



LAYANE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA
CÂMARA DE CULTIVO DE PLANTAS**

LAVRAS-MG

2020

LAYANE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA CÂMARA DE CULTIVO DE
PLANTAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. João Paulo R. A. D. Barbosa
Orientador

Prof. Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho
Coorientador

LAVRAS-MG

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Layane.

Desenvolvimento de um protótipo de uma câmara de cultivo de plantas / Layane Silva. - 2020.

106 p.

Orientador(a): João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa.

Coorientador(a): José Antônio Delfino Barbosa Filho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Câmara de cultivo. 2. Iluminação artificial. 3. Perfil de temperatura. I. Barbosa, João Paulo Rodrigues Alves Delfino. II. Barbosa Filho, José Antônio Delfino. III. Título.

LAYANE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA CÂMARA DE CULTIVO DE
PLANTAS**

DEVELOPMENT OF A GROW PLANT CHAMBER PROTOTYPE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 19 de fevereiro de 2020.

Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa UFLA

Dr. Samuel Cordeiro Vitor Martins UFV

Antônio Chalfun Júnior, PhD UFLA

Prof. Dr. João Paulo R. A. D. Barbosa
Orientador

Prof. Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho
Coorientador

LAVRAS-MG,

2020

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Primeiramente gostaria de agradecer àqueles a quem eu devo a vida, meus pais, pela dedicação na minha criação e apoio incondicional. Também agradeço às minhas irmãs por serem meu alicerce e exemplo a ser seguido.

À UFLA e, em especial ao Setor de Fisiologia Vegetal, pela oportunidade de desenvolver este projeto e pela qualidade do ensino. A UFC e IFCE por terem me acolhido. Ao CNPq, pela concessão da bolsa.

Ao Prof. João Paulo R. A. Delfino Barbosa, por dedicar seu tempo e conhecimento à realização deste trabalho. Obrigada pela confiança depositada e por abraçar a ideia.

Ao Prof. Zeca Delfino pelas colaborações. Ao Daniel Gurgel, por compartilhar sua infraestrutura, e à sua equipe, em especial ao José Matheus, por toda boa vontade e empenho em colocar o protótipo “de pé”. Agradeço também à Babj e sua família pela hospitalidade durante minha estadia em Fortaleza.

Ao Prof. Chalfun, por tão gentilmente ceder espaço em seu laboratório. À equipe do LFMP, Thales e Manoel, por me ajudarem a pensar e executar as ideias.

À equipe de Robótica TROIA, principalmente Marcelo, por me acolher ainda que em véspera de competição e ajudar com a parte eletrônica (quando eu já não mais sabia o que fazer). À Lissa e ao Henrique e pessoal da estatística, por ajudarem a conceber e aprimorar o script do R. Ao Alexandre, por ajudar na execução dos testes.

À equipe LEV, Ane, Pennacchi, Daniel, Joyce, Mayra, Melina, Indira e Lizette, não só por todos auxílios nos estudos e projeto, mas por me ensinarem a ser uma profissional melhor.

Àquelas que compuseram meu trio, Zulma e Andrea, muchas gracias! Las quiero mucho. À amiga Josy, por estar sempre presente. Aos amigos do Coffee del LEV pelas xícaras de café e boa prosa.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

“Semeia um pensamento, colhe um ato. Semeia um ato,
colhe um hábito. Semeia um hábito, colhe um caráter.
Semeia um caráter, colhe um destino.” (Marion Laurence)

RESUMO

O cultivo de plantas exige tempo e conhecimentos técnicos, representando um empecilho para o morador das cidades e contribuindo para o uso subestimado dos espaços urbanos. O desenvolvimento de um dispositivo de cultivo, que mimetize as condições ambientais necessárias para o crescimento da planta, reduziria os esforços na manutenção de hortas domésticas e favoreceria a produção de alimentos no perímetro urbano. O presente trabalho objetivou a construção de um protótipo para o cultivo através da otimização da radiação e da temperatura, dois dos parâmetros que merecem especial atenção pela sua importância na produção vegetal. O equipamento com dimensões de 70 cm (H) x 15 cm (d) foi construído a partir de um tubo de PVC. O sistema de arrefecimento contou com um exaustor na parte superior e aberturas na parte inferior para a circulação de ar. O sistema de iluminação foi feito com lâmpadas de LED nas bandas do vermelho, azul e branco, ligados a um potenciômetro para regulação individual de cada uma das bandas. Duas versões do protótipo foram testadas, diferindo uma da outra principalmente no material de revestimento (com ou sem película de alumínio), na quantidade e tipo de LED utilizado e na posição da fonte de luz (dividida em estágios, na segunda versão). Para cada versão, foram aferidas a quantidade e qualidade da radiação resultante em diversos arranjos, e, também, foram construídos perfis de temperatura, com auxílio de geoestatística, para diferentes condições ambientes. A versão final alcançou uma quantidade de radiação de aproximadamente $140 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e uma temperatura média no interior do dispositivo de 24°C , com as luzes ligadas no primeiro estágio, em ambiente controlado a 19°C . A efetividade do protótipo para o crescimento de planta foi demonstrada com *Arabidopsis thaliana*, obtendo uma planta sadia e apta a produzir flores.

Palavras-chave: câmara de cultivo, hortas urbanas, iluminação artificial, perfil de temperatura, geoestatística.

ABSTRACT

Growing plants demands time and specific knowledge, which may present a hindrance for the city dweller, resulting in an underestimated use of urban areas. Developing a grow device, which mimics the required environmental conditions for plants, would reduce efforts in the maintenance of home gardens and would favor food production in the cities. The present work aimed the construction of a prototype for growing plants through the optimization of light and temperature, two of the most relevant parameters in the plant production. The equipment had outside dimensions of 70 cm (H) x 15 cm (d) and it was built from a PVC tube. The cooling system had an exhaust fan on the top side and four holes on the bottom side for air entrance. The light system was designed with LEDs in the red, blue and white spectrum, connected to a potentiometer for individual spectrum regulation. Two versions of the prototype were tested, which differ from each other mostly in terms of material (with or without an aluminum layer), in the quantity and types of LED, and in the position of the light source (on stages in the second version). Intensity and quality of the resulting light were measured in different experimental designs. A temperature profile was built for different environmental conditions with support of geostatistics. The final version achieved a light intensity of approximately $140 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and an average inner temperature of 24°C , with all lights on on the first stage and a controlled environment at 19°C . The effectiveness of the grow prototype was demonstrated by growing a healthy and capable of flowering *Arabidopsis thaliana*.

Keywords: grow chamber, home gardens, artificial lighting, temperature profile, geostatistics.

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplos da tecnologia Phytotron aplicadas a a) cabines, b) câmaras de crescimento e c) casas de vegetação.	3
Figura 2 – Esboço de aparato de cultivo automático de plantas indicando três regiões bem delimitadas.	4
Figura 3 – Dispositivos de cultivo doméstico disponíveis no mercado. a) ProBox, com custo aproximado de R\$ 800,00; b) Seedo, com custo aproximado de R\$ 60 000,00. .	5
Figura 4 – Curva de resposta fotossintética à luz (banda colorida). A região compreendida dentro do retângulo é considerada Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e a curva em preto é a sensibilidade do olho humano.	7
Figura 5 – Espectro de absorção e emissão de fluorescência para a clorofila a	8
Figura 6 – Resposta biológica típica em função das temperaturas cardinais.....	10
Figura 7 – Comparação entre a estatística clássica (A) e a geoestatística (B). Para as duas amostragens, o valor médio e a variância são idênticos, porém, a segunda considera a dependência espacial dos pontos amostrados.	12
Figura 8 – Exemplos de variogramas (acima) e seus correspondentes campos simulados no espaço (abaixo).	13
Figura 9 – Protótipo de máquina de cultivo de plantas. a) Fotografia com vista lateral-superior. b) Representação esquemática do dispositivo com dimensões (em milímetros).....	18
Figura 10 – Placa de luz mostrando as fitas de LED instaladas	18
Figura 11 – Dispositivo mostrando diferentes composições luminosas: vermelho, azul, branco e rosa (soma das anteriores).....	19
Figura 12 – Esquemático do circuito montado para a primeira versão do protótipo...	19
Figura 13 – Representação do sistema de medida da qualidade e intensidade da radiação no interior do dispositivo	20
Figura 14 – Termo-anemômetro utilizado para aferir velocidade do fluxo de ar de saída e mensurar a vazão de troca de ar.	21
Figura 15 – Determinação da área de saída de ar para cálculo de vazão.....	21
Figura 16 – Posicionamento dos sensores de temperatura.....	22
Figura 17 – Ensaios realizados em casa de vegetação. O protótipo foi posicionado com a janela apontando para o norte e se evidencia o uso da caixa refletora.....	24
Figura 18 – Exemplo de conjunto de dados espaciais amostrados	25
Figura 19 – Novo dispositivo recoberto com fita adesiva de alumínio externa e internamente. Detalhe das luzes laterais instaladas.	27
Figura 20 – Placa de luz da segunda versão do protótipo.....	28
Figura 21 – Secções circulares para análise de temperatura no interior do dispositivo	29
Figura 22 – Proposta de sistema de irrigação	31

Figura 23 – Utilização do aplicativo gratuito Easy Leaf Area para avaliação da área foliar.....	33
Figura 24 – Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação I a uma distância de 38 cm da fonte. O tempo de integração foi de 0,1 s.....	35
Figura 25 – Relação entre a intensidade luminosa e a distância da fonte de luz.	37
Figura 26 – Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação II, posicionado no Estado 2, a uma distância de 20,5 cm da fonte. O tempo de integração é de 0,02 s.	38
Figura 27 – Fator de correção para as intensidades luminosas das diferentes qualidades de luz.....	39
Figura 28 – Comportamento da radiação para diferentes distâncias da fonte.	40
Figura 29 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em um ambiente controlado a 22°C. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor.	42
Figura 30 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura do ambiente controlado a 22°C.	43
Figura 31 – Perfil de temperatura no decorrer do dia em casa de vegetação. A) Secção versal ao exaustor orientada oeste-leste; B) Secção paralela ao exaustor orientada sul-norte.	44
Figura 32 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com janela na posição norte.....	44
Figura 33 – Perfil de temperatura no decorrer do dia em casa de vegetação. A) Secção versal ao exaustor orientada leste-oeste; B) Secção paralela ao exaustor orientada norte-sul.....	45
Figura 34 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com janela na posição sul.	45
Figura 35 – Perfil de temperatura no decorrer do dia em casa de vegetação, usando material refletor. A) Secção versal ao exaustor orientada oeste-leste; B) Secção paralela ao exaustor orientada sul-norte.	46
Figura 36 – Mapa de erros de previsão para a temperatura em casa de vegetação com material refletor.....	46
Figura 37 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em um ambiente controlado a aproximadamente 20°C com revestimento interno. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor	48
Figura 38 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em ambiente controlado com revestimento interno.....	48
Figura 39 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em um ambiente controlado a aproximadamente 20°C com exaustor desligado. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor	49
Figura 40 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em ambiente controlado com exaustão desligada.	49

Figura 41 – Perfil de temperatura em um ambiente controlado a aproximadamente 20°C com exaustor em 50%. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor	50
Figura 42 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em ambiente controlado com exaustão em 50%	50
Figura 43 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em casa de vegetação com exaustão ligada a máxima potência, material refletor e revestimento interno. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor	51
Figura 44 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com exaustor a máxima potência, material refletor e revestimento interno.	51
Figura 45 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em casa de vegetação com exaustão desligada. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor....	52
Figura 46 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com exaustor desligado.....	52
Figura 47 – Perfil de temperatura nas diversas secções do dispositivo, mantido em ambiente controlado a 22°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento1.	55
Figura 48 - Mapa de erros de previsão para a caracterização do Estágio 1.	56
Figura 49 – Perfil de temperatura nas diversas secções do dispositivo, mantido em ambiente controlado a 22°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento 2.	57
Figura 50 – Mapa de erros de previsão para a caracterização do Estágio 2.	58
Figura 51 – Perfil de temperatura nas diversas secções do dispositivo, mantido em ambiente controlado a 22°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento 3.	59
Figura 52 – Mapa de erros de previsão para a caracterização do Estágio 3	60
Figura 53 – Perfil de temperatura no dispositivo com substrato, mantido em ambiente controlado a 19°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento 1.	61
Figura 54 – Mapa de erros de previsão para dispositivo com substrato no Estágio de crescimento	61
Figura 55 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 18 dias da germinação.....	63
Figura 56 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 25 dias da germinação.....	64
Figura 57 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 32 dias da germinação.....	65
Figura 58 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 39 dias da germinação.....	66
Figura 59 – Mapa de previsão de erros para os perfis de temperatura da manhã para os 18, 25, 32 e 39 dias após germinação.	67

Figura 60 – Análise visual do crescimento da área foliar de Arabidopsis para a primeira repetição.....	69
Figura 61 – Análise visual do crescimento da área foliar de Arabidopsis para a segunda repetição.....	69
Figura 62 – Ajuste sigmoidal do crescimento da área foliar para a segunda planta cultivada no dispositivo.	70
Figura 63 – Sugestão de novo sistema de arrefecimento modular e por estágios.....	73
Figura 64 – Monitoramento da temperatura no interior do dispositivo, mostrando a oscilação dia-noite.	74
Figura 65 – Relação entre a temperatura média diurna (T) e a área foliar da planta (AF).	75
Figura 66 – Consequências da interrupção do serviço de energia elétrica na temperatura ambiente e no interior do protótipo durante a condução do primeiro ensaio com a planta.	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 – <i>Design</i> experimental da coleta de dados de temperatura. PERP indica a posição perpendicular (transversal) ao exaustor e PARA a posição paralela	23
Tabela 2 – Testes exploratórios para determinação do perfil de temperatura no interior do dispositivo	23
Tabela 3 – Testes do sistema de arrefecimento	24
Tabela 4 – <i>Design</i> experimental da coleta de dados de temperatura da segunda versão	30
Tabela 5 – Intensidade luminosa no interior do dispositivo em diferentes distâncias da placa de luz e para as diferentes possibilidades de qualidade.....	36
Tabela 6 – Densidade de fluxo de fótons no interior do dispositivo em diferentes distâncias da placa de luz e para as diferentes possibilidades de qualidade.	37
Tabela 7 – Densidade de fluxo de fótons no dispositivo revestido internamente com papel alumínio.....	37
Tabela 8 – Densidade de fluxo de fótons na segunda versão do protótipo para os diversos estágios	39
Tabela 9 – Densidade de fluxo de fótons na segunda versão do protótipo para os diversos estágios após aplicar fator de correção	40
Tabela 10 – Área foliar e número de folhas ao longo do tempo.....	68
Tabela 11 – Análise de custo da segunda versão do protótipo	77

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1.	Evolução dos dispositivos para cultivo de plantas	3
2.2.	Características de um dispositivo	5
2.3.	Radiação	6
2.3.1.	Radiação Fotossinteticamente Ativa	6
2.3.2.	Absorção da radiação	7
2.3.3.	Iluminação artificial	8
2.4.	Temperatura	9
2.4.1.	Fenologia e temperatura	10
2.4.2.	Sistema de arrefecimento e a temperatura	10
2.4.3.	Geoestatística e perfis de temperatura	11
2.5.	<i>Arabidopsis thaliana</i>	14
2.5.1.	Condições de cultivo	15
3.	METODOLOGIA	16
3.1.	Protótipo 1	17
3.1.1.	Construção do dispositivo	17
3.1.2.	Montagem do Sistema de Iluminação	17
3.1.3.	Testes de luz	19
3.1.4.	Determinação do Sistema de Arrefecimento	20
3.1.5.	Condução dos testes de temperatura	22
3.1.6.	Construção dos perfis de temperatura	25
3.2.	Protótipo 2	27
3.2.1.	Adaptação do dispositivo	27
3.2.2.	Nova proposta do Sistema de Iluminação	27
3.2.3.	Testes de luz II	28
3.2.4.	Investigação da temperatura	29
3.3.	Crescimento de planta	31
3.3.1.	Sistema de irrigação	31
3.3.2.	Semeadura e transplântio	32
3.3.3.	Radiação e fotoperíodo	32
3.3.4.	Caracterização dos perfis de temperatura	32
3.3.5.	Avaliação do crescimento	33
4.	RESULTADOS	34

4.1.	Radiação.....	35
4.1.1.	Sistema de Iluminação I.....	35
4.1.2.	Sistema de Iluminação II.....	38
4.2.	Temperatura	42
4.2.1.	Testes exploratórios	42
4.2.2.	Testes de arrefecimento.....	47
4.2.3.	Caracterização dos estágios.....	53
4.2.4.	Dinâmica da planta.....	54
4.3.	Da planta	68
5.	DISCUSSÃO.....	71
5.1.	Análise do material	71
5.2.	Sistema de arrefecimento	72
5.3.	Efeito da transpiração.....	74
5.4.	Análise fenológica.....	75
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
	REFERÊNCIAS.....	78
	ANEXOS	81

1. INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea, com início na Revolução Verde garantiu por anos uma alta produtividade do sistema agrícola (MAZOEYER e ROUDART, 2010). Todavia os incrementos na eficiência produtiva das culturas são cada vez menores frente a uma intensificação da demanda, e o problema é ainda potencializado pelas mudanças climáticas, degradação dos solos e das águas e escassez das áreas cultiváveis. (HODSON, 2017; MCCOUCH, 2013).

