curvas foram ligadas por linhas e planeadas com o *Loft* para fechar a superfície. Para dar o efeito 3D na superfície, movimentamos para a coordenada “Y” uma nova linha que pode ser controlada com o *Point on curve* para a posição desejada. Assim, conseguimos explorar a forma desejada e obter o efeito irregular controlado pelos pontos espalhados na superfície e parâmetros do *Grasshopper* (Figura 54).

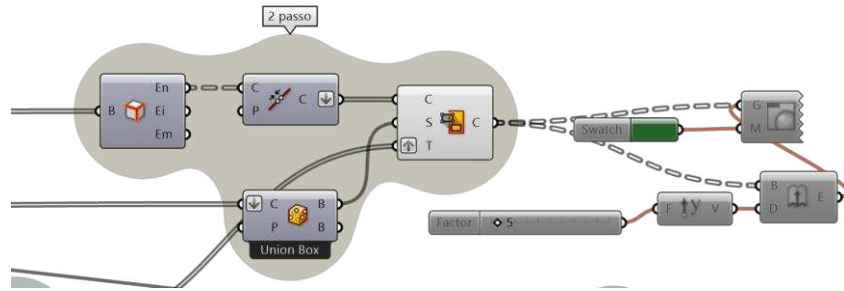
Figura 54 - Processo de criação da superfície



Fonte: Os autores, 2022.

Depois de definir a superfície, utilizamos o *Isotrim* para subdividir a superfície na quantidade de mudas desejadas, e em seguida mapeamos a vegetação (Figura 55) para essas subdivisões (**Etapa 2**).

Figura 55 - Etapa 2: Mapeamento da cobertura vegetal



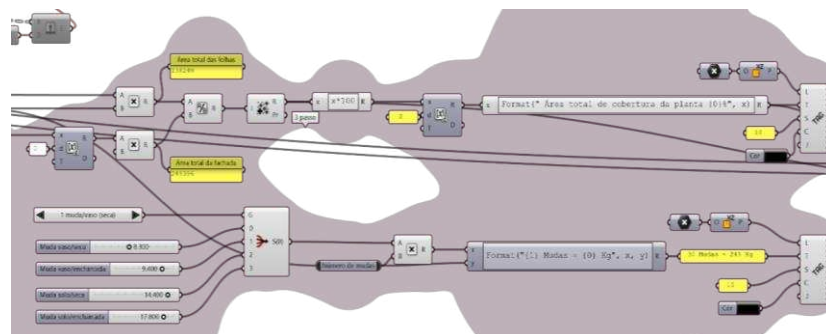
Fonte: Os autores, 2022.

Para que o mapeamento da imagem não deforme a proporção do *pixel*, levamos em consideração a divisão da superfície com o *Isotrim* o mais próximo ao tamanho das dimensões da vegetação. Por último, adicionamos a profundidade e coloração da folhagem com o *Extrude* e o *Create material*.

É importante ressaltar, que esse código permite o teste de diferentes geometrias, e por isso o usuário não precisa dominar o *Grasshopper*, mas sim a modelagem. Portanto, outros *softwares* de modelagem como o *Sketchup* por exemplo, podem servir a modelagem inicial da fachada e posteriormente serem exportados para mapeamento da cobertura vegetal no *Rhino* e *Grasshopper*.

Na **Etapa 3** - Quantitativos da massa e cobertura vegetal: aplicamos as expressões matemáticas referente a cobertura e massa vegetada para quantificar dados de projeto e obter algumas diretrizes. O procedimento segue o mesmo processo que nos casos anteriores, porém, como esse caso está trabalhando com elementos tridimensionais, agora devemos adicionar o componente *Area* para conseguir quantificar a área da superfície (Figura 56).

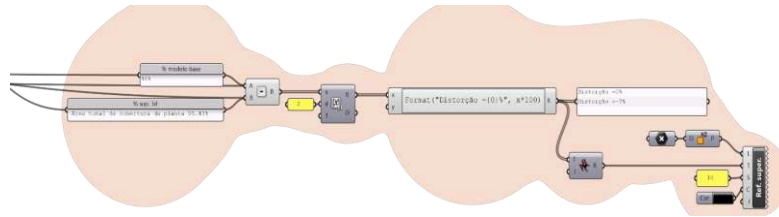
Figura 56 - Quantificação dos dados Etapa 3



Fonte: Os autores, 2022.

Logo, notamos que algumas áreas mapeadas foram deformadas pelo movimento (deformação) das curvas e, portanto, acabaram contabilizando uma porcentagem maior do que o esperado. Assim, um ajuste (**Etapa 4 - Ajuste de áreas**) foi feito para descobrir a margem de erro quantificada e manter a integridade e realismo dos dados (Figura 57).

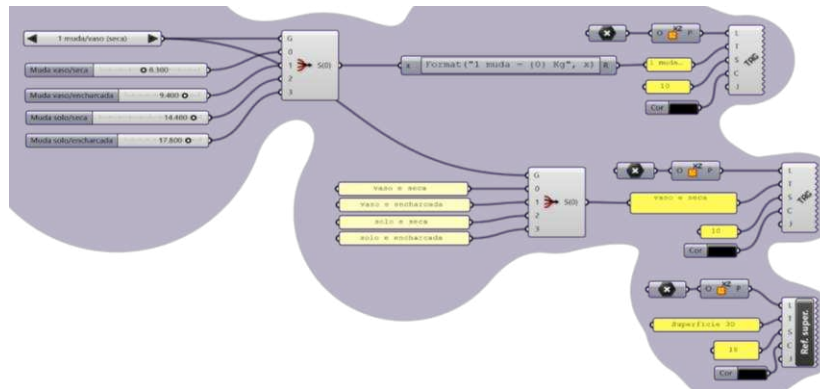
Figura 57 - Etapa 4: Ajuste de áreas



Fonte: Os autores, 2022.

Por fim, todos os quantitativos e informações textuais são direcionadas para a **Etapa 5** (Figura 58). Além dos textos, essa etapa também permite escolher as informações para o tipo de plantio, quantidade de mudas e seu peso estimado.

Figura 58 - Etapa 5 - Informações textuais



Fonte: Os autores, 2022.

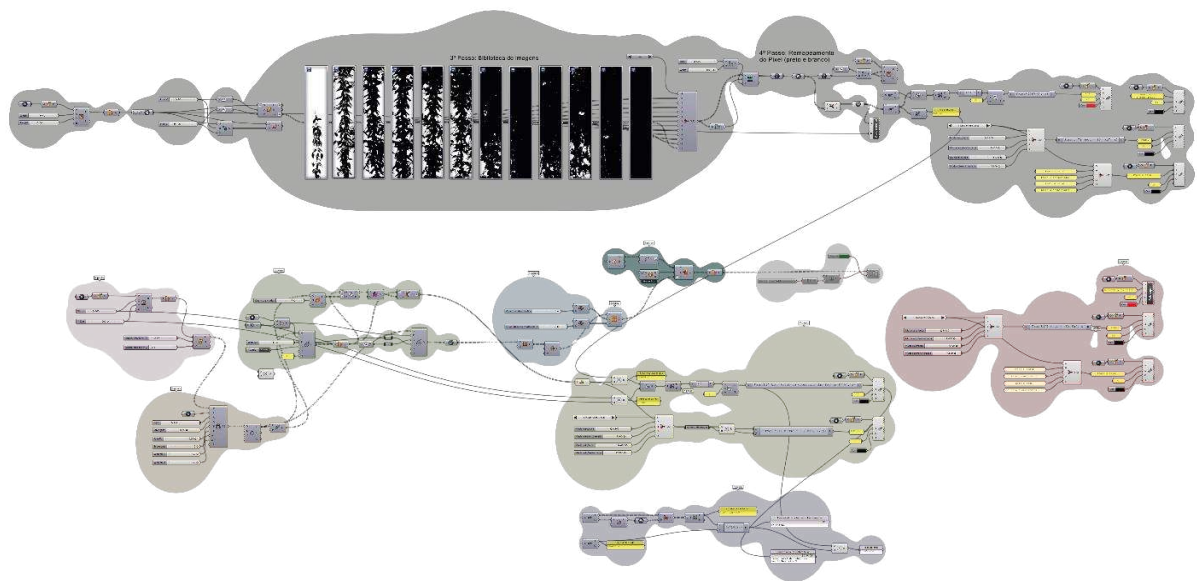
Grupo 4: Aplicação da cobertura foliar em superfície curva

Neste caso, queríamos testar formas mais orgânicas de crescimento da planta para outras malhas. Para isso, partimos da hipótese que para obtermos o mapeamento em malhas irregulares, deveríamos encontrar uma forma de mapear a vegetação a partir de curvas condutoras. Então, algumas tentativas foram realizadas utilizando componentes indicados para essa função como, por exemplo: *Array curve*, *Sweep 1*, *Perp frame* e *Flow*. No entanto, ambos resultaram uma amostra incoerente com o objetivo do trabalho e apresentaram algumas limitações como irregularidade

no mapeamento, deformação da imagem e o desencontro entre os vértices mapeados.

Diante dessas limitações, optamos por trabalhar com o componente *Pinch'n spread points*, onde foi possível controlar o formato das curvas condutoras e explorar malhas mais orgânicas. A Figura 59 mostra a sequência final dessa definição e na sequência segue a explicação de cada etapa para mostrar como solucionamos o mapeamento da vegetação para as curvas condutoras.

Figura 59 - Definição completa para superfície curva

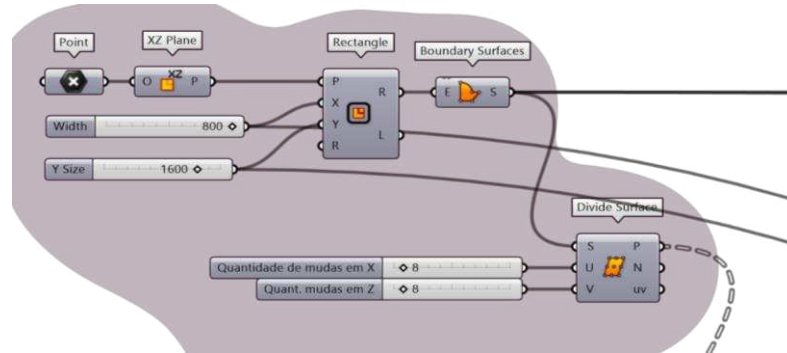


- Grupo 1: Definição da cobertura vegetal
- Etapa 1: Criação da área limitante da superfície
- Etapa 2: Geometria das malhas de suporte
- Etapa 3: Superfície vegetada em fita
- Etapa 4: Correção de arestas
- Etapa 5: Mapeamento da cobertura vegetal
- Etapa 6: Textura e densidade vegetal
- Etapa 7: Quantitativos da massa e cobertura vegetal
- Etapa 8: Correção da limite da fachada
- Etapa 9: Informações textuais

Fonte: Os autores, 2022.

A **Etapa 1**, segue definindo as dimensões de uma superfície (criação da área limitante da superfície) onde subdividimos com uma grade de pontos utilizando o *Divide surfaces* para gerar a quantidade de linhas para as mudas que queremos aplicar nas coordenadas “X” e “Y” (Figura 60).