Muitas apostas para a produção de alimentos no futuro se voltam para os avanços em robótica e tecnologias de sensoriamento (HODSON, 2017; KING, 2017). Técnicas de sensoriamento remoto, por exemplo, podem ser utilizadas no combate a pragas e doenças e para o aumento da qualidade nutricional das plantas. Já a automação de casas de vegetação garante uma redução dos custos e um ganho na qualidade dos produtos. Além disso, a revolução cibernética traz consigo uma imensa vantagem: ela é acessível aos pequenos produtores. Basta ter um *smartphone* e um pouco de conhecimento em informática (KING, 2017).

Uma proposta que também vai de contraponto ao sistema de agricultura da atualidade são as chamadas *urban farms*. O movimento que engloba as práticas de agricultura urbana surge para formar áreas, até então consideradas não-agricultáveis, em verdadeiras fazendas urbanas, aproximando a produção do consumo. Além de proporcionar alimentos mais frescos, a agricultura urbana aplica métodos de produção intensivo, usando e reciclando os recursos naturais e rejeitos urbanos, sendo considerada uma prática sustentável. No entanto, a falta de tempo e conhecimento técnico do cidadão pode constituir um verdadeiro empecilho para o avanço da agricultura nos espaços urbanos (SIMPSON, 2014; CHEEMA, SMIT, *et al.*, 1996).

O desenvolvimento de um dispositivo doméstico e automatizado para o cultivo de plantas, fazendo-se uso dos avanços da robótica, reduziria esforços na manutenção de hortas domésticas e poderia contribuir para aumentar a produção de alimentos no perímetro urbano. Quando cultivados em ambiente externo, o vegetal capta a energia da luz solar e a converte em energia química, a partir do dióxido de carbono proveniente de trocas gasosas com o ar, e de água e nutrientes minerais, retirados do solo (TAIZ e ZEIGER, 2017). Para o funcionamento do metabolismo e fisiologia da planta é ainda necessário manter uma faixa ótima de temperatura. Assim, um dispositivo de cultivo deve mimetizar as condições ambientais ideais para garantir o crescimento da planta.

De modo contrário, o dispositivo de cultivo pode servir também como um instrumento de investigação para entender como a planta se comporta quando submetidas a diferentes condições ambientais. Desta forma, o dispositivo funcionaria como um laboratório de pesquisas em fisiologia vegetal.

Propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de um protótipo que busca entender e otimizar a temperatura e a radiação, parâmetros abióticos considerados dos mais limitantes para a produção vegetal (TAIZ e ZEIGER, 2017). A compreensão do comportamento desses parâmetros reduziria custos energéticos com o controle das condições ambientais para produção vegetal, garantindo um produto que seja acima de tudo prático, econômico e acessível à população. Além disso, o protótipo pode ser usado como instrumento de pesquisa em laboratórios e universidades, para a compreensão de como os diversos parâmetros, e a interação entre eles, afetam o crescimento da planta.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Evolução dos dispositivos para cultivo de plantas

As primeiras tentativas de cultivos de planta em ambientes fechados datam de pelo menos o final do século XIX, quando o advento da energia elétrica possibilitou o uso de luzes artificiais para o cultivo. O uso de sistemas de iluminação variava de acordo com a necessidade, desde os mais simples como unidades de luzes individual, até mesmo os mais complexos e sofisticados como iluminação de salas de crescimento (WARE, 1977).

Para além do parâmetro da radiação, a tecnologia Phytotron é uma das pioneiras no controle das características do ambiente. Inicialmente usado em casas de vegetação e para controle da temperatura, o primeiro phytotron foi construído em 1949, no Instituto de Tecnologia da Califórnia e ficou oficialmente conhecido como Laboratório de Pesquisa em Plantas. Mais tarde esta tecnologia conseguiu comprimir ambientes complexos em pequenas cabines (Figura 1), capazes de simular as condições ambientais desejadas (MUNNS, 2017).

Figura 1 – Exemplos da tecnologia Phytotron aplicadas a a) cabines, b) câmaras de crescimento e c) casas de vegetação.



Fonte: Google Images (2019)

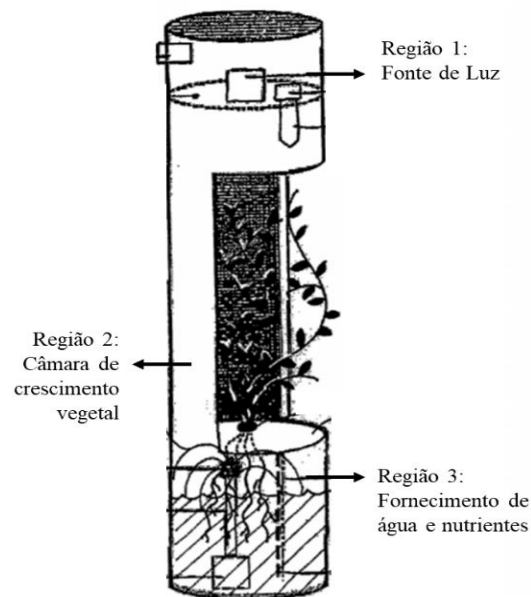
Embora estes dispositivos de cultivo sejam muito precisos no controle dos parâmetros ambientais, tais como temperatura, ciclo luminoso, umidade, entre outros, o seu alto custo de aquisição e manutenção se torna um fator limitante para o uso corriqueiro. Além disso são difíceis de instalar, grandes, pesados e requerem assistência técnica especializada (KATAGIRI, CANELON-SUAREZ, *et al.*, 2015; MAUNEY, 2002).

Talvez a primeira proposta de um aparato versátil para o cultivo de plantas venha com a patente de R. Louis Ware, em 1977, quando o inventor propõe a criação de um dispositivo modular de fácil montagem com componentes para controle do ambiente e fornecimento de luz

(WARE, 1977). Este dispositivo ficou conhecido como Phototron, mas ainda era muito robusto para o consumo doméstico, ficando restrito às universidades e aos negócios (MAUNEY, 2002).

No sentido de trazer essa tecnologia de cultivo *indoor* para o ambiente doméstico, a patente americana US 2002/O184820 A1 do inventor Terry L. Mauney traz um sistema de cultivo de plantas substancialmente automatizado, hermeticamente fechado e sem solo de forma a maximizar o crescimento vegetal controlando a luz e o consumo de CO₂ (Figura 2). A patente representou um grande avanço para a agricultura doméstica, porém Mauney em sua invenção se preocupou mais com o campo teórico, buscando proteger a ideia do dispositivo na sua patente, enquanto alguns campos práticos não foram bem explorados.

Figura 2 – Esboço de aparato de cultivo automático de plantas indicando três regiões bem delimitadas.

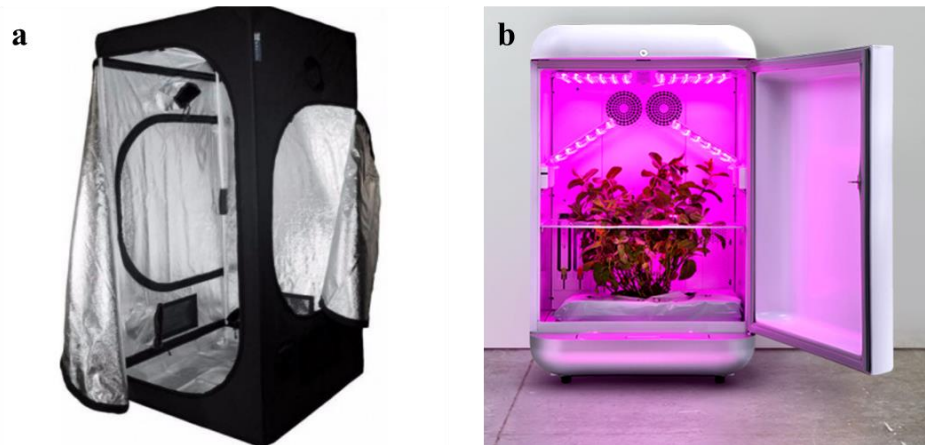


Fonte: Mauney (2002)

Desde então, muitos aparatos de cultivo foram surgindo. Alguns muito simples, com pouco ou nenhum controle das condições ambientais, como as tendas recobertas por alumínio com iluminação LED e circulação de ar (Figura 3a). Outros muito robustos, como o dispositivo lançado em 2017 pela *startup* israelita Seedo, uma máquina de crescimento de plantas hidropônica totalmente automatizada, desde a germinação até a colheita (Figura 3b).

Usando tecnologia de ponta, a empresa israelita apresenta um sistema inovador de iluminação auto ajustável aos diferentes estágios de crescimento da planta, filtros de CO₂ reguláveis e sistema de ar-condicionado (HAIFAUP). No entanto, esse produto está longe de ser acessível, chegando ao consumidor com um custo de U\$ 15 000,00, aproximadamente R\$ 60 000,00 (PLANTANDO.COM).

Figura 3 – Dispositivos de cultivo doméstico disponíveis no mercado. a) ProBox, com custo aproximado de R\$ 800,00; b) Seedo, com custo aproximado de R\$ 60 000,00.



Fonte: growplant.com.br; plantando.com (2019)

As diversas opções disponíveis no mercado hoje mostram a relevância do tema dentro do contexto atual. Assim, inovações nesta área que possam tornar essas invenções mais acessíveis à população terão uma grande fatia do mercado para explorar.

2.2. Características de um dispositivo

Um dispositivo de cultivo deve mimetizar as condições ambientais mínimas necessárias para o pleno crescimento e desenvolvimento da planta (KATAGIRI, CANELON-SUAREZ, *et al.*, 2015).

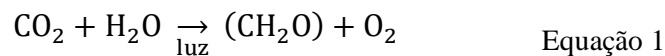
Quando cultivados em ambiente externo, o vegetal capta a energia da luz solar e a converte em energia química, armazenada na forma de carboidratos, a partir do dióxido de carbono proveniente de trocas gasosas com o ar, e de água e nutrientes minerais, retirados do solo. A energia armazenada é liberada a posteriori de forma controlada a partir da oxidação dos compostos de carbono (TAIZ e ZEIGER, 2017; BUCHANAN, W. e JONES, 2015). Todas essas reações ocorrem de forma geral em uma faixa ótima de temperatura, necessária para assegurar a manutenção e integridade do metabolismo celular (TAIZ e ZEIGER, 2017).

Assim, um dispositivo destinado ao cultivo de plantas deve fornecer uma quantidade de energia luminosa suficiente, suprir a demanda por água e minerais e garantir as trocas gasosas, mantendo temperaturas adequadas para o desenvolvimento vegetal. Para o desenvolvimento do protótipo em questão, buscou-se a otimização dos parâmetros de radiação e temperatura.

2.3. Radiação

A radiação solar incidente na superfície terrestre é, em última instância, a força motriz para toda a biosfera. O primeiro passo na utilização dessa energia proveniente do sol é a conversão da energia radiante em outras formas de energia química através do processo da fotossíntese (NOBEL, 2009).

O termo fotossíntese significa literalmente a síntese pela luz. Os organismos fotossintetizantes utilizam a energia solar para sintetizar compostos carbonados complexos, que normalmente não seriam formados sem o fornecimento de energia. Mais especificamente, a energia luminosa impulsiona a síntese de carboidratos a partir de dióxido de carbono e água e liberam oxigênio (TAIZ e ZEIGER, 2017). A equação generalizada para o processo fotossintético pode ser vista a seguir na Equação 1:



onde (CH₂O) representa uma unidade de carboidrato.

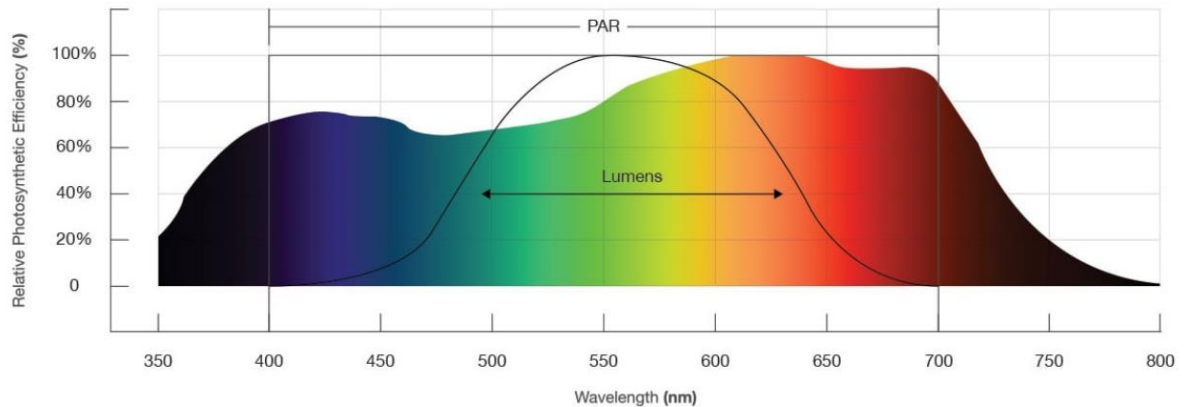
2.3.1. Radiação Fotossinteticamente Ativa

A radiação solar possui uma distribuição espectral que compreende os comprimentos de onda de 300 a 2500 nm. No entanto, apenas a região do espectro cuja banda de comprimento de onda se estende de 400 a 700 nm é considerada Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR – do inglês, *Photosynthetically Active Radiation*) (TAIZ e ZEIGER, 2017). Essa faixa do espectro coincide com a faixa do visível, porém há diferenças de sensibilidade do olho humano e das plantas em geral, como é representado na Figura 4.

A PAR representa cerca de 49% da radiação que atinge a superfície terrestre (ZHU, LONG e ORT, 2008).

Para quantificar as medidas instantâneas da PAR, tem-se a Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos (PPFD – do inglês, *Photosynthetic Photon Flux Density*), que quantifica o número de moles de fótons fotossinteticamente ativos em uma unidade de área por unidade de tempo. A unidade usual é de $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (FLUENCE, 2020). Como a fotossíntese é um processo quântico, a PPFD é um melhor preditor quando são consideradas fontes de luz com diferentes distribuições de energia espectral.

Figura 4 – Curva de resposta fotossintética à luz (banda colorida). A região compreendida dentro do retângulo é considerada Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e a curva em preto é a sensibilidade do olho humano.



Fonte: Fluence (2020)

É possível expressar a PAR também em termos de energia, uma vez conhecida a distribuição espectral. A energia de um fóton com comprimento de onda λ é dada pela relação de Planck-Einstein, apresentada na Equação 2:

$$E = hc/\lambda \quad \text{Equação 2}$$

onde E é a energia, h é a constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$), c é a velocidade da luz no vácuo ($3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) e λ é o comprimento de onda.

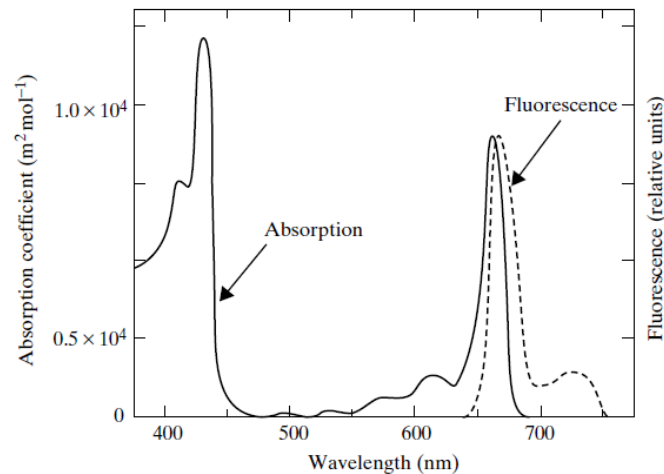
2.3.2. Absorção da radiação

Nas plantas superiores, a fotossíntese começa com a excitação da clorofila, que são pigmentos especializados na captação da energia luminosa. Em seu estado mais baixo de energia, a clorofila pode absorver um fóton de luz, passando a um estado de maior energia. Devido à instabilidade inerente do estado excitado, a energia é quase que instantaneamente liberada, seja em forma de calor, fluorescência, ou desencadeando as reações fotoquímicas (TAIZ e ZEIGER, 2017).

O espectro de absorção e, também, de emissão de fluorescência para a clorofila a é apresentado na Figura 5.

As moléculas de clorofila absorvem os comprimentos de onda vermelho e azul mais eficientemente, enquanto os comprimentos de onda do amarelo e verde são mais facilmente refletidos ou transmitidos. Dessa forma, em um sistema de iluminação artificial não se justifica o despendimento de custos de energia com a luz verde, por exemplo (YEH e CHUNG, 2009).

Figura 5 – Espectro de absorção e emissão de fluorescência para a clorofila a



Fonte: Nobel (2009)

2.3.3. Iluminação artificial

Desde a invenção da primeira lâmpada, em 1879, por Thomas Edison, o uso de luzes artificiais foi constantemente aprimorado. Com o desenvolvimento tecnológico, várias alternativas de iluminação surgiram, mas em sua maioria voltadas para a visão humana (GUIMARÃES, 2017).

As primeiras lâmpadas comercializadas eram do tipo incandescente. Estas lâmpadas apresentam uma eficiência muito baixa, de aproximadamente 10%, além de produzir muito calor. Seu espectro de emissão é caracterizado por grandes quantidades de vermelho distante, e a PAR corresponde a aproximadamente 60% do total de luz emitida (GUIMARÃES, 2017). Na sequência, lâmpadas fluorescentes ganharam mercado. Com eficiência entre 20-30% e cerca de 90% dos fótons emitidos na região PAR, essas luzes são mais empregadas na horticultura que as incandescentes. Além disso, possuem a vantagem adicional de emitir grande quantidade de radiação azul, que é indispensável para alcançar uma morfologia equilibrada para a maioria das plantas cultivadas (GUIMARÃES, 2017).

Uma das tecnologias mais populares no crescimento de plantas são as lâmpadas de sódio de alta pressão (HPS – do inglês, *High Pressure Lamps*), principalmente devido à alta emissão de energia radiante, baixo preço, longo tempo de vida, alta emissão de PAR e alta eficácia elétrica (ALMEIDA, 2014). No entanto, devido à emissão espectral desequilibrada, com grande quantidade de amarelo e baixa emissão de azul, estas lâmpadas possuem alto potencial de provocar estiolamento de plantas. Portanto, muitas estufas, quando utilizam este tipo de lâmpada, adicionam uma fonte de luz na cor azul para suplementação (GUIMARÃES, 2017).

Neste sentido, as lâmpadas de LED (do inglês, *light-emitting diodes*) vêm ganhando destaque neste campo, já que podem facilmente ser fabricadas para emitir no vermelho, no azul ou mesmo nos dois comprimentos de onda. Essas lâmpadas possuem alta eficiência e longa vida útil quando comparada às demais. Além disso, os custos desta tecnologia estão cada vez mais reduzidos, o que contribui ainda mais para sua aplicação como lâmpadas de crescimento de plantas (ALMEIDA, ALMEIDA, *et al.*, 2014).

Okamoto *et al.* (1996) demonstrou que era possível obter mudas de alface com bom desempenho utilizando apenas LEDs vermelhos e azuis, na composição de 2:1 para o vermelho e azul, respectivamente. Depois disso, várias luminárias para câmara de crescimento foram desenvolvidas usando LEDs de baixa potência de radiação vermelho, azul e vermelho distante (GUIMARÃES, 2017).

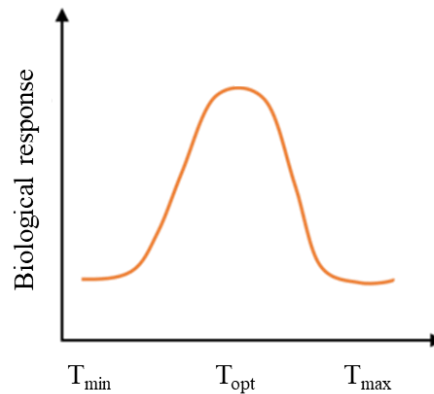
2.4. Temperatura

A temperatura influencia essencialmente todos os processos na planta. Os processos fisiológicos, por exemplo, ocorrem geralmente em uma estreita faixa de temperatura, onde a solubilidade de algumas moléculas, a fluidez da membrana plasmática e a estabilidade de complexos proteicos e nucleotídeos são ideais. As reações bioquímicas, por outro lado, também exibem uma temperatura ótima para o funcionamento enzimático (NOBEL, 2009; TAIZ e ZEIGER, 2017).

O intervalo de temperatura considerado ideal varia de espécie para espécie, tipicamente associado à temperatura de seus respectivos ambientes de ocorrência. Em espécies de zona temperada, a divisão e expansão celular de órgãos vegetativos se iniciam antes dos 10°C, já em plantas tropicais esse crescimento não ocorre abaixo de 12 a 15°C. A temperatura ótima para plantas de clima temperado é entre 15 e 30°C. Para as tropicais e subtropicais entre 30 e 40°C (RODRIGUES, 2012).

Definem-se as temperaturas cardinais de uma determinada espécie como as temperaturas mínima (T_{\min}), ótima (T_{opt}) e máxima (T_{\max}) que modulam o desenvolvimento vegetal (RODRIGUES, 2012; STRECK, 2004). Para um processo biológico típico, como demonstrado na Figura 6, a resposta aumenta lentamente a partir de T_{\min} , alcança um crescimento linear médio a temperaturas intermediárias, que diminui próximo de T_{opt} , onde a resposta será máxima. Para temperaturas acima de T_{opt} , a resposta diminui e eventualmente cessa com a T_{\max} (STRECK, 2004).

Figura 6 – Resposta biológica típica em função das temperaturas cardinais.



Fonte: Do autor (2020)

2.4.1. Fenologia e temperatura

Fenologia é o estudo das diferentes fases do crescimento e desenvolvimento vegetal, e é diretamente influenciada pelas condições ambientais (CÂMARA, 2006). Nesse sentido, o estudo de alguns parâmetros fenológicos constitui uma boa ferramenta para avaliação das condições em que a planta se encontra.

Condições desfavoráveis a uma cultura afastam sua “idade cronológica” da sua “idade fisiológica”, isto é, podem atrasar ou adiantar a observação de uma determinada fase fenológica, como, por exemplo, a abertura do primeiro botão de flor (CÂMARA, 2006). Para temperaturas elevadas o desenvolvimento vegetal é acelerado, enquanto para temperaturas baixas o biociclo pode ser prolongado (BERGAMASCHI, 2007).

Inicialmente, observou-se que o somatório das temperaturas diárias para completar o ciclo de uma determinada espécie era praticamente constante, mesmo em anos diferentes. Assim, propôs-se que era necessário um acúmulo de graus-dia de desenvolvimento (GDD), isto é, uma temperatura média suficiente para estimular o crescimento da planta (RODRIGUES, 2012). Atualmente o conceito de GDD ainda é utilizado, porém aplica-se o método residual, que consiste no somatório da diferença entre a temperatura média diária e a temperatura-base determinada para cada espécie (VILLA-NOVA, PEDRO JÚNIOR, *et al.*, 1972; BERGAMASCHI, 2007).

2.4.2. Sistema de arrefecimento e a temperatura

As trocas gasosas na planta atuam diretamente no balanço energético das folhas, participando da regulação de sua temperatura, de maneira a deixá-la dentro da faixa de valores adequados aos processos fisiológicos (ANGELOCCI, 2002).

A temperatura da folha reflete o resultado líquido de todos os caminhos nos quais a energia pode entrar ou sair dela. Quando exposta à intensa radiação, a folha sofre elevação da sua carga térmica, que poderia acarretar um aumento de temperatura à níveis intoleráveis. Para evitar o superaquecimento, a planta reemite parte dessa energia como radiação de ondas longas. Além disso, a assimilação de CO₂ durante a fotossíntese é acompanhada por um efluxo de vapor de água no estômato, que resfria a folha. Um outro processo dissipativo é por condução e convecção de calor por circulação de ar (ANGELOCCI, 2002; NOBEL, 2009).

Um fluxo de ventilação, por aproveitar o potencial de resfriamento do ar, garante temperaturas ambiente mais amenas (MONTAZERI e MONTAZERI, 2018). Além disso, uma boa circulação de ar também garante temperaturas foliares mais baixas, por aumentar a dissipação do excesso da carga radiante por processos convectivos.

Assim, um sistema de arrefecimento que pode ser adotado em dispositivos de cultivo é a exaustão, que tem por objetivo promover a ventilação do ambiente, trocando o ar interno pelo ar externo. A ventilação controla a temperatura, remove a umidade e também supre o dióxido de carbono (BRITO, 2008).

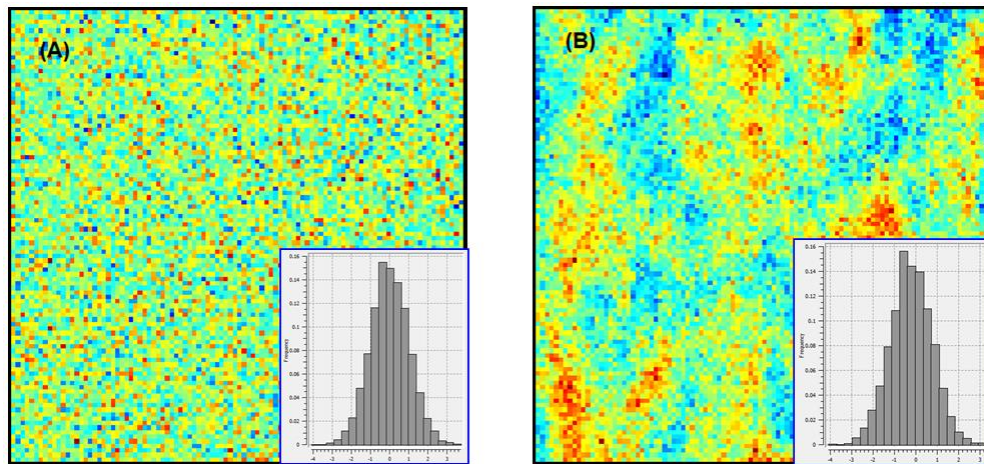
2.4.3. Geoestatística e perfis de temperatura

Um perfil de temperatura é um modelo construído a partir da coleta de alguns dados de temperatura associados às suas localizações. Através da geoestatística é possível correlacionar observações pontuais, chamadas de geodados, com suas regiões vizinhas, predizendo valores de localidades não amostradas (VOLFOVÁ e ŠMEJKAL, 2012).

Geoestatística, ou estatística espacial, é o ramo da estatística que trata da predição de valores em áreas que apresentam continuidade, a partir de amostras distribuídas espacialmente. Assim como na construção de perfis de temperatura, a geoestatística pode ser aplicada em diversas áreas da ciência, tais como a mineração, meteorologia, hidrologia, climatologia, ecologia, ciência dos solos e agricultura (ALVES, 2016).

Nessas áreas, tem-se interesse em predizer não só o padrão de distribuição dos dados, mas também a correlação espacial das amostras, aspecto incorporado pela geoestatística em detrimento da estatística clássica. A geoestatística, portanto, trata da modelagem de variáveis aleatórias que apresentam estrutura espacial, chamadas funções regionalizadas (VIEIRA, 2000). A Figura 7 exemplifica o objetivo da geoestatística comparada à estatística clássica.

Figura 7 – Comparação entre a estatística clássica (A) e a geoestatística (B). Para as duas amostragens, o valor médio e a variância são idênticos, porém, a segunda considera a dependência espacial dos pontos amostrados.



Fonte: Carvalho (2017)

Estimador geoestatístico

Nos modelos geoestatísticos, admite-se que os dados amostrados são resultados de processos aleatórios. Desta forma, o primeiro passo é determinar um processo aleatório que melhor descreve o conjunto de dados observados (VIEIRA, 2000).

Um valor da localização x_1 (representação simplificada para um par de coordenadas (x_1, y_1)) é interpretado com a realização $z(x_1)$ de uma variável aleatória $Z(x_1)$. No espaço S onde as amostras estão dispersas, há N realizações das variáveis aleatórias, $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_N)$, correlacionadas entre si.

O conjunto de variáveis aleatórias constitui uma função aleatória, da qual uma realização é $z(x_i)$. Para poder determinar os parâmetros estatísticos das variáveis individuais de uma função, assume-se as hipóteses de estacionaridade da função aleatória. A primeira hipótese assume a homogeneidade das amostras na área S , onde a média da função aleatória é a média aritmética das amostras. A segunda hipótese é definida da seguinte forma: a correlação entre duas variáveis aleatórias somente depende da distância espacial entre elas, e é independente da sua localização (VIEIRA, 2000).

A partir das hipóteses e manipulações matemáticas demonstradas em Vieira (2000) é possível chegar à seguinte equação para o variograma:

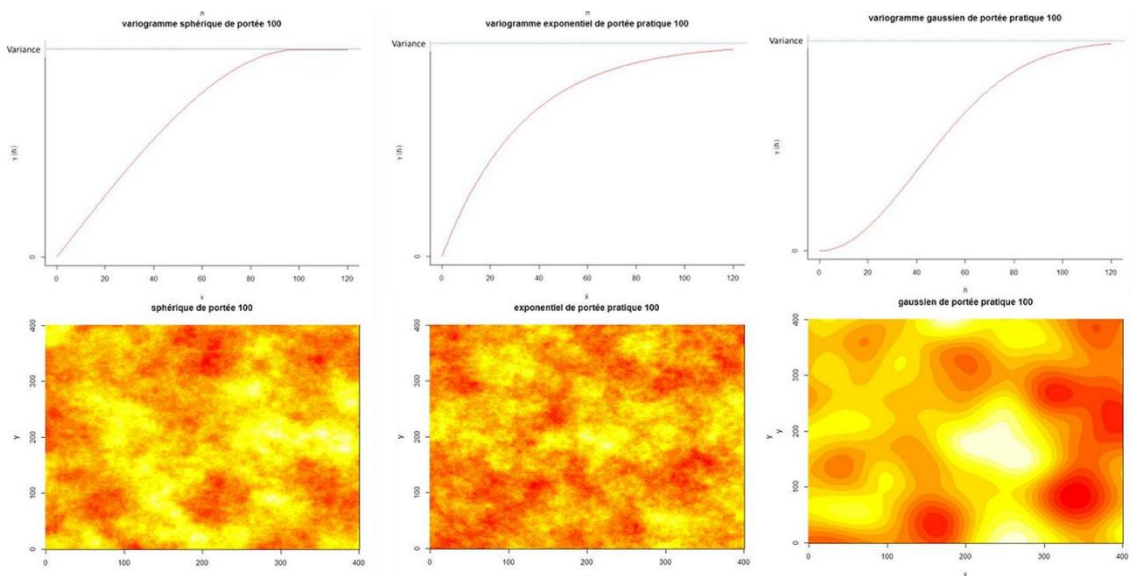
$$2\gamma(h) = \frac{1}{|N(h)|} \sum_{(i,j) \in N(h)} (Z(x_i) - Z(x_j))^2 \quad \text{Equação 3}$$

Modelos de variograma

O variograma obtido empiricamente é uma função discreta e não pode ser computado para toda distância h . Dessa forma sua aplicação é limitada e, então, são aproximados por funções modelos que garantem sua validade de aplicação nos métodos geoestatísticos (como a krigagem discutida no próximo tópico) (CHILES e DELFINER, 1999).