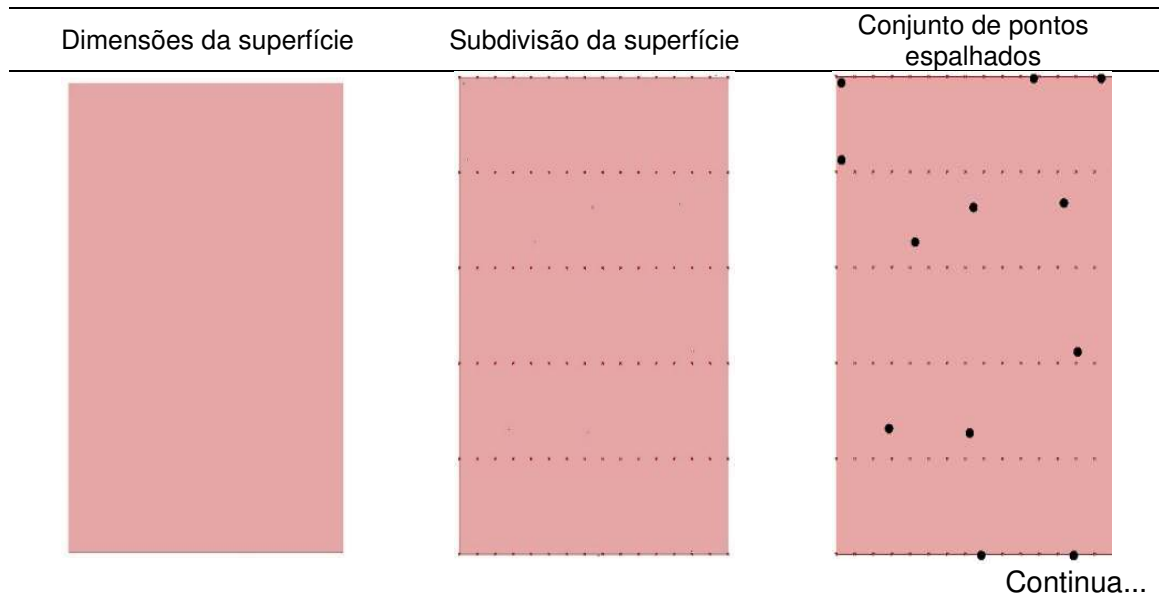
Figura 60 - Etapa 1 – Criação da área limitante da superfície



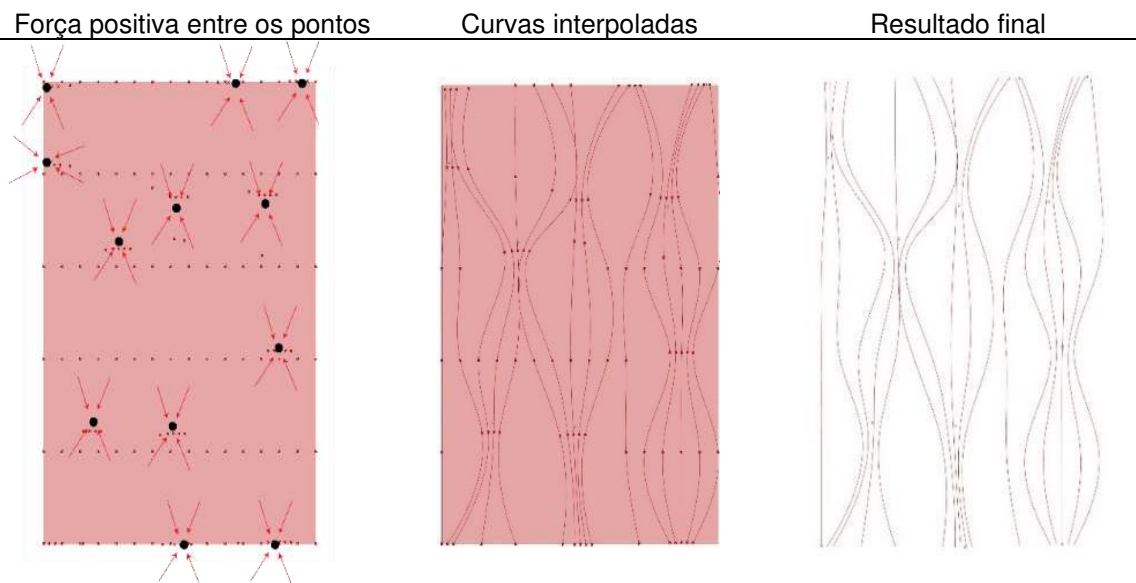
Fonte: Os autores, 2022.

Na sequência (**Etapa 2 – Geometria das malhas de suporte**) aplicamos o componente *Pinch'n spread points para* espalhar um conjunto de pontos na superfície e aplicar valores de raio neles. Além do raio, definimos a força e queda em cada ponto localizado nessa superfície, gerando forças positivas distribuídas pela malha. Para que as curvas condutoras (malhas de suporte) fossem visualizadas foi preciso criar uma curva interpolada através desse conjunto de pontos utilizando o *Interpolate* (Figura 61).

Figura 61 – Resultado do processo de criação das malhas de suporte



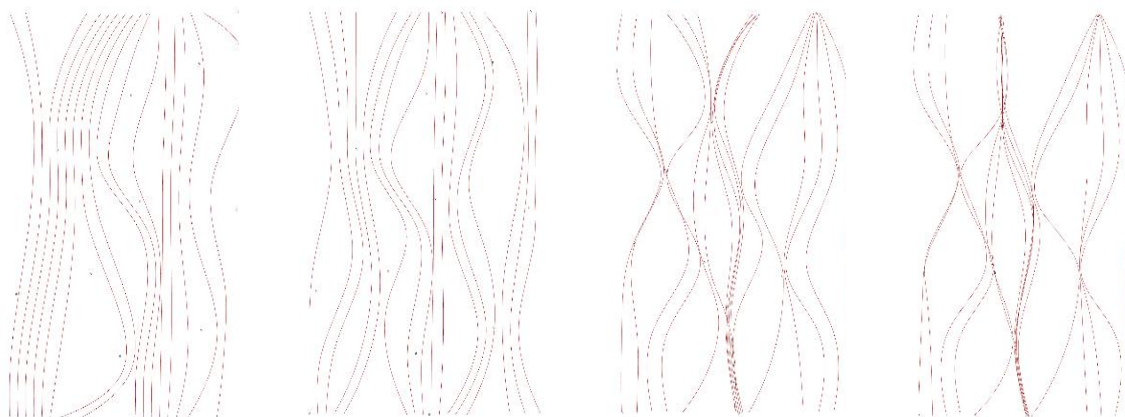
Continuação...



Fonte: Os autores, 2022.

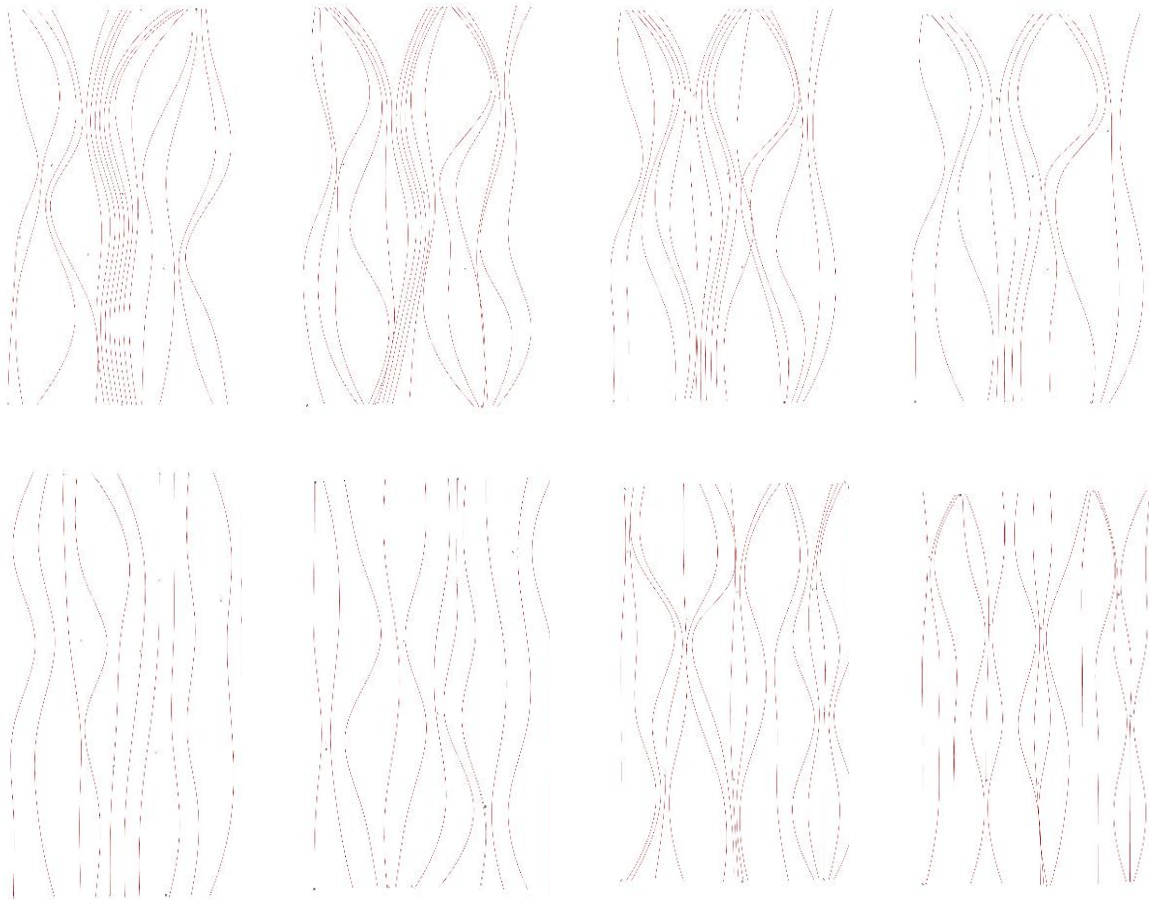
Assim, criamos uma malha orgânica que pode ser controlada através da mudança dos pontos e modificação de parâmetros relacionados ao raio e a força centralizadas. O resultado da forma da geometria obtida pode variar de acordo com a quantidade de curvas criadas, a localização dos pontos e o raio definido (Figura 62).

Figura 62 – Variação da forma das malhas de suporte mudando a localização dos pontos e força aplicada



Continua...

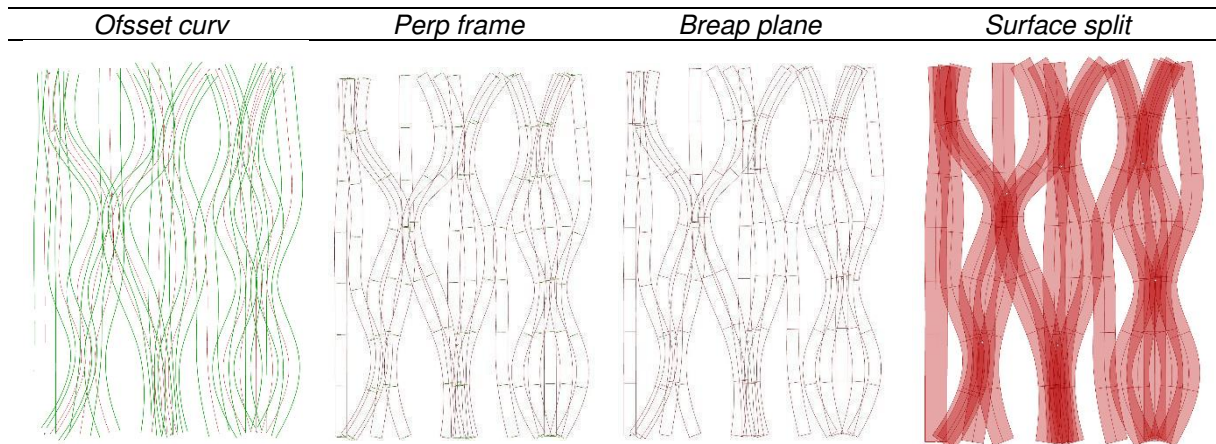
Continuação...



Fonte: Os autores, 2022.

Na **Etapa 3** (Superfície vegetada em fita), aplicamos o componente *Offset curv* nas curvas criadas para deslocar uma nova curva para ambos os lados, e depois planamos com o *Boundary surfaces*. Assim, criamos uma nova superfície para cada curva, a qual nomeamos de superfície fita. No entanto, antes de mapearmos a vegetação foi preciso configurarmos a quantidade de mudas necessárias para a direção “Y”, ou seja, criar novas subdivisões para a direção “Y”. Para resolver isso, utilizamos o *Perp frame* que criou novos planos, o *Brep plane* que fixou uma nova aresta a cada plano e por fim o *Surface split* para planar essas novas superfícies (Figura 63). Essa subdivisão foi essencial para que não houvesse distorção na imagem mapeada na direção “Y”. Portanto, sempre que a dimensão da fachada é alterada, esse valor também é recalculado.