Os modelos de variograma apresentados na Figura 8 são considerados os principais modelos de ajustes aplicado a fenômenos. A figura traz ainda os respectivos campos simulados de cada modelo.

Figura 8 – Exemplos de variogramas (acima) e seus correspondentes campos simulados no espaço (abaixo).



Fonte: adaptado de Ore'Jan (2013)

São parâmetros comuns dos modelos (VIEIRA, 2000):

- Efeito pepita (C_0) ou *nugget*: deslocamento do variograma em relação a origem;
- Patamar ($C_0 + C_1$) ou *sill*: limite do variograma com h tendendo ao infinito;
- Alcance (a) ou *range*: distância na qual as diferenças no variograma se tornam imperceptíveis.

As equações matemáticas que descrevem os modelos são (VIEIRA, 2000):

A) modelo de variograma esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) \quad \text{Equação 4}$$

B) modelo de variograma exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1(1 - e^{-3h/a}) \quad \text{Equação 5}$$

C) modelo de variograma gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1(1 - e^{-3(h/a)^2}) \quad \text{Equação 6}$$

A Krigagem

Após determinar o variograma que melhor se ajusta à variável e havendo dependência espacial entre as amostras, pode-se interpolar valores em qualquer posição dentro do domínio espacial S de referência. O método de interpolação utilizado em geoestatística é conhecido por krigagem, em homenagem a Daniel Krige, matemático sul-africano, que foi o pioneiro neste campo da estatística (ALVES, 2016).

A ideia principal da krigagem é prever o valor de uma função em um determinado ponto através da média ponderada de valores conhecidos das funções vizinhas ao ponto e, portanto, é um método similar a uma análise de regressão. No entanto, a forma na qual os dados variam de um local para outro no espaço não seguem equações lineares ou polinômios. Na prática, o ajuste do variograma é usado para descrever a dependência espacial (VIEIRA, 2000).

Dependendo das propriedades estocásticas dos campos aleatórios e dos vários graus de estacionaridade assumidos, diferentes métodos para o cálculo dos pesos podem ser deduzidos. Neste trabalho, limita-se ao uso do tipo comum de krigagem (*ordinary kriging*), que assume um valor médio desconhecido nas vizinhanças do ponto.

2.5. *Arabidopsis thaliana*

Arabidopsis thaliana tem emergido no meio científico atual como um organismo modelo para diversas pesquisas dentro da biologia vegetal (WEIGEL e GLAZEBROOK, 2002; DELATORRE e SILVA, 2008).

Um organismo modelo é, por definição, uma espécie estudada extensivamente para o entendimento de um fenômeno biológico particular, que possa facilitar o entendimento do fenômeno em outros organismos. Esta estratégia é possível porque princípios biológicos, como rotas metabólicas e regulatórias, e os genes que as codificam são conservados durante a evolução (BORÉM e VIEIRA, 2005). Dentre as características de um organismo modelo estão:

pequeno porte, curto tempo de geração, alta acessibilidade, fácil manipulação, pequeno genoma e ampla conservação de mecanismos, todos atendidos pela *A. thaliana* (DELATORRE e SILVA, 2008)

Nas condições de cultivo na grande maioria dos laboratórios, o ciclo de vida da *Arabidopsis* tem duração de cerca de seis semanas. Aos 15 dias, tem-se a formação do meristema floral. Aos 20, esse meristema dá origem a botões florais. Aos 30 dias há alongação do caule e é possível visualizar a inflorescência. Próximo aos 45 dias, ocorre o desenvolvimento das sementes, seguido do início da senescência (WEIGEL e GLAZEBROOK, 2002)

Quanto à anatomia, as plantas se desenvolvem na forma de roseta que varia de 2 a 10 cm de diâmetro. Dias curtos favorecem o crescimento da roseta, enquanto dias longos favorecem o desenvolvimento do sistema reprodutivo. De maneira análoga às folhas, as flores se formam em um padrão espiral e são compostas por quatro sépalas verdes, quatro pétalas brancas, seis estames e um gineceu interno. O tamanho médio é de aproximadamente dois milímetros. Os frutos são do tipo silíqua e, são produzidas milhares de sementes por planta (WEIGEL e GLAZEBROOK, 2002; DELATORRE e SILVA, 2008)

2.5.1. Condições de cultivo

Em habitat natural, *Arabidopsis* é uma planta anual de inverno. A germinação inicia no outono, as plantas jovens sobrevivem no inverno, o meristema floral emerge na primavera e apenas as sementes sobrevivem aos meses do verão. Em ambiente artificial, as plantas são mais saudáveis e férteis nas seguintes condições (WEIGEL e GLAZEBROOK, 2002):

- **Germinação:** as sementes são tipicamente dormentes e a quebra da dormência pode ocorrer pela embebição a frio, próximo de 4°C, por 2-4 dias. Durante a germinação, é necessário manter alta umidade e se recomenda o uso de plásticos para cobrir os vasos até as plântulas completarem uma semana.
- **Temperatura:** A faixa de temperatura ideal para o cultivo é de 16-25°C. Se o suprimento de água estiver adequado, as plantas podem sobreviver até 34°C, mas com fertilidade reduzida. Entre 22-23°C é a temperatura ótima para um crescimento rápido e robusto.
- **Luz:** A intensidade ótima de radiação é aproximadamente 120-150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- **Fotoperíodo:** O fotoperíodo suportado é de 8-24 horas de luz. Dias longos (>12h) aceleram o ciclo reprodutivo, enquanto dias curtos (<12h) favorece tecidos vegetativos.
- **Umidade:** Após o estabelecimento da plântula, a faixa de umidade pode ser de 25-75%. Ambientes muito úmidos (>90%) podem levar à esterilidade.

3. METODOLOGIA

Nesta seção, descreveremos a metodologia utilizada para a montagem do equipamento, os testes de luz e temperatura, a condução dos experimentos e as análises para cada uma das duas versões do protótipo.

3.1. Protótipo 1

A metodologia descrita a seguir se refere à **primeira versão do protótipo** para cultivo de plantas.

3.1.1. Construção do dispositivo

Para a construção do dispositivo, um segmento de 60 cm de cano PVC cujo diâmetro externo é de 150 mm foi selecionado. A partir de uma altura de 15 cm da base inferior do cano, recortou-se uma janela de 13 cm de altura e 20 cm de largura e a seção foi recoberta por um plástico transparente à base de polipropileno, fixado ao tubo com fita crepe. Um exaustor de 75 mm de diâmetro, preso à uma braçadeira também de PVC de 10 cm de altura e perímetro circular idêntico ao do cano principal, foi instalado a 44 cm da base, com auxílio de fixadores de braçadeira plásticos, popularmente conhecidos como “enforca-gato”. Para as entradas de ar, foram abertos quatro furos de aproximadamente 3 mm de diâmetro, distribuídos de forma homogênea a 5 cm da base (ver [Determinação do Sistema de Arrefecimento](#)). Duas tampas de PVC com diâmetro de encaixe compatível ao do cano foram usadas na parte inferior e superior do tubo e, assim, a altura final do dispositivo passou a ser de 70 cm. No centro da tampa superior, fez-se um furo de 2 cm de diâmetro, por onde passa uma haste metálica rosqueada. Na extremidade inferior da haste, prendeu-se uma placa circular de luz (ver [Montagem do Sistema de Iluminação](#)) de 12 cm de diâmetro. A haste metálica e as roscas funcionam como um sistema de regulação da altura da fonte luminosa dentro do dispositivo.

Os detalhes acima mencionados bem como o próprio dispositivo podem ser observados na Figura 9.

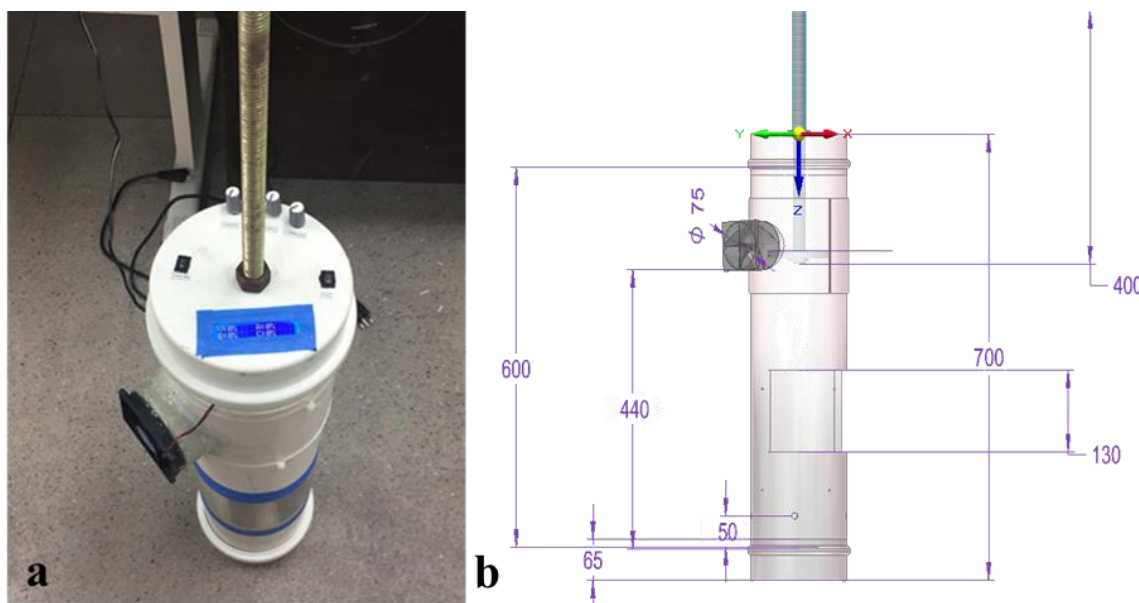
3.1.2. Montagem do Sistema de Iluminação

O sistema de iluminação foi pensado de maneira a controlar tanto a quantidade quanto a qualidade da luz incidente. Para isso fitas de LED do tipo 5050 e potência nominal de 4,8 W/m (aproximadamente 80 mW por diodo) nas cores vermelho, azul e branco (temperatura 4000 K) foram distribuídas em tiras contendo 3 LEDs cada no interior de um disco de madeira de 12 cm nas proporções de 8:4:2, respectivamente, como pode ser visto na Figura 10. A potência total instalada é então de aproximadamente 3,4 W.

Os conjuntos de LEDs das diferentes cores, assim como o próprio exaustor, foram ligados a um potenciômetro (dímer), que controla a potência fornecida. Assim, para cada um dos comprimentos de onda, a quantidade de luz pode ser modificada alterando a potência, e

dessa forma proporcionando diferentes composições, modificando a qualidade da radiação fornecida à planta. A Figura 11 mostra alguma das diferentes composições possíveis.

Figura 9 – Protótipo de máquina de cultivo de plantas. a) Fotografia com vista lateral-superior. b) Representação esquemática do dispositivo com dimensões (em milímetros).



Fonte: Do autor (2020)

Figura 10 – Placa de luz mostrando as fitas de LED instaladas



Fonte: Do autor (2020)

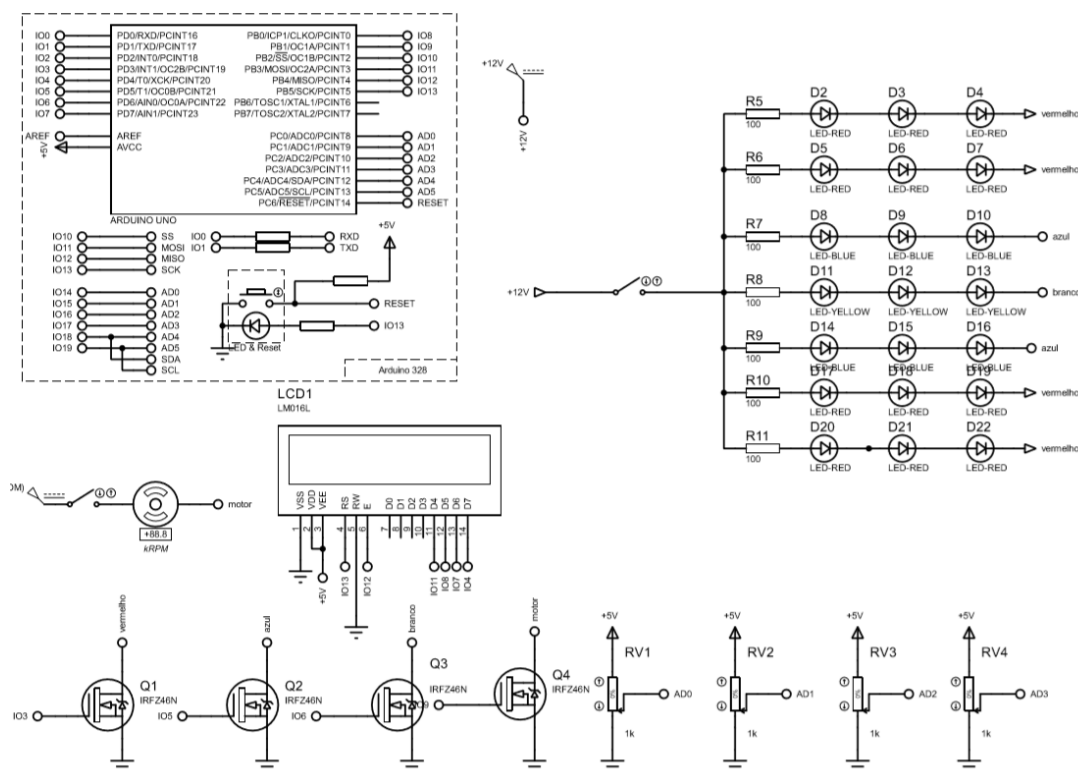
O circuito eletrônico total, além das lâmpadas e do exaustor, conta ainda com um controlador do tipo Arduino® nano, um visor de LCD, quatro potenciômetros, quatro transistores (*mosfet*), e dois interruptores, para a luz e exaustor. O esquemático do circuito montado, incluindo o sistema de iluminação e o sistema de arrefecimento, podem ser vistos na Figura 12.

Figura 11 – Dispositivo mostrando diferentes composições luminosas: vermelho, azul, branco e rosa (soma das anteriores)



Fonte: Do autor (2020)

Figura 12 – Esquemático do circuito montado para a primeira versão do protótipo

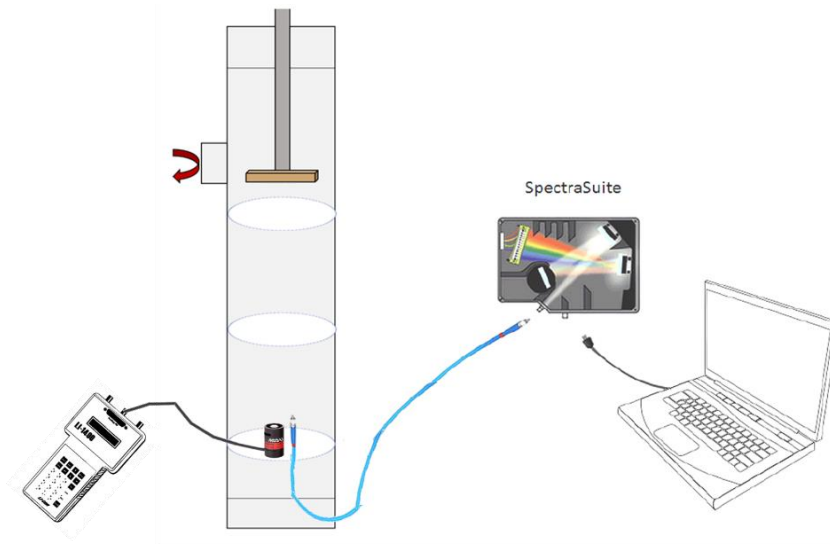


Fonte: Do autor (2020)

3.1.3. Testes de luz

Para testar a qualidade do espectro de radiação e a eficiência das lâmpadas LED instaladas, foi utilizado um sistema de medida composto por um cabo de fibra óptica, de 600 μ m de diâmetro, associado ao aparelho SpectraSuite, da Ocean Optics, e por um piranômetro acoplado a um *datalogger* da Li-Cor, modelo LI1400, identificados na Figura 13.

Figura 13 – Representação do sistema de medida da qualidade e intensidade da radiação no interior do dispositivo



Fonte: Do autor (2020)

A placa de luz foi mantida a uma altura fixa de 49 cm do chão e as medidas foram tomadas nas alturas de 11, 28 e 39 cm, ou seja, a uma distância de 38, 21 e 10 cm da placa. As medidas foram realizadas dentro e fora de uma caixa revestida com alumínio, denominada aqui como “caixa refletora”, para as lâmpadas azuis, vermelhas e brancas isoladamente, com todas ligadas em conjunto e com todas desligadas, isto é, em um arranjo fatorial de 3x2x5 (alturas/reflexão/qualidade da luz).

Também foi feita uma investigação da variação da radiação emitida à medida que se afasta da placa de luz. Para isso, revestiu-se a parte interna do dispositivo com papel alumínio (parte refletora voltada para dentro do protótipo) e mediu-se com o piranômetro a intensidade luminosa para todas as qualidades de luz em cinco diferentes pontos: 13, 19, 24, 30 e 36 cm de altura.

3.1.4. Determinação do Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento foi montado com auxílio de um exaustor localizado na porção superior do dispositivo e de aberturas circulares na base, a fim de assegurar um fluxo de ar entre o meio externo e interno, permitindo a troca de calor entre eles.

A velocidade do exaustor foi determinada por um termo-anemômetro TAD-500 da Instruterm, mostrado na Figura 14. Aferiu-se em quatro pontos distintos do exaustor a velocidade de saída do ar e a velocidade média foi utilizada para o cálculo de vazão de ar pela Equação 7:

$$Q_{out} = \bar{v}_{out} * A_{out} = n * V \quad \text{Equação 7}$$

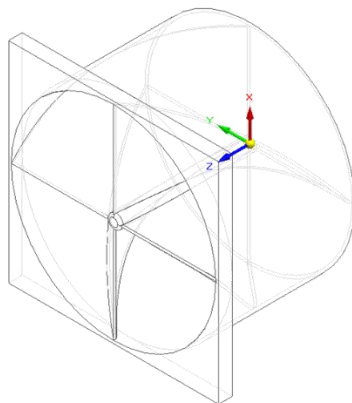
onde Q indica vazão, \bar{v} a velocidade média aferida e A, a área de passagem do fluido (**Figura 15**). O índice *out* indica que a referência tomada foi a do fluxo de saída de ar. O número de vezes em que o ar é trocado (por unidade de tempo) é representado por n e V é o volume do dispositivo.

Figura 14 – Termo-anemômetro utilizado para aferir velocidade do fluxo de ar de saída e mensurar a vazão de troca de ar.



Fonte: Do autor (2020)

Figura 15 – Determinação da área de saída de ar para cálculo de vazão.



$$A_{out} = A_{coroa} = \pi(r_{maior}^2 - r_{menor}^2)$$

Fonte: Do autor (2020)

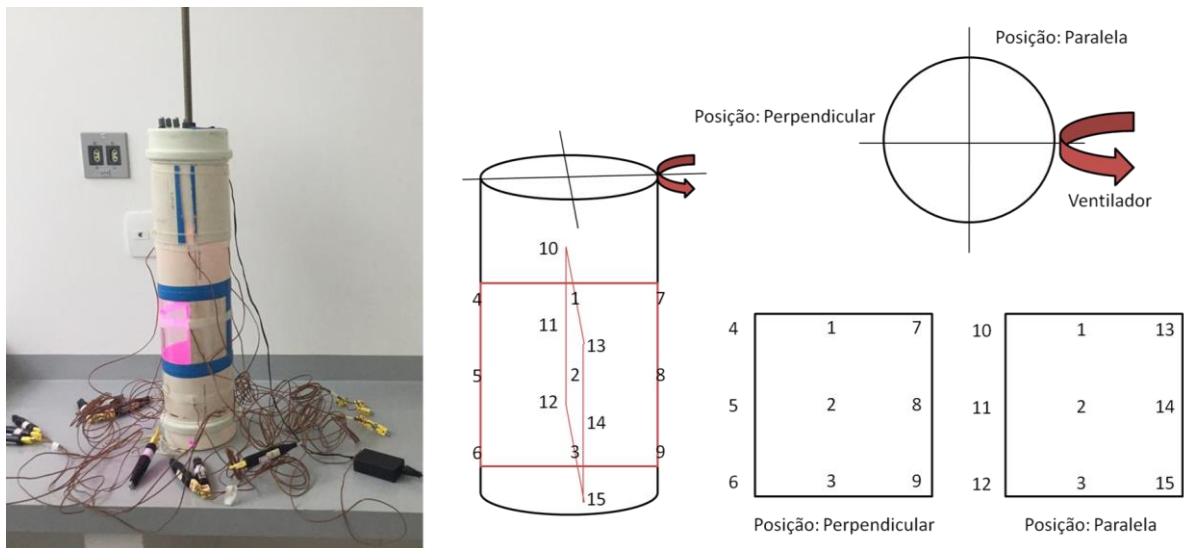
É necessário ressaltar que uma boa circulação de ar dentro do dispositivo é importante não só para manutenção da temperatura, evitando superaquecimentos, mas também para garantir o fornecimento constante de CO₂.

3.1.5. Condução dos testes de temperatura

Para mapear a temperatura no interior do dispositivo, distribuíram-se sensores de temperatura posicionados em pequenos furos localizados a 12,5 ($z = 0$), 28,5 ($z = 16$) e 44,5 cm ($z = 32$) de altura a partir do chão, tanto na secção transversal ao exaustor quanto na paralela.

A Figura 16 mostra a distribuição dos sensores no dispositivo exemplificando as duas secções tomadas como base.

Figura 16 – Posicionamento dos sensores de temperatura



Fonte: Do autor (2020)

Os dados de temperatura foram coletados por *dataloggers* OM-EL-USB-TC, da Omega Engineering Inc, nomeados de A-I. Estes eram inicialmente conectados aos sensores da secção transversal e depois de 30 minutos aos da secção paralela. As trocas ocorriam assim a cada meia hora, rotacionando não apenas a posição (paralela e transversal), mas também o sensor ao qual estava acoplado, de forma a aleatorizar também os instrumentos e diminuir possíveis fontes de variação nas medidas de temperatura. A

Tabela 1 traz o *design* experimental descrito.

Após coletados, os dados foram analisados na plataforma estatística R, com auxílio da biblioteca *geoR* para os cálculos de estatística espacial. Os métodos estatísticos são mais extensivamente detalhados no item [Construção dos perfis de temperatura](#).

Testes exploratórios

Inicialmente, o perfil de temperatura no interior do protótipo foi avaliado em **dois ambientes** diferentes: um ambiente controlado a 22°C e em casa de vegetação, com a

temperatura variando entre 28 e 36°C, a depender da hora do dia. A casa de vegetação está localizada no Setor de Fisiologia Vegetal, departamento de Biologia, Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras (21°13'40''S e 44°57'50''W GRW, altitude 960 m), região sul do estado de Minas Gerais. Neste último ambiente, investigou-se ainda a influência da posição do protótipo, em especial da janela de plástico, em relação ao sol e o uso de material refletor para mitigar esses possíveis efeitos.

Tabela 1 – *Design* experimental da coleta de dados de temperatura. PERP indica a posição perpendicular (transversal) ao exaustor e PARA a posição paralela

Horário	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30
Posição	PERP	PARA	PERP	PARA	PERP	PARA	PERP	PARA	PERP	PARA	PERP	PARA
Sensor	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger	Logger
1	A	A	G	G	D	D	A	A	G	G	D	D
2	B	B	H	H	E	E	B	B	H	H	E	E
3	C	C	I	I	F	F	C	C	I	I	F	F
4	D	-	A	-	G	-	D	-	A	-	G	-
5	E	-	B	-	H	-	E	-	B	-	H	-
6	F	-	C	-	I	-	F	-	C	-	I	-
7	G	-	D	-	A	-	G	-	D	-	A	-
8	H	-	E	-	B	-	H	-	E	-	B	-
9	I	-	F	-	C	-	I	-	F	-	C	-
10	-	D	-	A	-	G	-	D	-	A	-	G
11	-	E	-	B	-	H	-	E	-	B	-	H
12	-	F	-	C	-	I	-	F	-	C	-	I
13	-	G	-	D	-	A	-	G	-	D	-	A
14	-	H	-	E	-	B	-	H	-	E	-	B
15	-	I	-	F	-	C	-	I	-	F	-	C

A Tabela 2 traz o resumo dos ensaios realizados e na Figura 17 pode ser visto o dispositivo na casa de vegetação, com e sem o uso de caixa refletora. Ressalta-se que em todos os testes, a radiação foi mantida na potência máxima, assim como a velocidade do exaustor.

Tabela 2 – Testes exploratórios para determinação do perfil de temperatura no interior do dispositivo

Ensaio	Ambiente	Data	Luz			Cooler	Posição*	Caixa refletora
			Branco	Azul	Verm			
1	Controle	10/05/19	100%	100%	100%	100%	N.A.	N.A.
2	Casa de vegetação	22/05/19	100%	100%	100%	100%	Norte	Não
3	Casa de vegetação	27/05/19	100%	100%	100%	100%	Sul	Não
4	Casa de vegetação	29/05/19	100%	100%	100%	100%	Norte	Sim

*A posição indica a direção da janela de plástico

Figura 17 – Ensaio realizados em casa de vegetação. O protótipo foi posicionado com a janela apontando para o norte e se evidencia o uso da caixa refletora.



Fonte: Do autor (2020)

Testes do sistema de arrefecimento

Para os testes relacionados à velocidade de exaustão, os experimentos foram conduzidos de forma semelhante aos testes exploratórios, isto é, em dois ambientes diferentes: ambiente controlado (21-22°C) e casa de vegetação (28-36°C), mantendo-se a radiação na máxima potência, porém com diferentes vazões do exaustor (0, 50% e 100% da potência máxima fornecida). Outra diferença é que o protótipo estava internamente revestido com papel alumínio.

A Tabela 3 traz o resumo dos testes realizados.

Tabela 3 – Testes do sistema de arrefecimento

Ensaio	Ambiente	Data	Luz			Cooler	Posição*	Caixa refletora
			Branco	Azul	Verm			
1	Controlado	07/08/19	100%	100%	100%	100%	N.A.	N.A.
2	Controlado	23/08/19	100%	100%	100%	50%	N.A.	N.A.
3	Controlado	22/08/19	100%	100%	100%	0%	N.A.	N.A.
4	Casa de vegetação	08/08/19	100%	100%	100%	100%	Norte	Sim
5	Casa de vegetação	21/08/19	100%	100%	100%	0%	Norte	Sim

*A posição indica a direção da janela de plástico

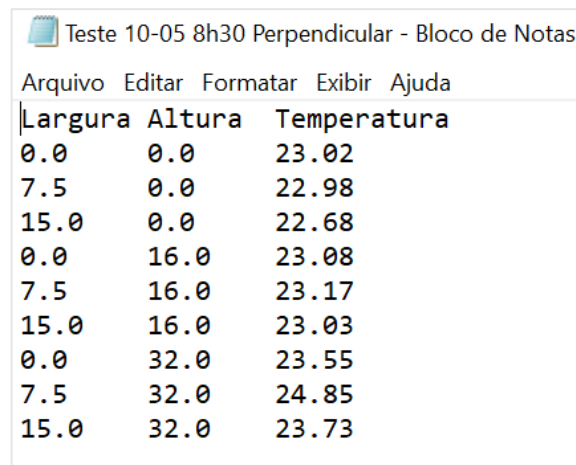
3.1.6. Construção dos perfis de temperatura

Com os dados coletados por sensores de temperaturas distribuídos ao longo do dispositivo e com auxílio da geoestatística, pôde-se construir um mapa de temperatura no interior do protótipo. No entanto, a resolução de problemas de geoestatística requer um grande esforço para o cálculo de matrizes complexas. Para fazer previsões mais facilmente, há alguns pacotes geoestatístico para R disponíveis gratuitamente. O pacote *geoR* é o mais conhecido e utilizado atualmente e foi o escolhido para este trabalho (VOLFOVÁ e ŠMEJKAL, 2012).

Conjunto de dados amostrados

Os dados de temperatura foram coletados a cada minuto por *dataloggers* do tipo OM-EL-USB-TC da marca Omega Engineering Inc por um tempo de trinta minutos em cada secção, rotativamente. A média dos pontos foi utilizada, sempre excluindo a primeira medida, e a cada sensor foi atribuída uma coordenada de largura (diâmetro) e altura. A Figura 18 traz um conjunto de dados amostrado para um intervalo em uma secção.

Figura 18 – Exemplo de conjunto de dados espaciais amostrados



Largura	Altura	Temperatura
0.0	0.0	23.02
7.5	0.0	22.98
15.0	0.0	22.68
0.0	16.0	23.08
7.5	16.0	23.17
15.0	16.0	23.03
0.0	32.0	23.55
7.5	32.0	24.85
15.0	32.0	23.73

Fonte: Do autor (2020)

Variograma

Inicialmente, os dados foram tratados de forma a obter algumas informações úteis, como em gráficos e sumários estatísticos, buscando assim identificar possíveis erros de medida ou *outliers*.

Na sequência, com auxílio da função “*variog*”, os variogramas foram criados. A distância máxima foi fixada em 40, considerando que a máxima distância entre os pontos amostrados era de aproximadamente 35,4 cm na diagonal, e o estimador utilizado foi do tipo

clássico. Três modelos típicos para ajuste da curva do variograma foram testados: esférico, exponencial e gaussiano. Os valores iniciais de *nugget*, *sill* e *range* (ver definição em Modelos de variograma) foram obtidos com ajuste visual usando a função “eyefit”.

Os modelos eram então comparados e considerava o melhor ajuste aquele que apresentasse menor valor de Akaike.

Krigagem

A partir do modelo de dependência espacial escolhido, foi possível prever a temperatura em uma localização não amostrada através da krigagem. Para tanto, usou-se uma malha de 40000 pontos (200x200) e a função “krig” para o modelo considerado o melhor ajuste.

3.2. Protótipo 2

A metodologia descrita a seguir se refere à **segunda versão do protótipo** para cultivo de plantas e os testes associados a ela.

3.2.1. Adaptação do dispositivo

Na segunda versão do protótipo, a estrutura inicial foi reaproveitada, porém com algumas modificações no material. As partes interna e externa foram inteiramente recobertas com fita adesiva de alumínio. A janela de plástico foi substituída por uma janela removível de PVC, de mesmo diâmetro do tubo e que assim “se encaixava” ao dispositivo, por onde foi possível fazer a manutenção da planta. A placa de luz passa a ser um quadrado de 11 cm de lado e lateralmente também foram instaladas fitas de LED, compondo o novo sistema de iluminação. A seção [Nova proposta do Sistema de Iluminação](#) a seguir detalha a construção desse novo sistema.

A nova versão do dispositivo bem como os detalhes acima mencionados podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 – Novo dispositivo recoberto com fita adesiva de alumínio externa e internamente. Detalhe das luzes laterais instaladas.