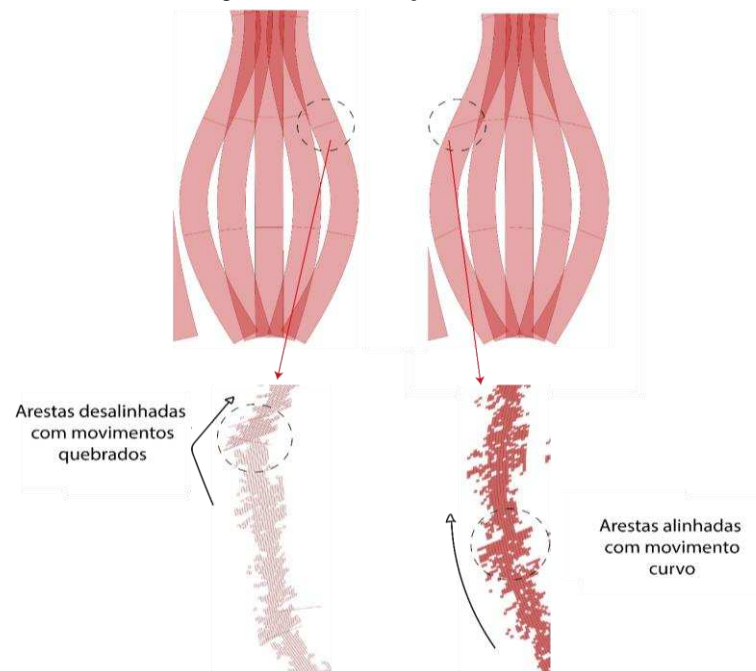
Figura 63 - Processo para criação da superfície em fitas



Fonte: Os autores, 2022.

Na **Etapa 4** (Correção de arestas), o propósito era corrigir as arestas de cada subdivisão, pois queríamos que o mapeamento acompanhasse a curvatura da curva, sem deixar recortes (Figura 64). Por isso, não utilizamos a superfície criada com o *Surface split*, porque ela não estava reconhecendo as divisões que foram criadas na direção “Y”. Assim, geramos uma nova superfície com o *Loft* e aplicamos nela o *Parameter subdivide surfaces* para criar uma nova grade de subdivisão na superfície, dividindo os parâmetros em (u) e (v). Para controlar a quantidade específica de cada parâmetro, utilizamos o *Range*, adicionando um intervalo de números que se refere a quantidade de mudas.

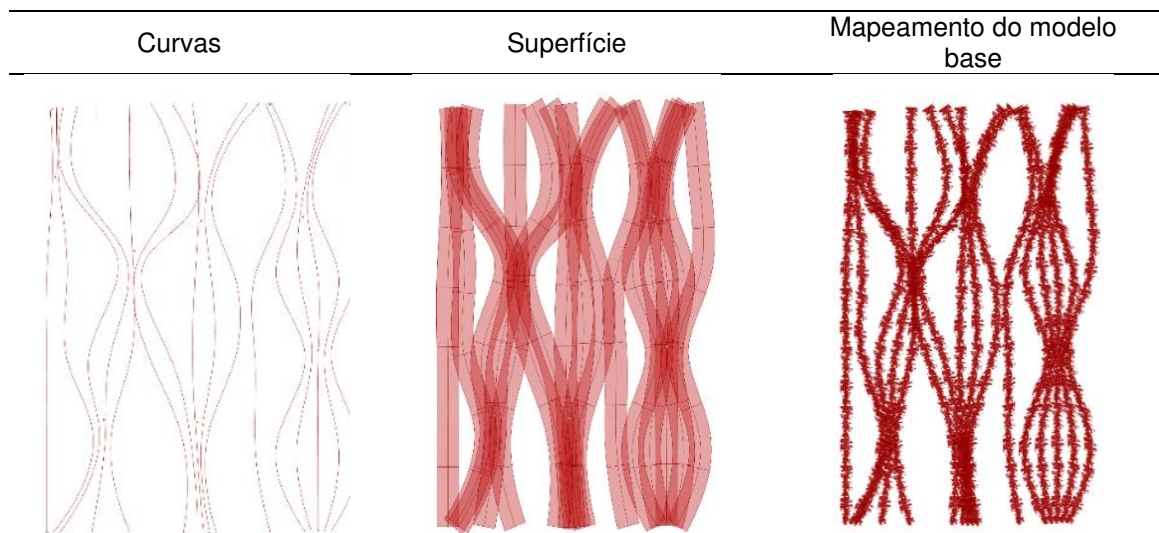
Figura 64 - Correção das arestas



Fonte: Os autores, 2022.

Na **Etapa 5** (Mapeamento da cobertura vegetal) aplicamos o *Bouding box* e *Map to surface*, onde mapeamos o modelo base criado (Grupo 1) anteriormente para as curvas que irão receber o modelo. O resultado é uma superfície com vegetação em movimento e sem distorção em suas arestas (Figura 65).

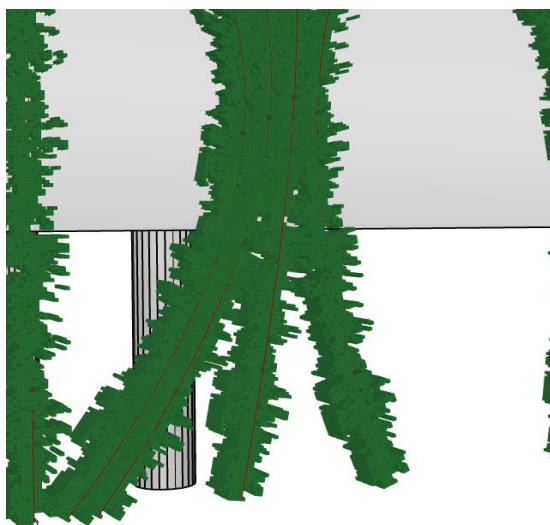
Figura 65 - Processo para mapeamento da vegetação Etapa 5



Fonte: Os autores, 2022.

Após terminar a modelagem da vegetação, na **Etapa 6** (Textura da vegetação), temos a opção de definir a profundidade da camada vegetal com o *Extrude* (Figura 66) e fazer o acabamento da folhagem como, a cor utilizando o *Custom preview*.

Figura 66 - Profundidade e textura Etapa 6

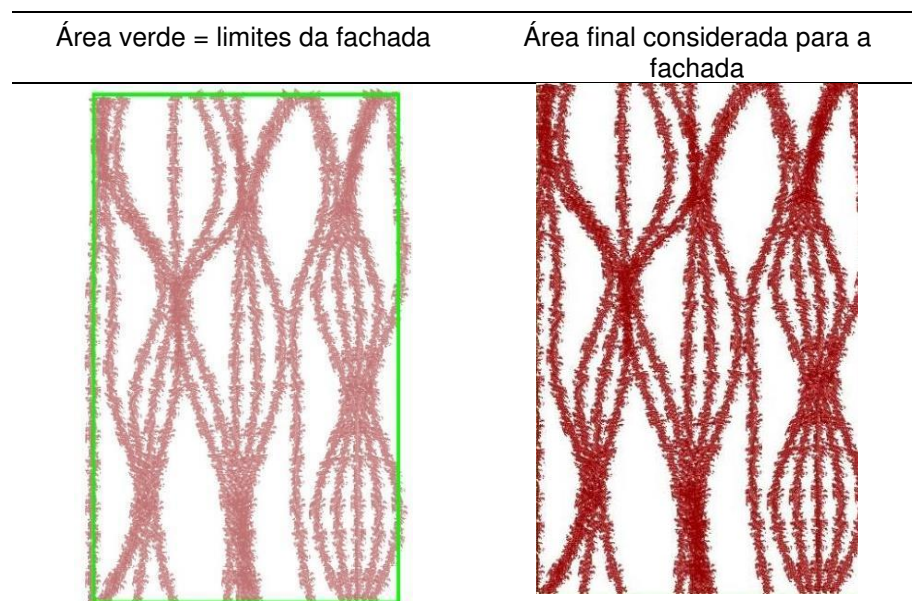


Fonte: Os autores, 2022.

Na **Etapa 7** (Quantitativos da massa e cobertura vegetal) aplicamos as expressões matemáticas para quantificar a carga da massa vegetada e o percentual de cobertura foliar. Inicialmente seguimos o mesmo procedimento feito para a superfície simples, selecionamos os dados da área da fachada e área de preenchimento das folhas e aplicamos a regra.

No entanto, foi observado que as superfícies localizadas na extremidade da fachada estavam saindo para fora do limite de cobertura da fachada (Figura 67).

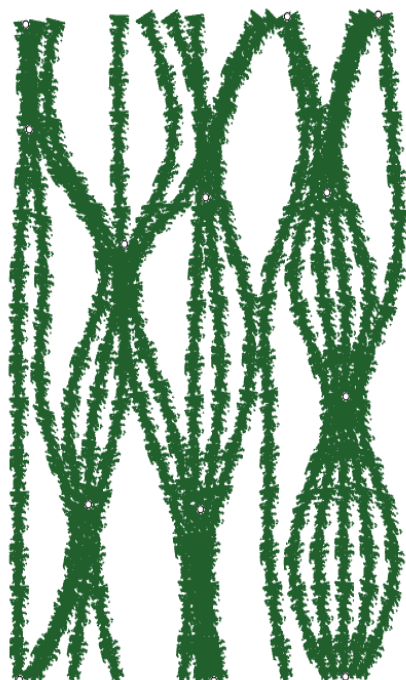
Figura 67 – Área limite da fachada



Fonte: Os autores, 2022.

Para resolver o problema, utilizamos o componente *Point in curve* aliado ao *Cull pattern* para eliminar os pontos que estavam sobressaindo do limite da fachada, e passamos para a fórmula apenas os dados que estão dentro da área estudada (Figura 69). Assim, o cálculo final contabilizou que esse estudo de fachada contém 53,76% de cobertura foliar, apresentando uma margem de erro de 15%, ou seja, 37,86% de cobertura das folhas estão cobrindo a fachada. Em relação a massa vegetada, as 112 mudas mapeadas correspondem a 929,6kg em seu estado seco (Figura 68).

Figura 68 - Etapa 8: Correção da área da fachada



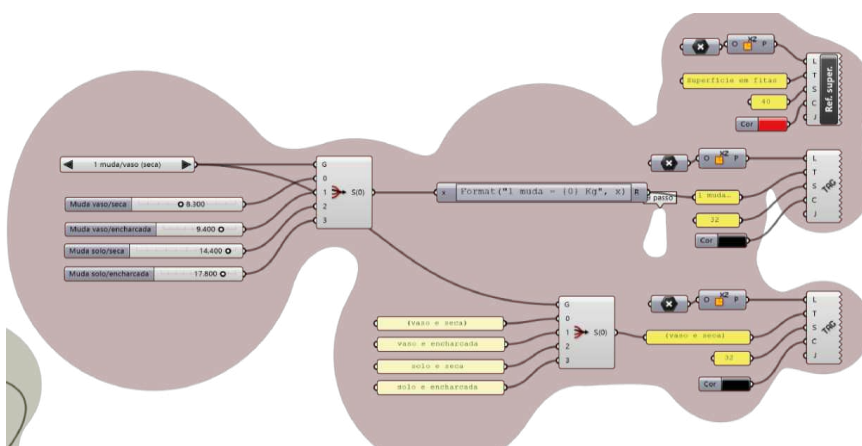
Superfície curva

Área de cobertura das folhas: 53,76%
 Correção da área das folhas: 37,86%
 1 muda: 8,3kg (vaso e seca)
 112 mudas: 929,6kg

Fonte: Os autores, 2022.

A última etapa (**Etapa 9**) do código ficou definida para organizar os textos que descrevem os quantitativos da fachada, e foram feitos com os componentes *Value list* e *Tex tag* (Figura 69). Além dos *plug-ins* do *Grasshopper*, utilizamos alguns componentes do *plug-in Pufferfish* para definição e correções ao longo do código.

Figura 69 - Etapa 9: Informações textuais do código



Fonte: Os autores, 2022.