Fonte: Do autor (2020)

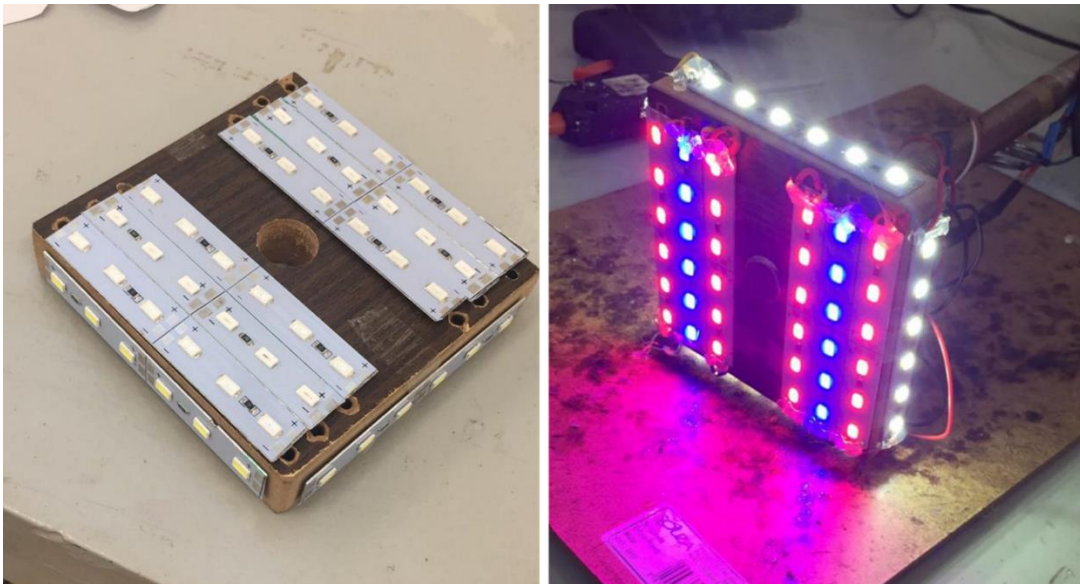
3.2.2. Nova proposta do Sistema de Iluminação

Pensando em fornecer uma maior intensidade luminosa e ainda atender as necessidades de cada estágio de crescimento da planta, foi instalado um sistema de iluminação lateral com

três estágios (Figura 19b). Cada estágio é composto por fitas de LED colocadas nas laterais da janela do dispositivo e separadas por um interruptor. Dentro do estágio, são colocadas três fitas em cada lateral e cada fita contém 6 lâmpadas do tipo 5050 e com potência nominal de 12 W/m (200 mW por diodo), vermelhas e azuis na proporção de 3:1. Assim, cada estágio tem 36 lâmpadas, 18 de cada lado.

A placa de luz também foi substituída por uma de secção quadrática de 11 cm de lado, contendo tiras de LED do tipo 5730 cuja potência nominal é de 24 W/m (330 mW por diodo), cerca de quatro a cinco vezes mais potentes que as fitas usadas anteriormente. A nova placa foi montada de forma que tiras contendo 6 lâmpadas cada foram colocadas lado a lado, sendo quatro tiras de vermelho e duas de azul, intercaladas. Outras quatro tiras de branco frio foram dispostas na lateral da placa. Os detalhes mencionados acima podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20 – Placa de luz da segunda versão do protótipo



Fonte: Do autor (2020)

3.2.3. Testes de luz II

Nesta segunda versão do protótipo, usou-se um sistema de medida da radiação semelhante ao anterior, porém aqui optou-se por utilizar um quantômetro, também da fabricante Li-Cor, ao invés de um piranômetro (Figura 13).

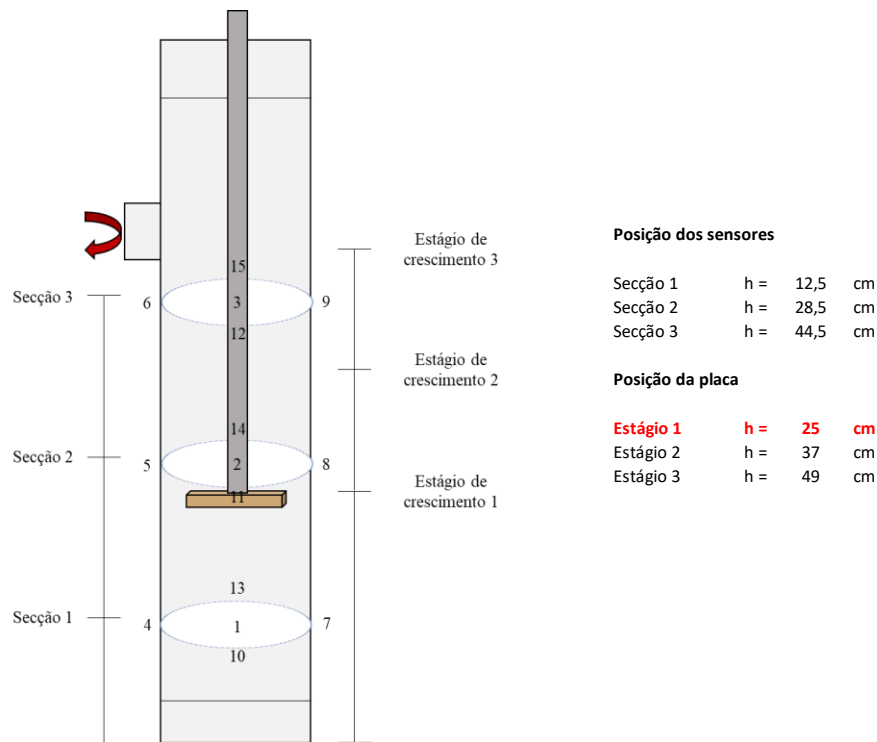
Os testes foram conduzidos por estágios, onde a placa de luz foi mantida nas alturas de 25, 37 e 49 cm para o primeiro, o segundo e o terceiro estágio, respectivamente. As medidas foram tomadas a 16,5 cm no primeiro estágio (8,5 cm da fonte), 16,5 e 26 cm no segundo estágio (20,5 e 11 cm da fonte) e 16,5, 26 e 39,5 cm no terceiro estágio (32,5, 23 e 9,5 cm da

fonte). As medidas foram tomadas com todo o sistema ligado, com as lâmpadas vermelhas, azuis, brancas e laterais isoladamente, e com todo o sistema desligado.

3.2.4. Investigação da temperatura

Para a construção dos perfis de temperatura da segunda versão do protótipo, os sensores foram colocados nas mesmas posições anteriores, porém optou-se por analisar as secções circulares representando os três estágios das luzes laterais, como demonstrado na Figura 21.

Figura 21 – Secções circulares para análise de temperatura no interior do dispositivo



Fonte: Do autor (2020)

Os sensores cobriam duas secções por vez e a cada vinte minutos eram rotacionados, conforme o *design* experimental da Tabela 4.

Nesta etapa, caracterizou-se cada um dos três estágios posicionando a placa de luz com todas as luzes ligadas à máxima potência em cada altura característica e acendendo as luzes da lateral conforme o estágio que se encontra. A exaustão também foi mantida no máximo e todos os testes foram conduzidos em ambiente controlado, com temperatura de 22°C.

Após a coleta de dados, estes também foram analisados no R, com auxílio da biblioteca *geoR*, para os cálculos de estatística espacial para a construção dos perfis de temperatura, que foi mais extensivamente descrita no item [Construção dos perfis de temperatura](#). Fez-se as devidas adaptações no *script* para o cálculo de secções circulares.

Tabela 4 – *Design* experimental da coleta de dados de temperatura da segunda versão

Horário	00:00	00:20	00:40	01:00	01:20	01:40
Secções	1, 2	2, 3	3, 1	1, 2	2, 3	3, 1
Sensor	<i>Logger</i>	<i>Logger</i>	<i>Logger</i>	<i>Logger</i>	<i>Logger</i>	<i>Logger</i>
1	A	-	F	A	-	F
2	F	A	-	F	A	-
3	-	F	A	-	F	A
4	B	-	G	B	-	G
5	G	B	-	G	B	-
6	-	G	B	-	G	B
7	C	-	H	C	-	H
8	H	C	-	H	C	-
9	-	H	C	-	H	C
10	D	-	I	D	-	I
11	I	D	-	I	D	-
12	-	I	D	-	I	D
13	E	-	J	E	-	J
14	J	E	-	J	E	-
15	-	J	E	-	J	E

3.3. Crescimento de planta

Após caracterizado o protótipo *per se*, é necessário entender como se comporta o ambiente de forma interativa com a planta e, de fato, comprovar sua eficácia para o crescimento e desenvolvimento vegetal. Assim, essa terceira parte se refere ao cultivo de *Arabidopsis thaliana* no dispositivo mantido em ambiente controlado a 18-19°C.

3.3.1. Sistema de irrigação

De forma a garantir o menor esforço para o cultivo de plantas no dispositivo, um sistema de irrigação baseado em tubos comunicantes e capilaridade foi implantado.

Dois reservatórios de água, um externo e um interno, encontravam-se comunicados por uma mangueira de diâmetro estreito, de forma que, quando se abastecia o reservatório externo, o líquido era levado ao reservatório interno. Um recipiente, contendo o substrato, foi colocado acima do reservatório de água interno e um barbante passado por um orifício levava a água por capilaridade do reservatório para o recipiente, mantendo o substrato sempre próximo da sua capacidade de campo. Tanto os reservatórios quanto o recipiente contendo o substrato foram feitos a partir de garrafas PET.

Detalhes do sistema de irrigação podem ser vistos na Figura 22.

Figura 22 – Proposta de sistema de irrigação



Fonte: Do autor (2020)

O reservatório interno foi recoberto por fita isolante preta e a água utilizada era destilada, para evitar a proliferação de algas. O sistema pode ser adaptado para fertirrigação, caso necessário.

3.3.2. Semeadura e transplântio

Para a quebra da dormência, sementes de *Arabidopsis* foram embebidas por três dias em água natural e colocadas em ambiente refrigerado entre 5-10°C (adaptado de WEIGEL e GLAZEBROOK, 2002). Na sequência, cinco sementes foram colocadas para germinar por vaso de 500 cm³ preenchidos com substrato para plantas Carolina Soil, um composto de turfa, vermiculita, resíduo orgânico agroindustrial tipo A e calcário. Nenhuma fertilização fez-se necessária.

Os vasos contendo as sementes eram constantemente irrigados e cobertos com plástico filme para assegurar um ambiente úmido, propício à germinação. Apenas uma plântula por vaso foi mantida e estas cresceram em câmaras de crescimento do tipo Conviron a 190-200 μmol fótons $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de doze horas, temperatura diurna de 22°C e noturna de 18°C, mantidas a capacidade de campo com irrigações periódicas (WEIGEL e GLAZEBROOK, 2002).

Após o 14º dia de semeadura, quando a planta apresentava dimensões adequadas, realizou-se o transplântio para o recipiente do sistema de irrigação desenvolvido, que foi preenchido com o mesmo substrato, tomando cuidado para não ferir raízes.

O cultivo de *Arabidopsis* no dispositivo ocorreu em duplicada espaçadas no tempo, sendo que a primeira semeadura ocorreu no dia 17/10/2019 e a segunda no dia 06/11/2019.

3.3.3. Radiação e fotoperíodo

Por se tratar de uma planta rasteira durante sua fase vegetativa, optou-se por manter a placa de luz no Estágio 1. As lâmpadas foram mantidas em sua potência máxima, o que correspondia a aproximadamente 140 μmol fótons $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, resultado apresentado na seção [Sistema de Iluminação II](#). O fotoperíodo escolhido foi de 12/12.

3.3.4. Caracterização dos perfis de temperatura

De modo semelhante à caracterização da segunda versão do protótipo, procedeu a construção dos perfis de temperatura do dispositivo com a planta por secções circulares, de modo semelhante ao explicado no item da seção anterior [Investigação da temperatura](#).

Com a placa de luz no Estágio 1, os sensores foram posicionados nas secções 1 e 2 e os dados de temperatura foram coletados para semanalmente a partir do transplântio, sempre das 18:00 às 00:00 e das 06:00 às 12:00 da manhã seguinte, a cada 5 minutos. A temperatura da

sala foi mantida entre 18-19°C. A análise dos dados prosseguiu de forma semelhante à do item [Construção dos perfis de temperatura](#), com cada conjunto de dados sendo à média dos pontos amostrados a cada hora. Os perfis de temperatura foram traçados até o fim da fase vegetativa, com o aparecimento da evocação floral, determinada visualmente, para cada uma das repetições, correspondendo a um tempo de 4-6 semanas a partir da germinação.

3.3.5. Avaliação do crescimento

O crescimento da planta foi avaliado pelo parâmetro de área foliar, mensurado com ajuda do aplicativo de celular gratuito Easy Leaf Area, e por análises visuais. As avaliações foram feitas duas vezes por semana até o fim da fase vegetativa. O uso do aplicativo foi validado pelos autores Easlon e Bloom (2014) e sua utilização é brevemente descrita a seguir.

Uma caixa revestida de papel branco e com orifício por onde se encaixava o vaso com a planta foi utilizada como suporte, enquanto um quadrado vermelho de 4 cm² posicionado sobre a caixa na altura da planta foi utilizado como referência. Fotos foram tomadas de três alturas diferentes, a aproximadamente 20, 30 e 40 cm da planta, e o verde das folhas e o vermelho da referência eram comparados pelo aplicativo, resultando em um valor de área foliar, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Utilização do aplicativo gratuito Easy Leaf Area para avaliação da área foliar



Fonte: Do autor (2020)

4. RESULTADOS

Para melhor compreensão do trabalho, os resultados foram divididos em três casos: radiação, temperatura e desenvolvimento da planta. Nesta seção, apresentaremos apenas os resultados mais relevantes para cada um dos casos. Os demais resultados podem ser consultados em [ANEXOS](#).

4.1. Radiação

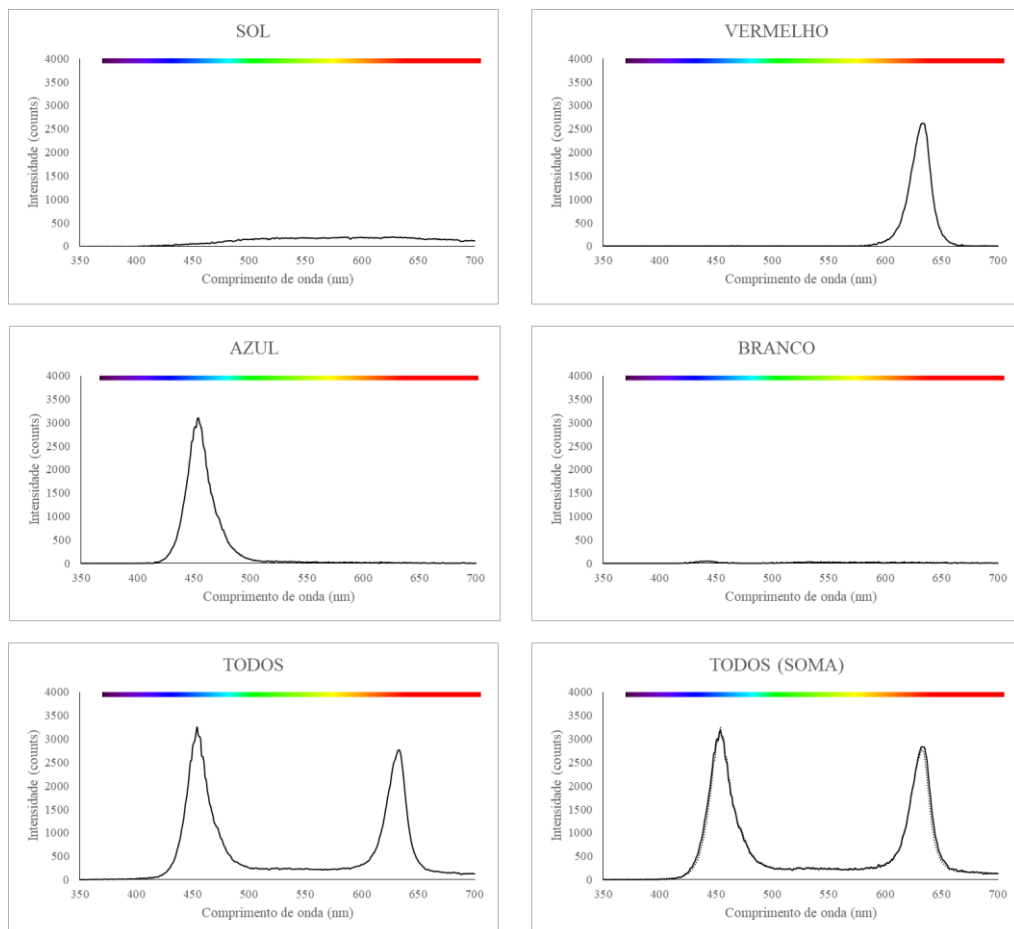
Os resultados a seguir mostram o comportamento da qualidade e quantidade de radiação no interior do dispositivo em cada uma das duas versões do protótipo. O sistema de iluminação precisou ser aprimorado de uma versão para a outra por não apresentar a intensidade luminosa considerada adequada para o desenvolvimento de algumas espécies vegetais.

4.1.1. Sistema de Iluminação I

Para a primeira versão do protótipo, verificou-se a qualidade e a quantidade da radiação emitida pela placa de luz, conforme descrito no item [Testes de luz](#).

A Figura 24 – Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação I a uma distância de 38 cm da fonte. O tempo de integração foi de 0,1 s. traz o espectro da radiação emitida para cada possibilidade de qualidade de luz do sistema de iluminação. As medidas foram tomadas na Posição 1, a 38 cm de distância da placa. Considerou-se que a radiação aferida com todas as luzes desligadas correspondia a uma radiação solar residual.

Figura 24 – Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação I a uma distância de 38 cm da fonte. O tempo de integração foi de 0,1 s.



O pico de intensidade para a luz “azul” é próximo ao comprimento de onda de 460 nm e para a luz “vermelha” é de 640 nm, correspondendo realmente às cores azul (450-495 nm) e vermelho (620-750 nm). Além disso, por apresentarem um único pico de intensidade, são ainda consideradas monocromáticas. A luz “branca” apresentou uma intensidade muito baixa, indicando que a radiação emitida pelas lâmpadas de LED foi dispersada no meio ou que a potência luminosa é extremamente baixa. As qualidades de luz “individuais” somadas (linha cheia), correspondem à medida com todas as luzes acesas (linha pontilhada).

As intensidades de cada possibilidade de qualidade de luz, medidas com o piranômetro, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Intensidade luminosa no interior do dispositivo em diferentes distâncias da placa de luz e para as diferentes possibilidades de qualidade.

Posição	Distância (cm)	Caixa refletora	Sol (W/m ²)	Vermelho (W/m ²)	Azul (W/m ²)	Branco (W/m ²)	Soma (W/m ²)	Todos (W/m ²)
1	38	Não	40	1	1	0	42	43
2	21	Não	47	3	1	1	51	51
3	10	Não	12	4	1	1	19	18
1	38	Sim	3	1	1	0	5	5
2	21	Sim	2	2	1	1	5	5
3	10	Sim	0	5	1	1	7	7

Não há diferenças notórias entre as qualidades de luz “vermelho”, “azul” e “branco” com ou sem a caixa refletora, comparadas em uma mesma posição. Porém a caixa refletora reduz a intensidade da radiação solar no interior do dispositivo, tornando-a praticamente nula.

Embora a irradiância possa ser medida em W/m², a fotossíntese é um processo quântico e suas reações são mais dependentes do número de fótons ativos que da energia que estes carregam. Assim, a medida de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos, em mol m⁻²s⁻¹, é mais representativa.

A Tabela 6 apresenta a intensidade luminosa em termos de PPF, em μmol m⁻²s⁻¹. Para a conversão, considerou-se que 49% da radiação proveniente do sol é PAR (ZHU, LONG e ORT, 2008) e para as demais se utilizou a Equação 2 (Equação de Planck-Einstein), com valores de comprimento de onda de 460, 555 e 640 nm para o azul, branco (média) e vermelho.

Os valores máximos alcançados de 43 e de 34 μmol m⁻²s⁻¹, sem e com a caixa refletora, respectivamente, são considerados insuficientes para muitas espécies. O ganho de radiação advinda do sol é considerado baixo, além de imprevisível.

Tabela 6 – Densidade de fluxo de fótons no interior do dispositivo em diferentes distâncias da placa de luz e para as diferentes possibilidades de qualidade.

Posição	Distância (cm)	Caixa refletora	Sol ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Vermelho ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Azul ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Branco ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Soma ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	38	Não	20	5	4	2	31
2	21	Não	23	14	3	3	43
3	10	Não	6	24	5	6	41
1	38	Sim	1	5	4	2	13
2	21	Sim	1	11	4	3	19
3	10	Sim	0	24	3	7	34

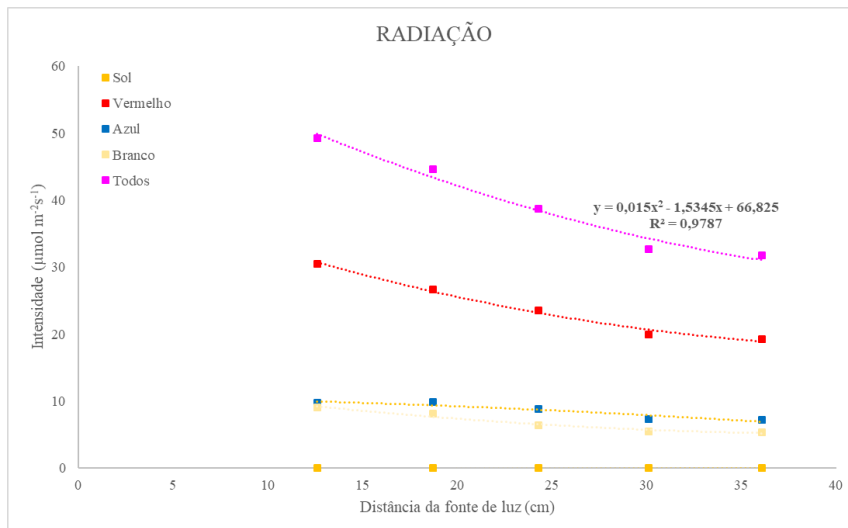
Assim, optou-se por revestir o protótipo internamente com papel alumínio, na tentativa de concentrar a radiação. Os resultados obtidos para diferentes distâncias da placa de luz estão resumidos na Tabela 7 e na Figura 25.

Tabela 7 – Densidade de fluxo de fótons no dispositivo revestido internamente com papel alumínio

Distância (cm)	Sol ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Vermelho ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Azul ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Branco ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Soma ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
36	0	19	7	5	32
30	0	20	7	5	33
24	0	24	9	6	39
19	0	27	10	8	45
13	0	31	10	9	49

A radiação solar medida no interior do dispositivo foi desprezível. Com o uso do revestimento, obteve-se a 13 cm da placa de luz um total de $49 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, contra $34 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a 10 cm sem o alumínio.

Figura 25 – Relação entre a intensidade luminosa e a distância da fonte de luz.



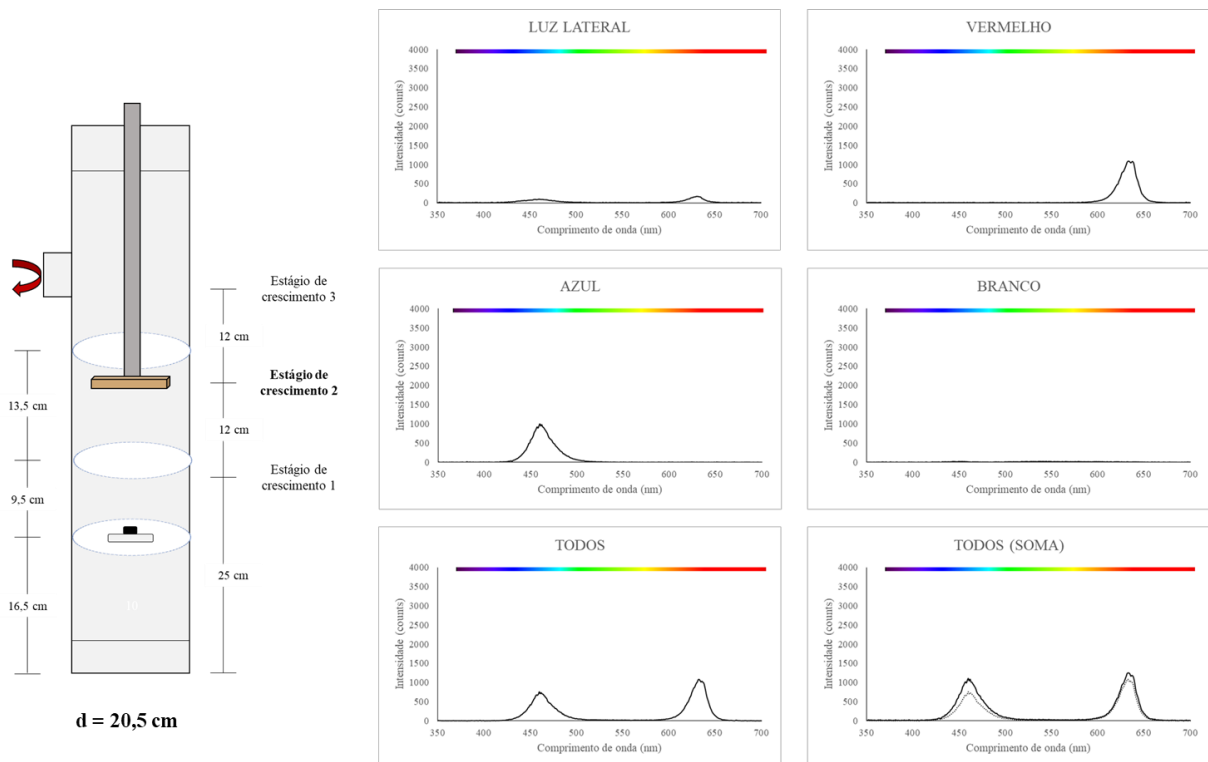
Embora extrapolações gráficas para além dos dados avaliados não sejam recomendadas, para a curva da Figura 25, tem-se que, a uma distância infinitamente pequena da planta, a quantidade máxima hipotética de radiação seria de aproximadamente $67 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Esse valor ainda é baixo, e para além da extrapolação, as limitações físicas inviabilizariam o crescimento da planta, já que a proximidade da fonte luminosa é associada a temperaturas mais elevadas, pela dissipação de calor das luzes. Assim, foi necessário um novo Sistema de Iluminação.

4.1.2. Sistema de Iluminação II

O segundo sistema de iluminação contou com o reforço das luzes laterais e com uma placa de LEDs mais potentes. Nesta etapa, também se avaliaram a quantidade e a qualidade da radiação fornecida, agora nos vários estágios possíveis. Para detalhes da metodologia, ver seção [Testes de luz](#).

A Figura 26 mostra o espectro de radiação fornecida para os arranjos de luz da segunda versão do protótipo. A radiação foi medida para o Estágio 2, a 20,5 cm da placa de luz. Os demais espectros (para Estágio 1 e Estágio 3) podem ser vistos em Anexos de Radiação.

Figura 26 – Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação II, posicionado no Estágio 2, a uma distância de 20,5 cm da fonte. O tempo de integração é de 0,02 s.



As luzes “vermelho” e “azul” apresentaram seus picos de intensidade em 640 e 460 nm, respectivamente, e a luz lateral apresentou dois picos: um próximo a 460 nm e outro próximo a 640 nm. A qualidade de luz “branco” também apresentou baixa intensidade, assim como na primeira versão. No entanto, as luzes individuais quando somadas (linha contínua) não correspondem exatamente à medida com todas as luzes acessas (linha pontilhada), indicando limitações na medição.

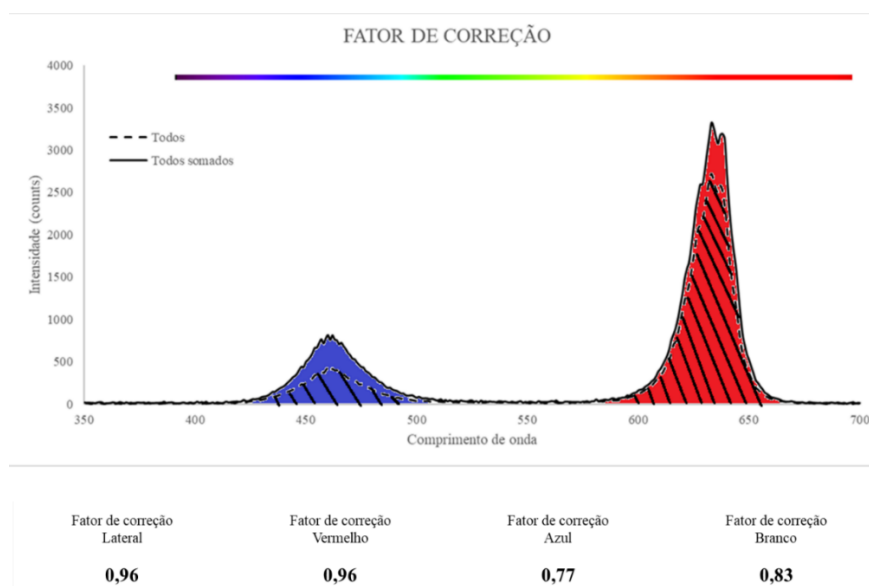
As intensidades luminosas foram medidas já em PPFd com auxílio de um quantômetro e os valores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Densidade de fluxo de fótons na segunda versão do protótipo para os diversos estágios

Estágio	Altura (cm)	Distância (cm)	Lateral ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Vermelho ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Azul ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Branco ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Soma ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Todos ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	16,5	8,5	16,4	52,2	51,5	39,4	159,4	137,3
2	16,5	20,5	38,3	31,6	28,2	19,7	117,8	105,1
2	26,0	11,0	28,2	41,8	39,5	33,2	142,7	124,5
3	16,5	32,5	47,8	25,6	21,9	14,7	110,0	100,5
3	26,0	23,0	40,9	33,1	28,4	20,4	122,8	110,8
3	39,5	9,5	19,1	55,6	54,0	45,3	174,0	150,2

Da análise da Tabela 8, também se percebe as discrepâncias das intensidades somadas com a intensidade medida quando todas as luzes estão acesas. Infere-se então que há alguma interferência na medida do fluxo de fótons, e para isso, estimou-se um fator de correção baseado na área sob a curva do espectro de radiação, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – Fator de correção para as intensidades luminosas das diferentes qualidades de luz.



Dessa forma, os dados corrigidos são apresentados na Tabela 9.

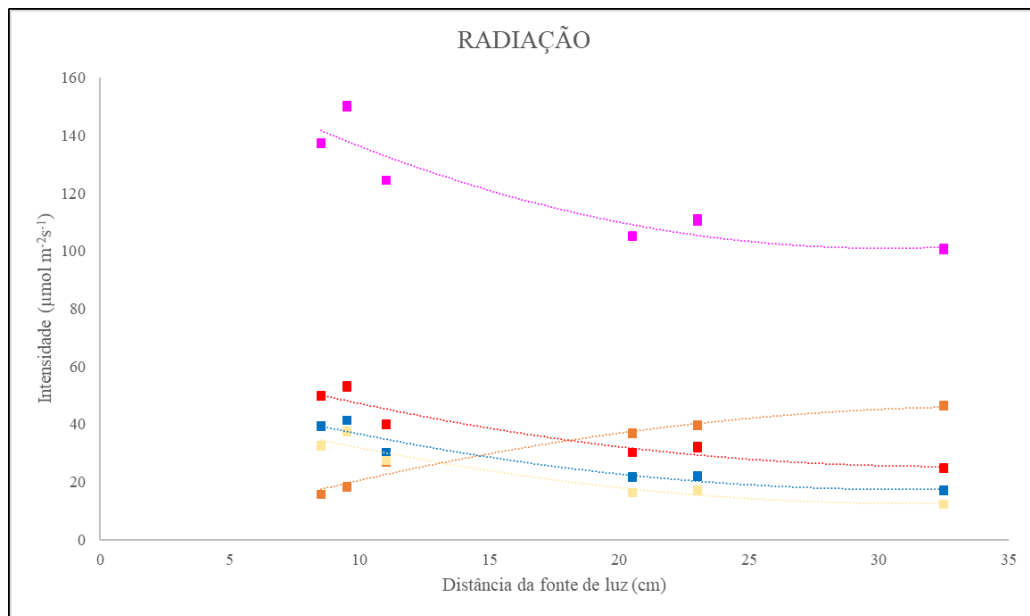
Tabela 9 – Densidade de fluxo de fótons na segunda versão do protótipo para os diversos estágios após aplicar fator de correção

Estágio	Altura (cm)	Distância (cm)	Lateral* ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Vermelho* ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Azul* ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Branco* ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Todos ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	16,5	8,5	15,6	49,8	39,4	32,5	137,3
2	16,5	20,5	36,8	30,3	21,7	16,3	105,1
2	26,0	11,0	26,9	39,9	30,2	27,4	124,5
3	16,5	32,5	46,3	24,8	17,1	12,3	100,5
3	26,0	23,0	39,6	32,1	22,0	17,1	110,8
3	39,5	9,5	18,3	53,1	41,4	37,5	150,2

O fluxo de fótons no interior do dispositivo varia, então, de 100 a 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, aproximadamente. Para o Estágio 1, usado no cultivo de Arabidopsis, obteve-se aproximadamente 140 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de fótons.