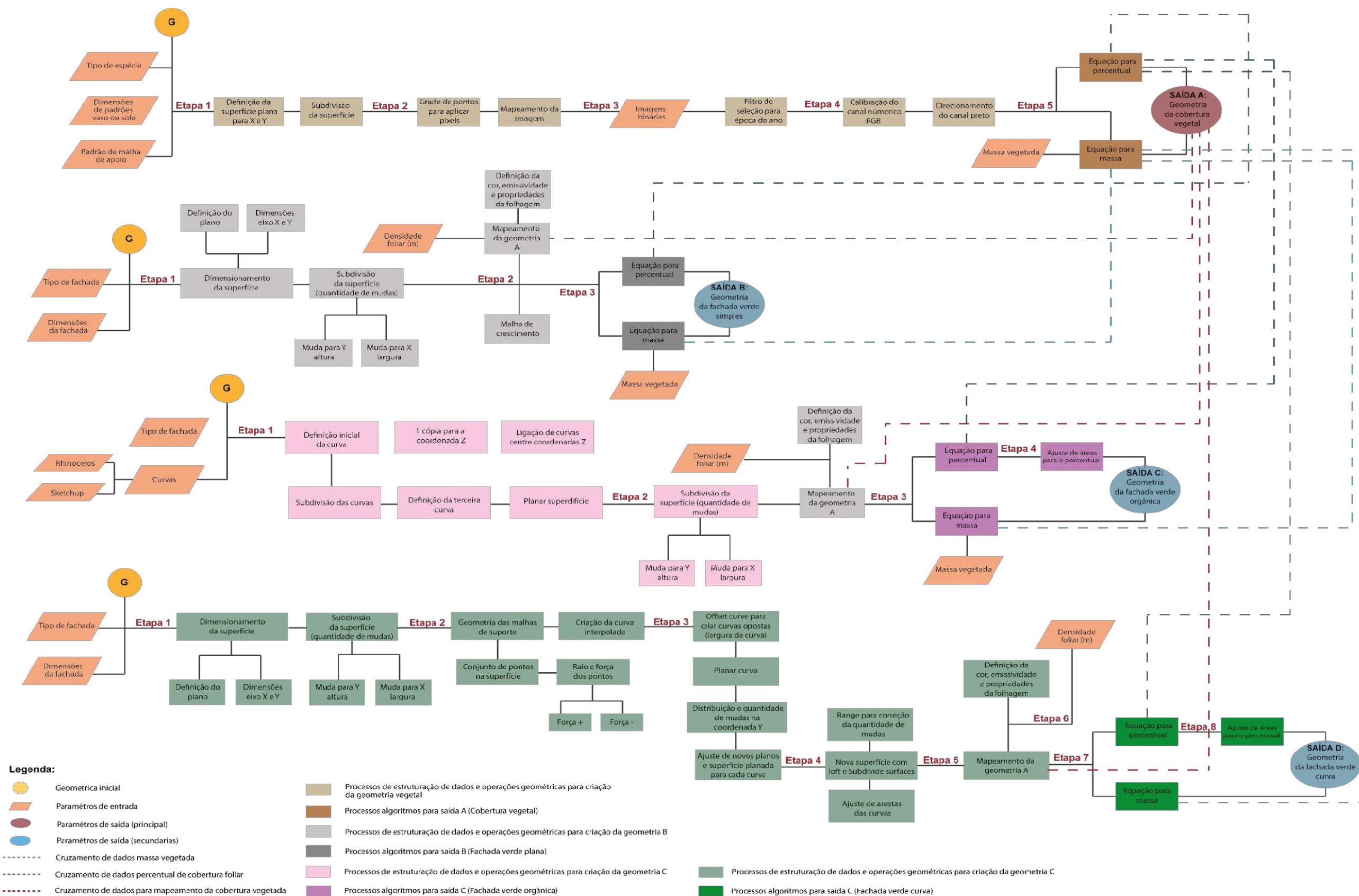
4.3 Síntese do código

De acordo com os casos de superfícies que foram apresentadas, vale ressaltar que ambos foram exemplos hipotéticos, apenas para poder aplicar e testar em malhas diferentes os parâmetros botânicos coletados em campo. O resultado do fechamento da cobertura foliar e a massa vegetada podem ser variados e modificados de acordo com cada projeto, permitindo novas geometrias e quantitativos.

Conseguimos controlar através de parâmetros o tipo de malha para o crescimento da planta, tipo de planta, a forma que será plantada, quantidade de mudas, e quanto ela fecha a cada mês. Além das modificações físicas da fachada verde, conseguimos estimar inicialmente a massa vegetada atuante na estrutura da fachada do edifício, e deixamos algumas saídas para continuação do código em outras áreas, como: análise estrutural e análises de conforto ambiental.

Abaixo segue um diagrama esquemático resumindo e representando o fluxograma de todas as operações realizadas pelo algoritmo para a geração da cobertura vegetal e aplicação da mesma em superfícies (Figura 70).

Figura 70 - Diagrama de fluxo de operações algorítmicas do código



Fonte: Os autores, 2023.

4.4 RECOMENDAÇÕES E DIRETRIZES PARA POTENCIALIZAR A EFICÁCIA DO CÓDIGO

Este tópico irá ressaltar algumas observações que devem ser levadas em consideração antes de iniciar uma simulação ou construção da fachada verde, de forma que ajude a direcionar o projetista/pesquisador a escolher os materiais e espécies mais adequadas com o objetivo do seu trabalho, seja para resolver as questões ambientais, estruturais ou *design* estético de um edifício.

Lembrando que as recomendações apresentadas aqui, referem-se para as espécies estudadas e utilizadas nesta pesquisa de doutorado, para o clima tropical de altitude do sudeste brasileiro. Caso as diretrizes sejam utilizadas para outra região, é preciso adequá-las para espécies locais. Como estamos trabalhando com elementos vivos, nem sempre esses irão se comportar de forma igual em outras regiões do Brasil e do mundo, por isso, é importante conhecer essas necessidades e características de cada espécie antes de qualquer definição no *Grasshopper* ou em outro *software* de modelagem 3D.

Portanto, sempre que um projeto de fachada verde ou estudo de simulação for realizado, antes da sua aplicação e execução, devemos nos questionar com as seguintes questões:

1. Qual meu objetivo com esse projeto?

Sempre que optamos em utilizar a fachada verde em um projeto é importante ter definido antes qual o seu objetivo, seja para potencializar ou reduzir alguns fatores, como:

- Para sombreamento;
- Para condições térmicas;
- Para atenuar ruídos;
- Para diminuir a visibilidade interna/externa de fachadas;
- Para aumentar a sustentabilidade e a biodiversidade local.

Cada um irá nos direcionar para um tipo de planta, malha necessária e forma construtiva específica para cada caso.

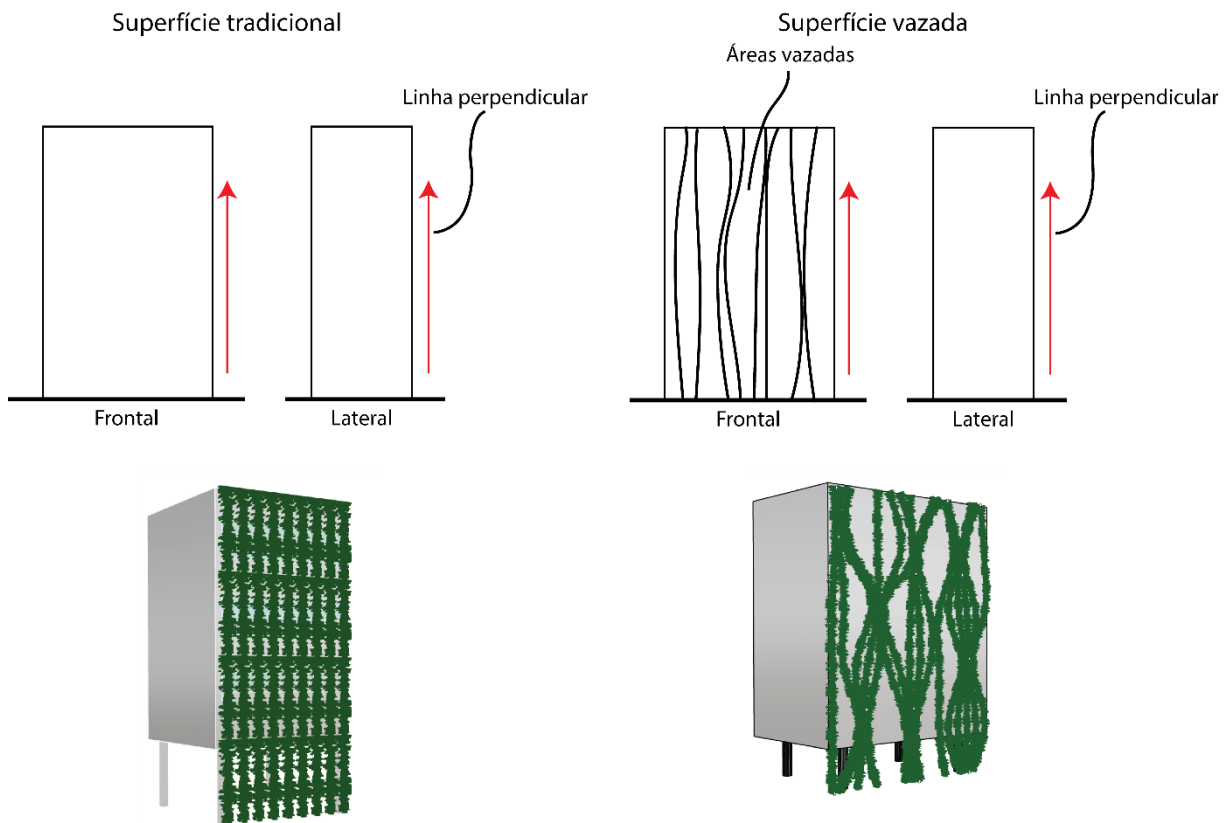
2. Que tipo de superfície vou cobrir com vegetação?

A geometria determinará a complexidade construtiva e o *design* final do projeto, assim como, o tipo de espécie mais indicado para cada caso. Geralmente trabalhamos com as seguintes superfícies:

- Superfícies tradicionais (com linhas perpendiculares), consideradas como simples neste trabalho;
- Superfícies com áreas vazadas (as quais apresentam alguma abertura);
- Superfícies intercaladas (por sacadas e varandas) e;
- Superfícies com ângulos ou curvaturas causando deformações em sua forma (consideradas complexas).

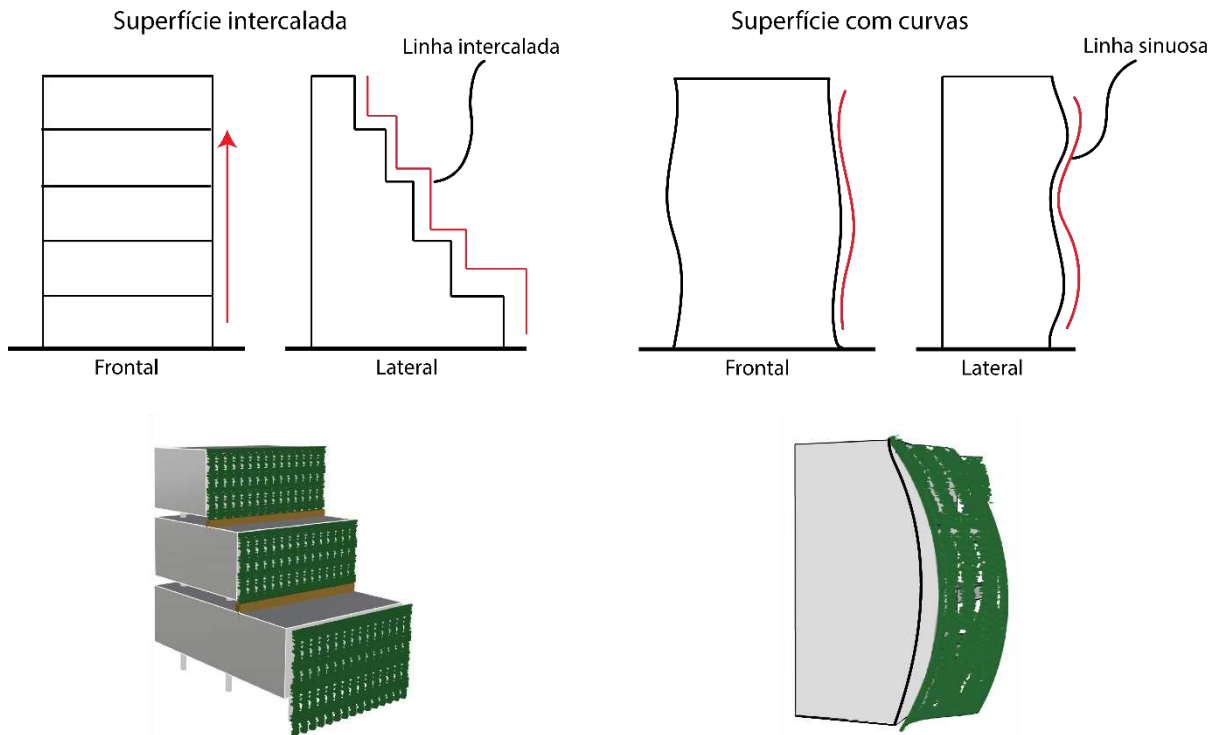
Cada uma exigirá um grau de dificuldade diferente na modelagem e deve relacionar-se com a espécie mais adequada (Figura 71).

Figura 71 - Volumetrias hipotéticas para representar tipos de superfícies



Continua...

Continuação...



Fonte: Os autores, 2022.

Por exemplo, se optarmos por utilizar uma superfície intercalada, devemos considerar se a fachada verde cobrirá os andares a partir do plantio em vasos com interrupção a cada andar, ou se queremos manter o crescimento da espécie de forma contínua, com um único plantio, do início ao fim. Isso irá interferir na forma construtiva e tipo de plantio, e refletirá na manutenção e crescimento da planta.

3. Que tipo de cobertura foliar eu quero para essa superfície?

Na sequência, devemos definir a característica foliar que desejamos obter para essa superfície, rala, densa, com perda de folhas. Para cada uma, alinhado ao objetivo citado no tópico 1, existe uma espécie mais apropriada. Por exemplo:

- Se queremos uma fachada verde para potencializar o sombreamento de forma rápida, então devemos optar por uma espécie de crescimento rápido, que tolere temperaturas altas e apresenta uma cobertura foliar densa, como o caso da Tumbérgia Azul, Congea e Guaco.
- Logo, se o objetivo é melhorar as condições térmicas de um edifício durante verão e no inverno, devemos optar por uma espécie de caducifolia, que no

inverno perde suas folhas e permite que o edifício receba mais sol. Nesse caso, podemos utilizar a Sete léguas.

- Mas se quisermos uma fachada verde com baixa profundidade foliar, para que tenhamos uma visibilidade maior entre área interna e externa do edifício, a espécie Ipomoea e Feijão Borboleta são mais indicadas. Essas espécies têm lâminas foliares pequenas e sua ramificação não sobrecarrega tanto a malha de apoio.
- Agora, se queremos uma fachada verde densa para atingir o sombreamento, devemos cuidar ao escolher espécies com raízes e massa vegetada muito elevadas, como o caso da Congea. Essa espécie pode virar uma touceira quando não controlada, pois cresce muito rápido e de forma bastante irregular, podendo danificar uma estrutura e sobrecarregar a fachada do edifício, trazendo possíveis problemas estruturais e uma estética desfavorável.

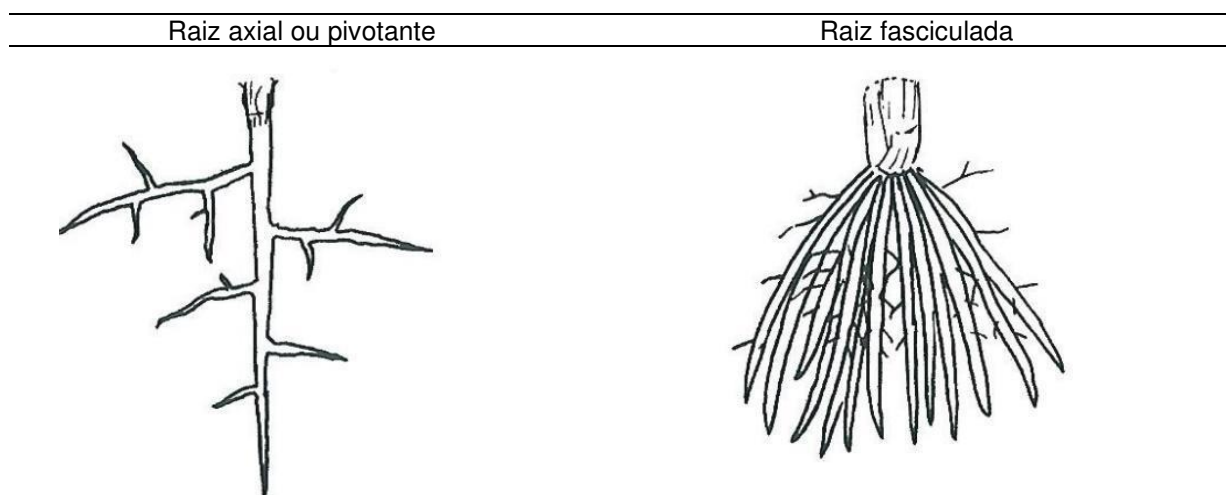
4. Que características fisiológicas devo considerar na hora de escolher uma trepadeira?

A escolha da espécie deve ser alinhada com as etapas anteriores, sempre priorizando as necessidades físicas e fisiológicas da planta. O clima, a região de implantação e o espaço de plantio são as primeiras coisas a se observar, pois esses fatores irão interferir positivamente ou negativamente no crescimento, desenvolvimento e adaptação da planta.

A falta ou excesso de sol, chuva ou mudança de temperaturas e um solo inadequado, poderão afetar fatores fisiológicos da planta. Portanto, é essencial fazer um levantamento inicial das espécies que se adaptam ao clima local, conhecer o entorno que ela será inserida (tipo de solo e prever possíveis bloqueios de luz e sol na implantação da fachada) e quais possíveis pragas e doenças podem atrair, para futuras manutenções e controle.

Na sequência, devemos definir qual tipo de plantio será utilizado, vaso ou solo. Se for em vasos, devemos escolher recipientes com tamanho adequado para o porte da muda e sempre verificar o tipo de ramificação da raiz (Axial/pivotante ou Fasciculada). Em caso de uma raiz pivotante, se o recipiente não for adequado e resistente à força, a raiz irá perfurar e danificar o vaso ou a estrutura, sendo mais agressiva que raízes fasciculadas (Figura 72).

Figura 72 - Tipos de raízes



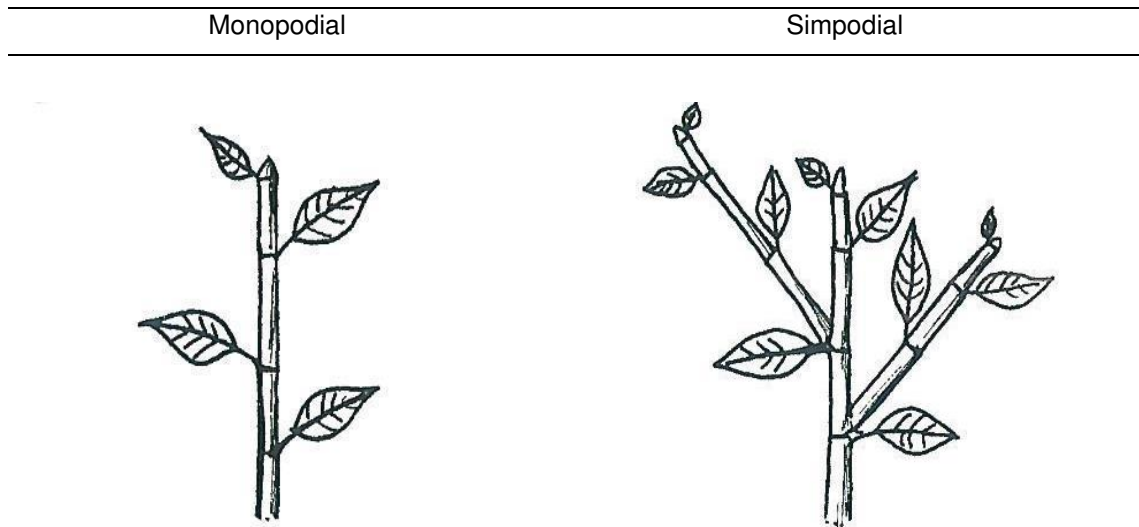
Fonte: Gonçalves e Lorenzi, 2011.

Outra observação importante para definir o método de plantio, é conciliar o vão a ser vencido com o tempo para crescimento da espécie. Em caso de usarmos uma muda em solo teremos um crescimento contínuo, sem interrupção e utilizando menos mudas. Porém, o crescimento e fechamento foliar será mais lento, e caso houver uma perda por doença ou praga, podemos perder por completo essa muda.

Já no caso de mudas em vasos, temos como repor uma muda se for necessário e conseguimos atingir o fechamento foliar mais rápido. No entanto, quando precisamos trabalhar com vasos intercalados em vários níveis, precisamos considerar a sobrecarga dos recipientes de plantio.

Outra característica importante a ser considerada na hora de escolher a trepadeira, é o sistema axial da espécie (Figura 73). Isso vai determinar o tipo de crescimento e direcionamento que a planta irá percorrer na fachada. É claro que não podemos ter 100% de controle do resultado final, porém, quando prevista inicialmente podemos escolher uma malha de apoio para crescimento da planta que ajude nessa condução e potencialize nosso objetivo.

Figura 73 - Sistema axial da planta



Fonte: Gonçalves e Lorenzi, 2011.

Ainda sobre o sistema axial, podemos prever e conduzir o crescimento da planta conforme seu processo de fixação na malha. “Caules volúveis” enrolam-se em um condutor vertical enquanto lança suas folhas. Já as “lianas” crescem apoiando-se por toda a malha, usando como artifício de fixação a ajuda de “gavinhas foliares”. No exemplo acima notamos como esse crescimento é conduzido e como podem afetar a geometria final da fachada (Figura 74).

Figura 74 - Tipos de crescimento do caule



Crescimento volúvel



Fixação com gavinhas



Raízes adventícias

Fonte: Os autores. Imagens autorais registradas em maio de 2021.

Algumas espécies como a Ipoméia, são trepadeiras que desenvolvem um “caule sarmento” que cresce rastejando na superfície do solo. Por isso, quando aplicadas verticalmente sem a presença de solo na superfície, novas raízes

“adventícias” são produzidas que ramificam para o fechamento da malha. Nesse caso, o sistema axial da planta é simpodial e não cresce somente ao redor de um condutor, espalha-se com o apoio de novas hastes, proporcionando uma cobertura foliar visual mais irregular na malha (Figura 75).

Figura 75 - Cobertura foliar da Ipomeia



Fonte: Os autores. Imagens autorais registradas em maio de 2021.

Uma observação importante no caso apresentado acima, é que notamos que quando as espécies atingem o final da malha de crescimento, elas acumulam o volume foliar nesta área e assim para de lançar novas folhas ao longo do crescimento vertical da malha. Para resolver esse problema, é preciso controlar a poda nesta região.

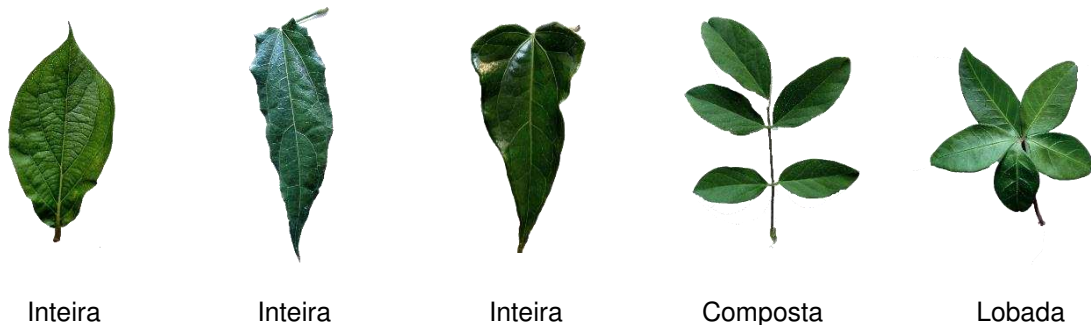
Ainda sobre a escolha da espécie, devemos observar as características das lâminas foliares da trepadeira escolhida. Existe uma diversidade de padrões entre o formato, tamanho e textura das folhas. E sabendo identificá-las e como aproveitar cada um desses aspectos é possível direcionar a planta ideal para cada “problema”. Por exemplo:

- Se uma fachada verde no centro da cidade utilizar como espécie uma trepadeira com folhas muito brilhosas, teremos problema com a reflexão e superaquecimento do entorno;

- Ou então, ao optar por uma fachada verde mais leve, que não sobrecarregue tanto com a massa vegetada, devemos escolher trepadeiras com folhas de textura mais lisa para não ocorrer a absorção da água da chuva, por exemplo.

Além das texturas, existe uma variedade de padrões entre o tamanho e formato das folhas, classificando-as em três grupos principais: folha inteira, folha composta e a folha lobada (Figura 76). A principal diferença entre elas está no tamanho e composição entre as folhas, podendo ser única ou formada por várias folhas menores. No projeto, essas características irão destacar os aspectos visuais e conforto, podendo ajudar ou atrapalhar sua proposta.

Figura 76 - Padrões de lâminas foliares



Fonte: Os autores. Imagens autorais registradas em maio de 2021.

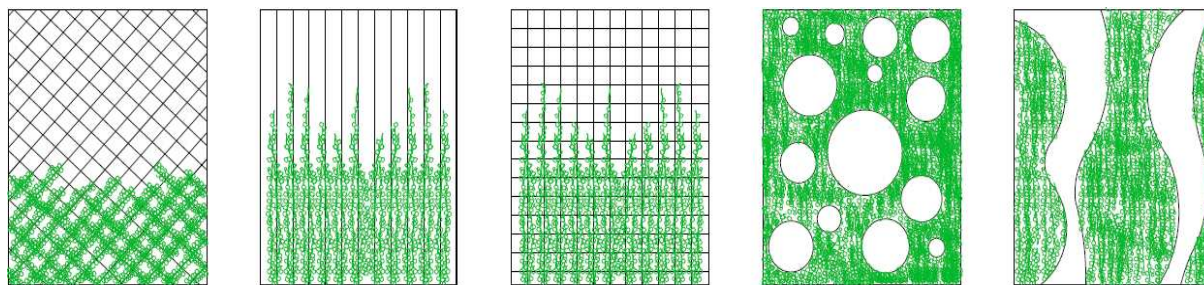
Quando utilizamos uma espécie de lâmina foliar inteira e maior, precisaremos de menos folhas para cobrir uma área em comparação a uma folha composta, que apresenta folhas menores e mais espalhadas.

Essas características são úteis na hora de configurar no *software* de modelagem uma simulação para conforto ambiental, estimativa estrutural, estudo de impacto visual e fechamento de malhas.

5. Que tipo de malha de apoio da trepadeira pretendo usar?

Após definir a espécie e o tipo de superfície na modelagem, é preciso definir uma malha onde a planta crescerá e formará a geometria. Como foi explicado anteriormente, se associarmos a malha com o tipo de ramificação axial da trepadeira, podemos conduzir e atingir previamente o tipo desejado para o seu crescimento. Dependendo da malha teremos uma geometria mais densa, rala ou com formas e desenhos programados (Figura 77).

Figura 77 - Algumas sugestões de padrões de malhas para crescimento da planta



Fonte: Os autores, 2022.

Seguindo as diretrizes e atentando aos detalhes de cada espécie é possível obter um resultado mais satisfatório e prever as condições que a trepadeira ficará ao longo dos anos.

É importante ressaltar, que essas informações não são direcionadas para qualquer espécie trepadeira. Para direcionar o plantio dessas espécies utilizamos como base nosso experimento em campo, as quais são aptas ao clima tropical de altitude e foram estudadas minuciosamente para atingir o conhecimento aqui apresentado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO FINAL

Neste capítulo iremos apresentar as principais conclusões levantadas e objetivos alcançados. Repassaremos a confirmação da hipótese e pergunta do trabalho. Relataremos as principais dificuldades e limitações da pesquisa, assim como, daremos algumas recomendações e sugestões para trabalhos futuros. E por fim, apresentamos a disseminação da pesquisa.

5.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos dez anos, a simulação paramétrica de superfícies verticais vegetadas evoluiu e ganhou destaque em pesquisas que buscam a prévia dos benefícios adquiridos com esses sistemas, antes da execução do projeto final. No entanto, embora esses estudos tenham apresentado contribuições significativas na arquitetura, nenhum estudo científico relatou um modelo que simula a condição física de fachadas verdes, como o crescimento e desenvolvimento da trepadeira na fachada. E atualmente, os modelos disponíveis são bastante limitados em modelagem e não são específicos para o *input* de parâmetros botânicos de jardins verticais.

Um dos principais motivos que influencia a carência no avanço dessas pesquisas sobre a modelagem de geometrias vegetadas, está ligada a falta de um banco de dados com parâmetros botânicos, o qual forneça e oriente com informações corretas sobre as condições fisiológicas de espécies trepadeiras. Sendo que os dados utilizados entre essas pesquisas, baseiam-se apenas em parâmetros referentes a espécies gramíneas e o percentual foliar de espécies estáticas, sem variação anual.

Diante disso, este estudo buscou preencher essa lacuna de conhecimento científico e desenvolveu um modelo algorítmico-paramétrico para simulação de geometrias com fachadas verdes. O modelo contém *inputs* e configurações específicas para cinco espécies de trepadeiras aptas ao clima tropical de altitude do sudeste brasileiro, e apresenta uma forma dinâmica do crescimento e desenvolvimento da espécie ao longo de 1 ano.

Acompanhar esse dinamismo do crescimento da espécie, foi possível utilizando parâmetros referente a cobertura foliar, onde uma sequência de imagens mensais foi registrada para capturar como cada espécie desenvolveu na área do painel utilizado no experimento. Outro fator importante que observamos durante esse acompanhamento, foi a profundidade foliar que cada espécie conseguiu atingir em 1 ano. Essa densidade poderá servir de *input* para nortear futuros estudos a terem uma previsão de quanto essa camada vegetal poderá interferir no bloqueio visual, ventilação, iluminação, bloqueio de ruídos externos e cargas estruturais por conta da massa vegetada.

Para completar o quadro de parâmetros físicos, a massa vegetada também foi identificada. Com essa informação conseguimos configurar o código para obter uma estimativa prévia de quanto o painel com fachada verde está pesando. Embora não seja uma simulação estrutural completa para mostrar possíveis esforços e cargas concentradas no painel, essa primeira análise pode nos alertar qual dentre as cinco espécies utilizadas apresenta uma massa mais densa para cada situação de fachada. Além disso, podemos simular como a quantidade de mudas aplicadas e sua altura atingida na fachada, está interferindo nessa carga.

Além do código definido para fachadas verdes, a pesquisa forneceu os resultados atingidos com os objetivos específicos, como: toda a biblioteca de parâmetros botânicos referente as cinco espécies investigadas durante o estudo em campo; uma síntese sistemática da literatura dos últimos dez anos sobre a modelagem e simulação paramétrica de jardins verticais abordando e resultando novos *insights* sobre essa temática; e finaliza os resultados direcionando o leitor com algumas métricas para a correta aplicação do elemento vegetado em determinadas fachadas.

Nas seções a seguir, apresentamos uma visão geral dos objetivos identificados no Capítulo 1 e discutimos suas principais conclusões e realizações. As contribuições e impactos da pesquisa para a modelagem e simulação de fachadas verdes também são apresentadas e a questão norteadora da pesquisa é respondida. Por fim, são apresentadas as limitações identificadas e as direções para pesquisas futuras.

5.2 REVENDO OS OBJETIVOS

As discussões sobre os objetivos alcançados são apresentadas a seguir:

Objetivo A: *Identificar os parâmetros botânicos que podem ser utilizados na modelagem-algorítmico paramétrica para simular condições físicas de diferentes tipos de plantas trepadeiras.*

Uma revisão sistemática do estado da arte da literatura referente aos últimos dez anos, sobre estudos de modelagem e simulação paramétrica de jardins verticais foi realizada e apresentada no Capítulo 2. Com esse objetivo identificamos os principais processos utilizados para modelagem desse sistema, os parâmetros necessários para *input* no processo de configuração e *design*, e os *software* mais utilizados entre os pesquisadores.

Os resultados foram positivos para esclarecer como cada processo de modelagem funciona em diferentes *software*, e possibilitou organizar todas as informações que estão sendo consideradas para a configuração botânica desses elementos. Embora os dados não sejam uma novidade na literatura, ainda não há um trabalho que apresente um material em forma tabelada e informativa para orientar outras pesquisas com simulações desses sistemas. Assim, o objetivo não só foi alcançado, como também resultou em um material inédito e original sobre o tema, podendo contribuir com pesquisadores que buscam essas informações para suas pesquisas.

Outro ponto que conseguimos observar com os resultados da revisão e as tabelas de parâmetros, era quais parâmetros não são compatíveis com a modelagem de fachadas verdes e quais seriam necessários obter em campo para simular seu crescimento e desenvolvimento ao longo dos anos. Com essas informações foi possível delimitar algumas fases da pesquisa e direcionar de forma correta a metodologia do experimento em campo.

Além dos resultados citados, esse objetivo resultou em um panorama geral de pesquisas referente ao tema nos últimos anos, e evidenciou muitas lacunas e deficiências de conhecimento para possíveis trabalhos futuros.

Objetivo B: Coletar parâmetros físicos das trepadeiras: *Congea tomentosa* var.; *Ipomoea cavanillesii* Roem; *Thunbergia grandiflora* var.; *Pandorea ricasoliana* K.Schum; *Bignonia ignea* Vell; *Mikania* sp.; *Clitoria ternatea*, e *Passiflora edulis* Sims;

Para preencher a lacuna e falta de informações sobre os parâmetros referente às condições físicas e fisiológicas de trepadeiras, a metodologia experimental em campo foi necessária e importante para esse trabalho. Com esse estudo, obtemos informações valiosas sobre o crescimento, desenvolvimento e manutenção de 5 espécies de trepadeiras, permitindo ter uma observação direta com o objeto desta pesquisa, as trepadeiras. Portanto, enfatizamos que esses dados se referem a espécies adequadas ao clima tropical de altitude do sudeste brasileiro, por isso, a modelagem e simulações feitas nesta pesquisa são apropriadas apenas para essas condições climáticas.

Os resultados atingidos com esse objetivo foram apresentados no Capítulo 4, e geraram uma biblioteca botânica a qual pode ser complementada com os parâmetros botânicos encontrados na revisão sistemática. Além dos parâmetros para modelagem, detalhes sobre a manutenção e cuidados para cada espécie foram apresentados e fornecidos para orientação de projetos no Apêndice A.

O método adotado para realizar esse objetivo foi eficiente e resultou em resultados plausíveis para o estudo em arquitetura. No entanto, é válido aprimorar o processo da coleta de dados para pesquisas futuras, assim como, fazer análises estatísticas.

Objetivo C: Inserir os dados botânicos extraídos na modelagem algorítmico-paramétrica.

Os resultados desse objetivo fazem parte do Capítulo 4, onde apresentamos o modelo base desenvolvido, o qual inserimos todos os parâmetros botânicos coletados em campo. A justificativa em fazer um modelo base, vem da oportunidade de poder testar e conhecer as limitações do *software* antes da inclusão e teste do elemento em fachadas.

O modelo permitiu simplificar algumas etapas e refinou alguns processos importantes, como permitir a escolha da espécie, o tamanho da muda e se será em vaso ou no solo, o período do ano para simulação e a contabilização do percentual de

fechamento foliar. Ele funciona como a nossa biblioteca botânica, onde primeiro é necessário definir esses parâmetros físicos para depois aplicá-los em uma superfície de fachada.

Tendo o modelo base definido, algumas fachadas hipotéticas foram definidas para o mapeamento e aplicação do modelo. Essas fachadas serviram como teste para encontrar possíveis problemas e erros de modelagem na simulação do sistema, e ajudaram a nortear etapas importantes para representar uma superfície simples até superfícies mais complexas, como uma superfície curva com formas irregulares.

O método de modelagem algorítmico-paramétrica se mostrou eficaz e permite mais flexibilidade na forma geométrica do sistema, possibilitando uma modelagem associativa para cada etapa e parâmetro inserido. Além disso, ajudou nas etapas quantitativas de cada processo e modelo de fachada.

Objetivo D: Estimar a massa vegetada da geometria resultante.

Os resultados desse objetivo complementam o modelo base e também fazem parte do Capítulo 4, onde a intenção e objetivo era utilizar a massa vegetada coletada das espécies para estimar a carga resultante da vegetação sobre uma fachada. O resultado apresenta alguns quantitativos e demonstra como a modificação da malha de crescimento, a quantidade de mudas, o tipo de espécie e altura da fachada podem influenciar negativamente na carga final do sistema.

O processo apresenta o resultado da massa da fachada por inteiro. Como não era o objetivo simular cargas estruturais e orientar a forma construtiva mais adequada para cada caso, o método atendeu a expectativa e conseguiu estimar um valor próximo da massa vegetada de cada espécie. No entanto, para pesquisas futuras esse pode ser o ponto de partida para que estudos de simulação estrutural consigam identificar as cargas e tensões encontradas de acordo com os esforços que a espécie proporciona na fachada.

Objetivo E: Propor métricas e recomendações para a produção de fachadas verdes.

Por fim, complementamos o Capítulo 4 com os resultados sobre algumas métricas e diretrizes de projeto para fachadas verdes. O objetivo era orientar de forma

simples como podemos otimizar o desenvolvimento da espécie na fachada tanto na modelagem como em campo, para melhorar sua performance durante os anos. Esse objetivo foi executado com a experiência da observação em campo e a modelagem algorítmico-paramétrica, a qual possibilitou observar quais seriam os cuidados necessários com a espécie, assim como, ressaltar as melhores diretrizes para organizar e iniciar o projeto de uma fachada verde.

Como resultados, antes da modelagem ou construção do sistema, disponibilizamos essas informações para ajudar na escolha da espécie, tipo de plantio, quantidade esperada de mudas, necessidade para sombreamento e possíveis manutenções ao longo do desenvolvimento da espécie.

5.3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A contribuição e os impactos são destacados ao abordar as questões de pesquisa definidas no início, conforme descrito abaixo.

Hipótese da pesquisa: *O uso de parâmetros físicos da vegetação associados a modelagem algorítmico-paramétrica pode ajudar simular e estimar as melhores geometrias para dispositivos verticais vegetados a partir do comportamento e desenvolvimento da vegetação.*

Pergunta da pesquisa: *Como as condições físicas da vegetação podem ser associadas na modelagem algorítmico-paramétrica de um dispositivo vertical vegetado?*

Ficou comprovado que a utilização de parâmetros físicos da vegetação associados com a modelagem algorítmico-paramétrica pode sim ajudar a estimar as melhores geometrias de dispositivos verticais vegetados. Isso porque, ao utilizar informações visuais como a cobertura foliar e densidade da camada vegetal de cada espécie, podemos identificar previamente como será a forma de crescimento e fixação da trepadeira, contabilizar quantas mudas serão necessárias para cada situação, prever a forma de cobertura final da fachada e orientar qual melhor tipo de malha para o plantio em vaso ou em solo. No entanto, é importante ter registrado esses parâmetros ao menos por 1 ano, ou mais.

Com essas informações o *design* da fachada pode ser interferido e orientar possíveis ajustes para que a fachada verde seja eficaz para a execução do projeto final. Além da questão estética, ajuda a otimizar alguns quantitativos e quantificar possíveis sobrecargas do sistema, de acordo com cada espécie utilizada.

Para responder à pergunta da pesquisa, investigamos através da revisão sistemática possíveis processos de modelagem de fachadas verdes existentes na literatura científica. Como visto, a modelagem algorítmica-paramétrica ainda é pouco utilizada e há pouca informação sobre esses sistemas. Portanto, a pesquisa se enquadra como inédita e original por ter elaborado um processo de modelagem próprio, onde cada etapa e inserção de parâmetros botânicos da espécie foram testadas e configuradas para atender a necessidade esperada.

Todo o processo de inserção de parâmetros na modelagem foi realizado na suíte de modelagem do *software Rhinoceros* e seu *plugin Grasshopper*, utilizando alguns *plugins* para o *Grasshopper*. Para isso separamos o processo de inserção dos parâmetros botânicos em três fases principais: definição da cobertura foliar utilizando as imagens binárias; profundidade foliar utilizando parâmetros de profundidade da folhagem; e a massa da vegetação para contabilizar através de fórmulas uma estimativa da carga final do painel somando a massa da vegetação que foi pesada em campo. E assim, todos os dados coletados em campo foram inseridos e testados na modelagem algorítmico-paramétrica, resultando em um modelo com modelagem visual e associativa, fatores que em pesquisas anteriores, não eram possíveis.

Com o modelo (código) definido nesta tese, atingiu-se um avanço significativo no campo de modelagem algorítmico-paramétrica e simulação de fachadas verdes, e comprovou-se a eficiência do *software Rhinoceros* e seu *plugin Grasshopper* para esse tipo de modelagem. Além disso, a metodologia associada com o método experimental configurou um método para que outras pesquisas possam utilizá-la e replicá-la em outras regiões, ampliando a variedade de dados e espécies de trepadeiras.

Também contribuiu para que estudos futuros possam utilizar esse modelo como base, para observar outros fatores da fisiologia da planta e simular alguns benefícios alcançados com a aplicação de fachadas verdes na arquitetura, como:

- Aplicação do código em análises ambientais aplicando fachadas verdes nos edifícios (térmico, lumínico e acústico);
- Previsão estrutural para construção do sistema;
- Estimativa orçamentária para execução e direcionamento do projeto de fachadas verdes;
- Consultoria para *design* de fachadas verdes em edifícios.

Lembrando que para alcançar esses resultados, o código deverá servir como base, ou seja, deve ser ampliado e adaptado para cada situação. Porém, os parâmetros mais importantes foram definidos.

Apesar da vegetação ser um elemento vivo, passível de diversas transformações, com esse método, podemos ter uma previsão de como ficará essa vegetação em seu estágio avançado de crescimento.

5.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As suposições negativas e que dificultaram alcançar mais resultados durante a execução dessa pesquisa são apresentadas nesta seção.

Método experimental: a falta de análise estatística sistemática para definir o comportamento de cada espécie foi uma das limitações desta pesquisa. Sabemos que a metodologia experimental com plantas costuma explorar um número maior de mudas, assim como, costuma avaliar várias repetições ao longo da sua execução para ser validado. Porém, devido alguns fatores físicos como: área reduzida para plantio; o baixo orçamento para construção de protótipos; e a falta de voluntários disponíveis para ajudar na construção e manutenção da área, foi necessário simplificar o método e trabalhar com poucas mudanças por painel.

Outra limitação utilizando essa metodologia, foi o período hábil disponível para execução e coleta de dados do experimento em campo. Apesar do doutorado ter 4 anos de duração, não foi possível fazer uma coleta de dados maior que 1 ano. Isso se justifica por alguns motivos importantes:

- Antes do plantio das espécies trepadeiras nos painéis em campo, todas as espécies foram propagadas em casa de vegetação, e acompanhadas durante 6 meses. Nesse período alguns testes com diferentes espécies

foram realizados, para saber as principais exigências de adaptação. Essa etapa foi importante para escolher as espécies, reduzir custos de aquisição de mudas e também garantir algumas reservas para possíveis imprevistos;

- Alguns períodos chuvosos em relação ao clima da região tropical de altitude do sudeste brasileiro, prejudicaram o início da coleta de dados e retardaram a evolução de algumas espécies, sendo necessária a reposição das mudas e nova espera para o seu desenvolvimento;
- O início da coleta de dados coincidiu com o início da pandemia (coronavírus) dificultando assim, a disponibilidade de voluntários e equipes especializadas para auxiliar a pesquisa durante a extração desses dados;
- O financiamento da pesquisa foi de apenas 3 anos, dificultando a estadia da pesquisadora *in loco* para maior tempo de acompanhamento do experimento.

Modelagem: quanto a modelagem, algumas limitações operacionais exigidas pelo *software* e processamento do computador utilizado durante a pesquisa, foram motivos para a barreira no avanço de mais configurações do código. Por esse motivo, não detalhamos com mais precisão as características físicas relacionadas a configuração das folhas, por exemplo: desenho geométrico das folhas, textura, variação e diversificação entre tamanhos das folhas para randomizar a variabilidade entre elas.

Além disso, por ser um trabalho pioneiro na modelagem desse sistema, o trabalho foi desafiado a testar novas metodologias e processos de modelagem criados pela própria autora. Portanto, algumas etapas não foram avançadas pela falta de tempo hábil disponibilizado para a execução da pesquisa, e deverão ser complementadas ao longo da evolução de outras pesquisas paralelas realizadas pela própria autora ou outros pesquisadores.

Outro fator importante para a limitação em modelagem desse sistema, foi a falta de informação referente aos dados botânicos e processos para coleta de dados dos mesmos. Por esse motivo, essa pesquisa foi norteadada pelo experimento em campo, para conseguir criar uma biblioteca de parâmetros botânicos com *inputs*

necessários para a configuração da vegetação na modelagem algorítmica-paramétrica.

5.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa tentou cobrir um escopo apropriado para produzir resultados valiosos na modelagem e simulação algorítmica-paramétrica de fachadas verdes. No entanto, devido à complexidade das questões envolvidas neste tema, muitas áreas de pesquisa poderiam ser aprofundadas contribuindo para a compreensão da aplicabilidade desse sistema em fachadas, auxiliando na construção e manutenção do projeto. Diante disso, algumas recomendações para trabalhos futuros são descritas a seguir:

Experimento: com o intuito de aprofundar análises estatísticas referente a espécies de trepadeiras, recomenda-se fazer análises sistemáticas acompanhadas por um agrônomo, assim como, refinar o método e processo de coleta de dados, inserindo novas abordagens para extrair cada um dos parâmetros adotados nesta pesquisa.

Além disso, recomenda-se construir painéis com outras características físicas, e verificar outros parâmetros botânicos, como:

- Testar outras malhas de crescimento e confrontar os resultados com a modelagem algorítmica no código do *Grasshopper*, para a validação ou ajuste do mesmo;
- Construir painéis com outros materiais;
- Deixar alguns dos painéis em ângulos inclinados, para verificar a importância da radiação solar no crescimento e desenvolvimento da espécie;
- Verificar outras espécies de trepadeiras aptas a outros climas e regiões;
- Extrair outras informações da fisiologia vegetal, como a evapotranspiração e condutividade térmica das folhas;
- Realizar uma coleta de dados dos parâmetros botânicos por no mínimo 2 anos para ter um comparativo maior;
- Plantar espécies diferentes no mesmo painel para obter informações cruzadas.

Modelagem: para ampliar a discussão e aprofundar a configuração botânica de fachadas verdes, recomenda-se que trabalhos futuros realizem as seguintes pesquisas na área de modelagem:

- Novos processos de modelagem algorítmico-paramétrica para fachadas verdes utilizando a biblioteca de parâmetros deste trabalho;
- Definição 3D mais elaborada em relação às características físicas de cada espécie, como: tamanho, randomização e variação de preenchimento das folhas no painel;
- Criação de um modelo com parâmetros específicos para paredes vivas, para assim, completar esse quadro de modelagem dos sistemas de jardins verticais;
- Simular e testar informações estruturais da fachada verde para possibilitar uma estimativa da quantidade e tipo de material, assim como, possíveis reforços em áreas de sobrecarregadas pelas mudas;
- Fazer um modelo com opção de acréscimo do substrato da vegetação plantada em vasos;
- Mesclar informações de duas ou mais trepadeiras em um único painel de fachada;
- Modelar o crescimento em novas formas geométricas além das investigadas neste estudo;
- Fazer um modelo com propriedades e parâmetros específicos para análises de conforto térmico.

5.6 DISSEMINAÇÃO DA PESQUISA

No decorrer de 4 anos (2019-2023), período que esta pesquisa foi desenvolvida, alguns trabalhos, artigos, e premiações foram disseminadas com base nos resultados alcançados. Na sequência listamos o material que já está disponível para consulta, e citamos os que ainda estão sendo analisados por periódicos para futuras publicações.

a) Trabalhos aceitos e publicados em periódicos

Figura 78 - Artigo publicado na revista *Comunicata Scientiae* em março de 2022

Estimation of *Thunbergia grandiflora* leaf area from allometric models

Débara Mela¹, Marlon Gomes Dias¹, Toshik Iarley da Silva^{1*},
 João Everthon da Silva Ribeiro², Andressa Carmo Pena Martinez², Affonso Henrique Lima Zuin¹

¹Federal University of Viçosa, Viçosa, Brazil

²Federal University of Paraíba, Areia, Brazil

*Corresponding author, e-mail: iarley.toshik@gmail.com

Abstract

Sky vine (*Thunbergia grandiflora* Roxb) is a vine with important structural components for forest environments. Studies on growth and development are necessary, because of the environmental and economic importance. The leaf area determination is essential for ecophysiological studies to understand the relationship of the plant with the environment. The objective of this work was to estimate an allometric equation to estimate the leaf area of *T. grandiflora* from linear dimensions. 200 leaves of different shapes and sizes were collected from adult plants and the length (L), width (W), the product between length and width (LW), and real leaf area (LA) were measured. The linear regression, linear without intercept, quadratic, cubic, power, and exponential models were used to estimate the equations. The criteria for determining the best model were higher determination coefficient (R^2), Willmott's agreement index (d), lower Akaike information criterion (AIC), the root of the mean error square (RMSE), and BIAS index closer to zero. The leaf area of *T. grandiflora* can be estimated satisfactorily by the equation $\hat{y} = 0.58 \cdot LW$.

Keywords: leaf dimension, non-destructive method, vines, sky vine

Introduction

Sky vine (*Thunbergia grandiflora* Roxb), is a perennial, semi-woody, robust and very vigorous vine. It is also known as blue thunbergia or Bengal clock vine. It belongs to the Acanthaceae family and is native to India, southern China and Myanmar (Meyer & Lavergne, 2004; Sartin et al., 2014). Its leaves are arranged oppositely and emerge from hairy stems, also known as pubescent petioles, with an oval or triangular shape, slightly jagged, dark green and shiny, 8-16 cm long (Caedo et al., 2014). This species is suitable for tropical or subtropical climates, with exposure to full sun to ensure its maximum development. Because of this, we use this species in covering pergolas, walls, and extensive fences, but also because of tolerating excessive sun radiation, and by it has high adherence and fast growth, characterizing it as a very rustic and vigorous species. Despite the preference for high temperatures, it tolerates mild temperatures as in

some areas of southern Brazil, requiring little maintenance and regular pruning (Sartin et al., 2014).

Because it is a very vigorous and fast-growing species, its leaf density has great potential for application in ornamental gardens (Sartin et al., 2014). Also, it is a species that has attracted attention because it also has medicinal purposes helping to treat diseases such as hemorrhages ear diseases, stomach complaints, tonic for wounds (Mathew & Thomas, 2019; Oliveira et al., 2019). Because of the environmental and economic importance that this species presents and the lack of work on it, further studies are needed that seeks to evaluate its growth, development, and reproduction. Among these studies, the leaf area is important to determine the growth (Fascella et al., 2013; Abreu et al., 2015) and productivity (Waia & Kumar et al., 2017; Liu et al., 2017) of crops. This variable is directly related to the amount of light energy intercepted and the conversion of chemical energy in

Figura 79 - Artigo publicado na revista Amgriabi em junho de 2022



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n10p729-734>

Leaf area estimation of *Congea tomentosa* using a non-destructive method¹

Estimativa de área foliar de *Congea tomentosa* através de método não destrutivo

Marlon G. Dias¹, Débora Mela², Toshik I. da Silva^{2*}, João E. da S. Ribeiro⁴, José A. S. Grossi², Affonso H. L. Zuin², Andressa C. P. Martinez³ & José G. Barbosa²

¹ Research developed at Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brazil

² Universidade Federal de Viçosa/Departamento de Agronomia, Viçosa, MG, Brazil

³ Universidade Federal de Viçosa/Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Viçosa, MG, Brazil

⁴ Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, PB, Brazil

HIGHLIGHTS:

Estimates of leaf area of Congea tomentosa based on measurements of leaf dimensions are a useful non-destructive method.

Estimates of the leaf area of C. tomentosa by statistical models are a non-expensive tool easily accessible to producers.

The equation $\hat{y} = 0.63 \times LW$ (Leaf: L = length, W = width) can be used to estimate the leaf area of C. tomentosa.

ABSTRACT: *Congea tomentosa* is a climbing plant suitable for covering arbors, railings, and fences. Leaf area determination is useful in understanding the plant-environment relationship and facilitating agronomic studies on transpiration, water requirement, light interception, and photosynthetic activity. The objective of this study was to obtain an allometric equation to estimate the leaf area of *C. tomentosa* by measuring the leaf dimensions. Analyses were performed on 200 leaves of different shapes and sizes from 10 randomly chosen adult plants grown under field conditions. The leaf length, leaf width, product length and width, and leaf area were determined. Linear, linear without intercept, quadratic, cubic, power, and exponential regression models were used to estimate the leaf area. The coefficient of determination, Willmott's concordance index, Akaike information criterion, root mean square error and BIAS index were used to determine the best model. The leaf area of *C. tomentosa* can be satisfactorily estimated using a non-destructive method that uses measurements of leaf dimensions. The equation $\hat{y} = 0.63 \times LW$ (Leaf: L = length, W = width) estimates the leaf area of *C. tomentosa* in a practical and fast way, with 99.15% of precision. Estimation of the leaf area of *C. tomentosa* using statistical models is less expensive and easily accessible to researchers and producers of this plant.

Key words: leaf dimensions, vine, statistical models, modeling

RESUMO: *Congea tomentosa* é uma trepadeira indicada para cobertura de mandris, grades e cercas. A determinação da área foliar é útil para entender a relação planta-ambiente e facilitar estudos agrônômicos sobre transpiração, necessidade de água, interceptação de luz e atividade fotossintética. O objetivo deste estudo foi obter uma equação alométrica para estimar a área foliar de *C. tomentosa* através da medição das dimensões foliares. As análises foram realizadas em 200 folhas de diferentes formas e tamanhos de 10 plantas adultas escolhidas aleatoriamente cultivadas em condições de campo. O comprimento da folha, a largura da folha, o produto do comprimento pela largura e a área foliar foram determinados. Modelos de regressão linear, linear sem intercepto, quadrático, cúbico, potência e exponencial foram utilizados para estimar a área foliar. O coeficiente de determinação, índice de concordância de Willmott, critério de informação de Akaike, raiz do quadrado médio do erro e índice BIAS foram usados para determinar o melhor modelo. A área foliar de *C. tomentosa* pode ser satisfatoriamente estimada por meio de um método não destrutivo que utiliza medidas de dimensões foliares. A equação $\hat{y} = 0,63 \times LW$ (Folha: L = comprimento, W = largura) estima a área foliar de *C. tomentosa* de forma prática e rápida, com 99,15% de precisão. A estimativa da área foliar de *C. tomentosa* utilizando modelos estatísticos é menos dispendiosa e de fácil acesso aos pesquisadores e produtores desta planta.

Palavras-chave: dimensões de folhas, planta trepadeira, modelos estatísticos, modelagem

• Ref. 261222 - Received 18 Feb, 2022

* Corresponding author - E-mail: tarleytoshik@gmail.com

• Accepted 03 Jun, 2022 • Published 13 Jun, 2022

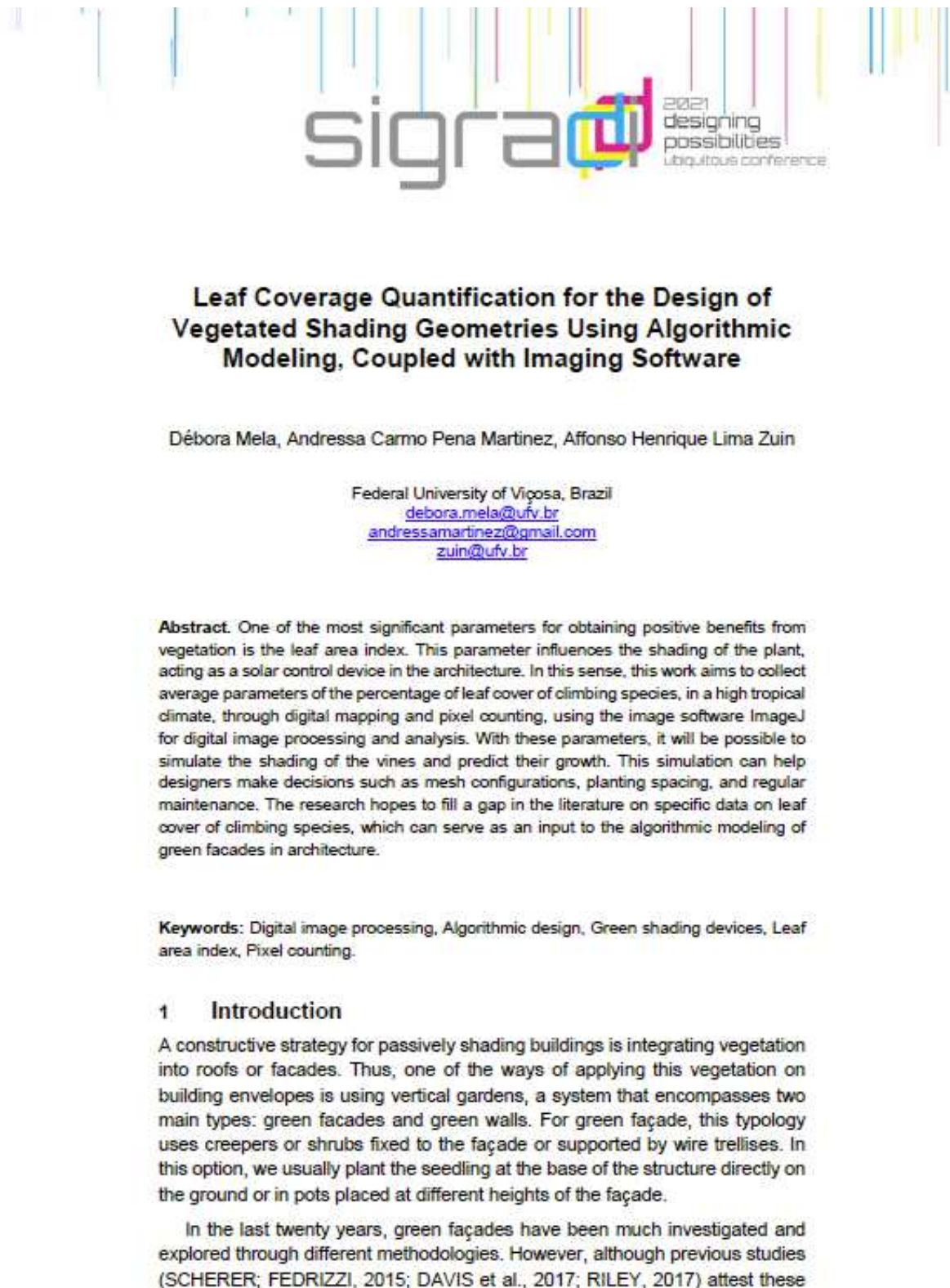
Editors: Lauriane Almêda dos Anjos Soares & Carlos Alberto Vieira de Azevedo

This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.



Fonte: Dias, M. G.; Mela, D.; Silva, T. I. D.; Ribeiro, J. E. D. S.; Grossi, J. A.; Zuin, A. H.; Martinez, A. C. P.; Barbosa, J. G., 2022.

Figura 80 - Artigo publicado nos anais do congresso internacional Sigradi em 2021



Fonte: Mela, D.; Martinez, A. C. P.; Zuin, A. H. L., 2021.

b) Premiações pela tese de doutorado

Figura 81 - Premiação pela Sigradi: Melhor apresentação de tese de doutorado no Woorkshop PhD



Fonte: Mela, D.; Martinez, A. C. P.; Zuin, A. H. L., 2021.

Figura 82 - Premiação e indicação para representar a Sigradi no mundial WOORLD CAAD 2021.



Premio de Mejor Presentación en el Ph.D. Workshop 2021
Prêmio de Melhor Apresentação no Ph.D. Workshop 2021
Best Presentation at Ph.D. Workshop 2021

Débora Mela
Universidade Federal de Viçosa, Brasil



Provides Ng
The Chinese University of Hong Kong, China



Fonte: Mela, D., 2021.

Figura 83 - Premiação mundial WOORLD CAAD 2021



Fonte: Mela, D.; Martinez, A. C. P.; Zuin, A. H. L., 2021.

c) Trabalhos aguardando parecer de revisores e periódicos

Além dos trabalhos apresentados nos tópicos anteriores, há mais 4 artigos sendo produzidos e encaminhados para periódicos da área de *design* computacional, paisagismo e arquitetura. Dentre eles, temos 1 artigo abordando os assuntos referente a revisão sistemática; 1 artigo referente ao código e seus resultados para aplicação em fachadas verdes; 1 artigo referente a massa vegetada e sua implicação em estruturas de fachadas; e 1 artigo referente a biblioteca de parâmetros botânicos coletados em campo.

Para poderem acompanhar mais sobre nosso trabalho, segue nossos *Lattes* e ORCID iDs para futuras consultas:

Doutoranda: Débora Mela

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/8947337529686445>

ORCID iDs: <https://orcid.org/0000-0002-9805-5098>

email: debora.melaa@gmail.com

Orientadora: Andressa Carmo Pena Martinez

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0706933574414645>

ORCID iDs: <https://orcid.org/0000-0003-4016-8767>

Coorientador: Affonso Herique Lima Zuin

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3422536835387362>

ORCID iDs: <https://orcid.org/0000-0002-5916-2202>