A Figura 28 apresenta o comportamento da intensidade da radiação com a distância da placa de luz.

Figura 28 – Comportamento da radiação para diferentes distâncias da fonte.



■ Lateral*	Lateral:	$y = -0,040x^2 + 2,8x - 3,8$	$R^2 = 0,967$
■ Vermelho*	Vermelho:	$y = 0,042x^2 - 2,8x + 70,5$	$R^2 = 0,901$
■ Azul*	Azul:	$y = 0,043x^2 - 2,7x + 59,0$	$R^2 = 0,922$
■ Branco*	Branco:	$y = 0,042x^2 - 2,6x + 54,0$	$R^2 = 0,926$
■ Todos*	Todos:	$y = 0,086x^2 - 5,2x + 179,8$	$R^2 = 0,852$

As diferentes qualidades de luz da placa têm uma taxa de decaimento semelhante conforme se afastam da fonte. Para uma distância x da placa de luz, é possível calcular a intensidade y para cada qualidade de luz, pelas equações estabelecidas na Figura 28. Qualquer combinação obedecendo essas quantidades poderia então ser conseguida através da regulação do potenciômetro, indicando a possibilidade de automação do controle de luz.

A luz lateral tem um comportamento diferente, já que sua origem não é a placa de luz. Aqui, na verdade, deve-se entender uma menor distância da placa de luz como uma maior altura no dispositivo e, assim, mais luzes laterais acesas.

A curva para todas as luzes é praticamente a soma das curvas individuais.

4.2. Temperatura

Os dados apresentados a seguir são resultados da investigação do comportamento da temperatura no interior do dispositivo com relação ao material utilizado, ao sistema de arrefecimento e à dinâmica da própria planta.

4.2.1. Testes exploratórios

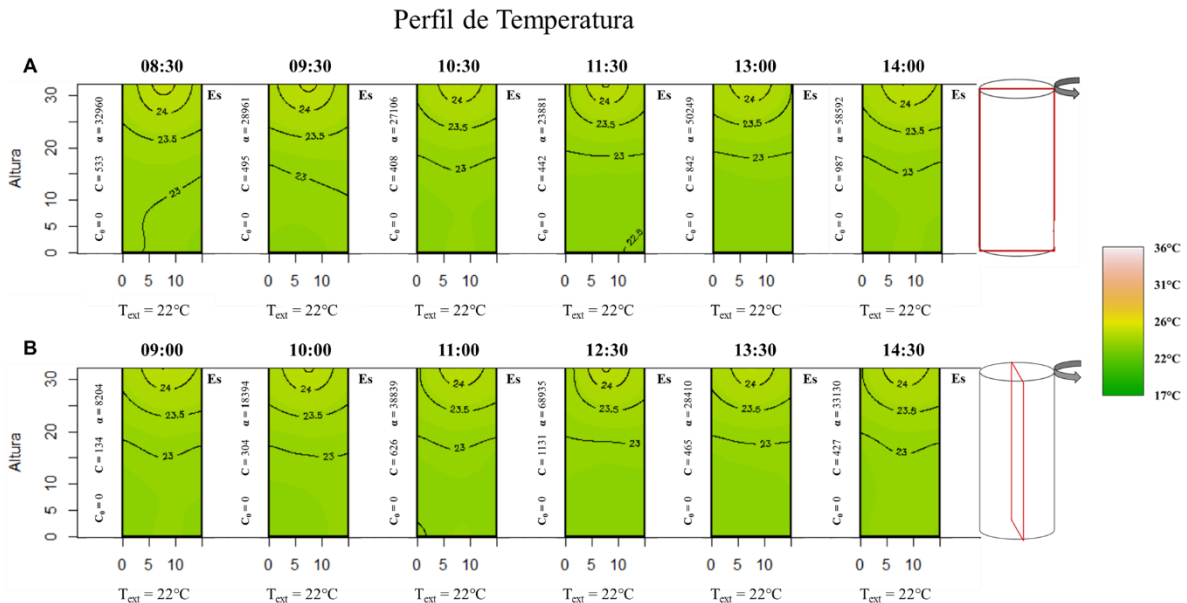
Os testes exploratórios foram conduzidos na **primeira versão** do protótipo em dois ambientes: uma sala refrigerada e em casa de vegetação. Para detalhes da metodologia, consultar o item [Testes exploratórios](#).

A) Ambiente controlado

Para os testes em ambiente controlado, o dispositivo foi colocado em uma sala fechada e refrigerada a 22 °C.

A Figura 29 apresenta o perfil de temperatura no interior do dispositivo, onde é possível ver a distribuição de temperatura ao longo do tempo por meio de uma escala de cores e de isolinhas.

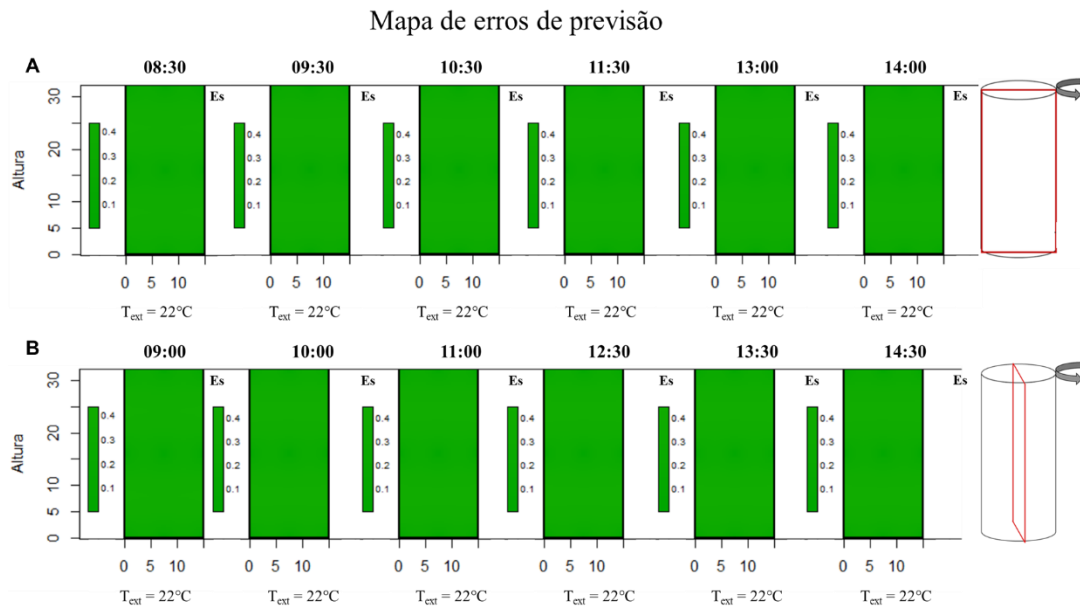
Figura 29 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em um ambiente controlado a 22°C. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor.



Legenda: Es – Esférico, Ex – Exponencial e G – Gaussiano (modelos geoestáticos). As variáveis de cada modelo são: C_0 , *nugget*; $C = C_0 + C_1$, *still* e α , *range*.

A Figura 30 traz o mapa de erros de previsão, onde o gradiente de cores indica o erro associado à previsão de temperatura.

Figura 30 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura do ambiente controlado a 22°C.



Pela análise dos gráficos, infere-se que o perfil de temperatura se mantém praticamente constante ao longo do tempo e que o erro de previsão é menor que 0,5°C. Também, conclui-se que a temperatura aumenta quanto mais próximo da placa de luz, localizada na parte superior, e esse aumento chega a ser de 2°C em relação ao ambiente externo.

B) Casa de vegetação

A casa de vegetação simula um ambiente externo com temperaturas mais intensas, variando de 28 a 36°C a depender da hora do dia.

Inicialmente o dispositivo foi colocado em uma mesa no interior da casa de vegetação, com o exaustor posicionado para o leste e a janela de plástico para o norte. A Figura 31 mostra o perfil de temperatura para esta condição e a Figura 32 mostra o mapa de erros de previsão.

Nota-se que o perfil de temperatura é dinâmico e que a temperatura aumenta conforme a temperatura do dia também aumenta. Porém, o material do dispositivo (um polímero de PVC) promove um pequeno isolamento em relação ao ambiente externo, resultando em uma temperatura cerca de 2-3°C mais amena no começo do dia e mantendo o calor no final da tarde, quando o ambiente externo começa a esfriar.

O erro de previsão é no máximo de 1,2°C.

É interessante observar que o gradiente de temperatura no interior do dispositivo varia ao longo do dia de acordo com o movimento do sol, isto é, pela manhã o lado leste concentra

as maiores temperaturas e pela tarde o lado oeste. Além disso, o experimento foi conduzido durante o solstício de inverno (maio de 2019) e na cidade de Lavras (localizada a 21° sul), resultando em uma rota solar inclinada para o norte e, como a janela de plástico transparente está posicionado também para o norte, aparecem bolsões de calor ao centro.

Figura 31 – Perfil de temperatura no decorrer do dia em casa de vegetação. A) Secção versal ao exaustor orientada oeste-leste; B) Secção paralela ao exaustor orientada sul-norte.

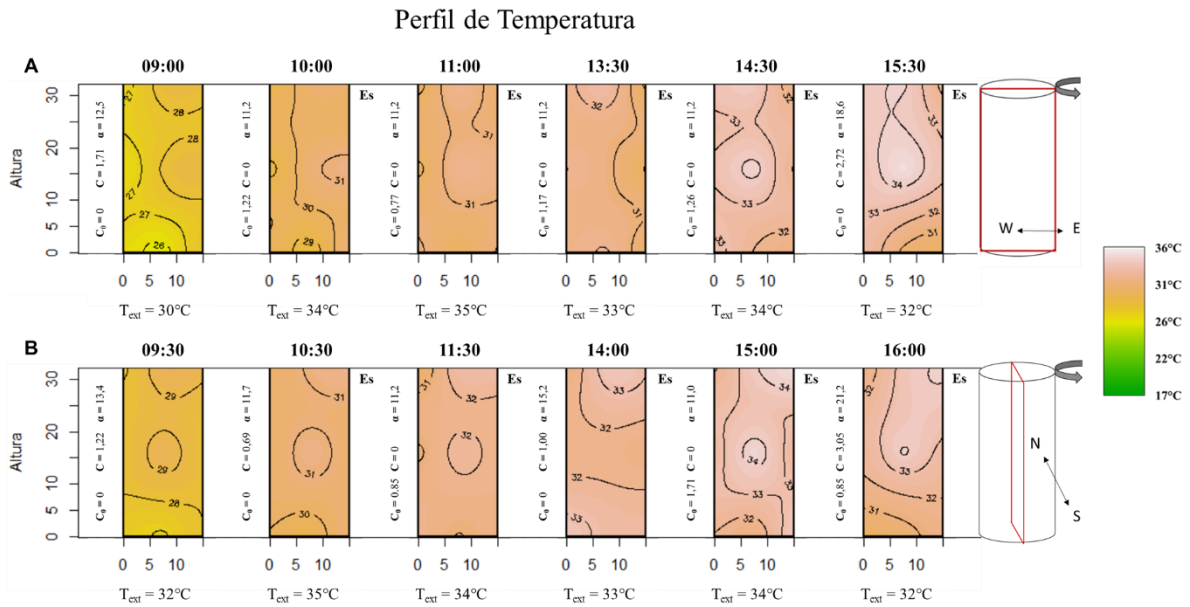
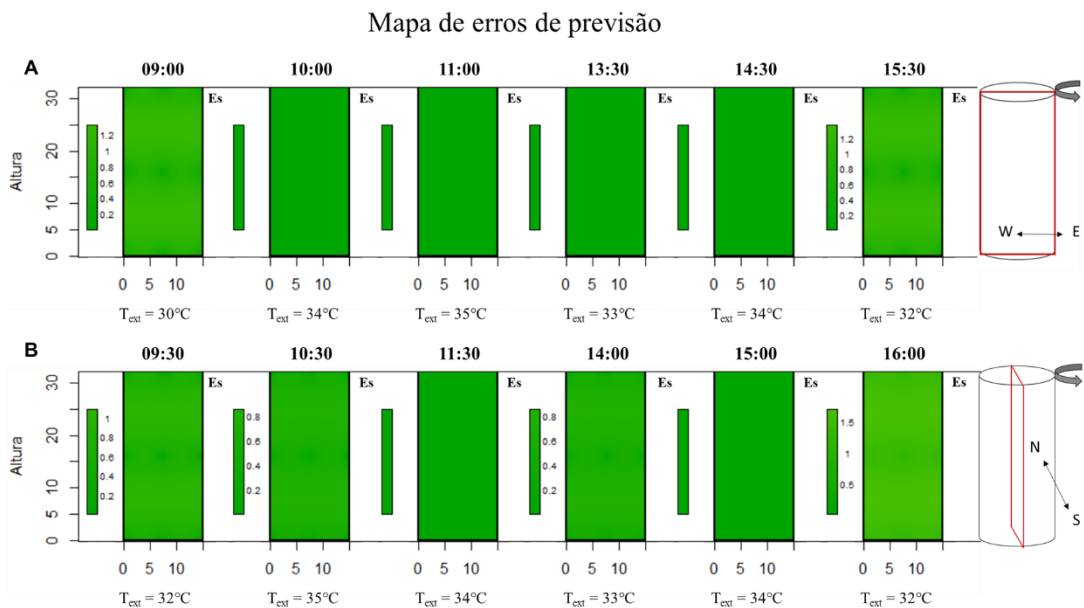


Figura 32 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com janela na posição norte.



Em um segundo momento, girou-se o dispositivo em 180° e, assim, o exaustor ficou posicionado para o oeste e a janela de plástico para o sul. A Figura 33 traz o perfil de temperatura nesta condição e a Figura 34 o mapa de erros de previsão.

Figura 33 – Perfil de temperatura no decorrer do dia em casa de vegetação. A) Secção versal ao exaustor orientada leste-oeste; B) Secção paralela ao exaustor orientada norte-sul.

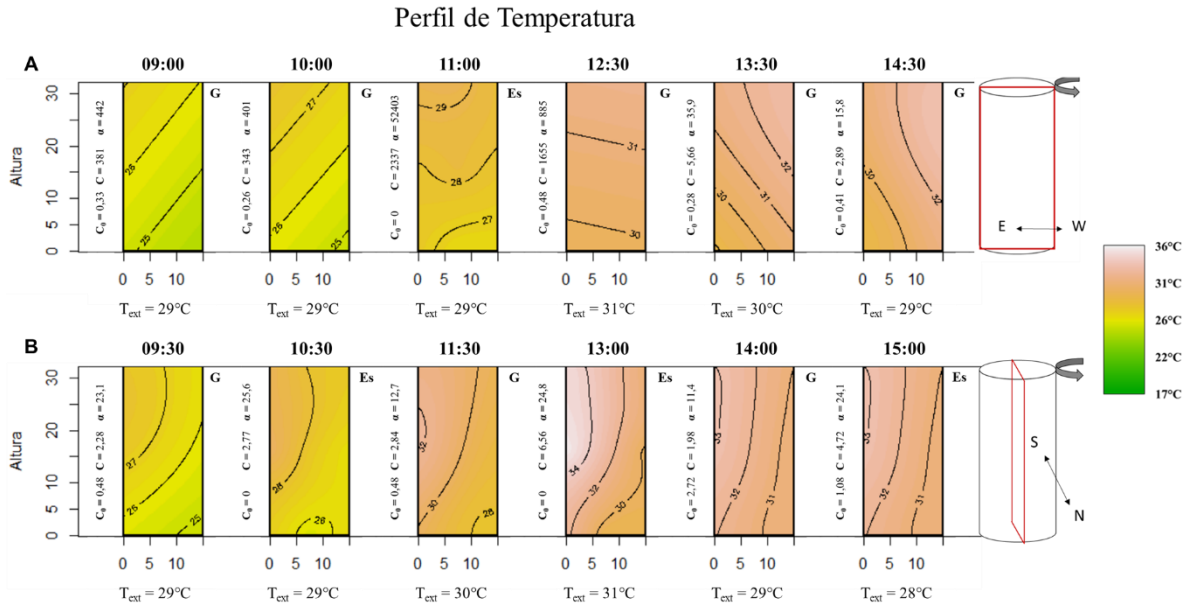
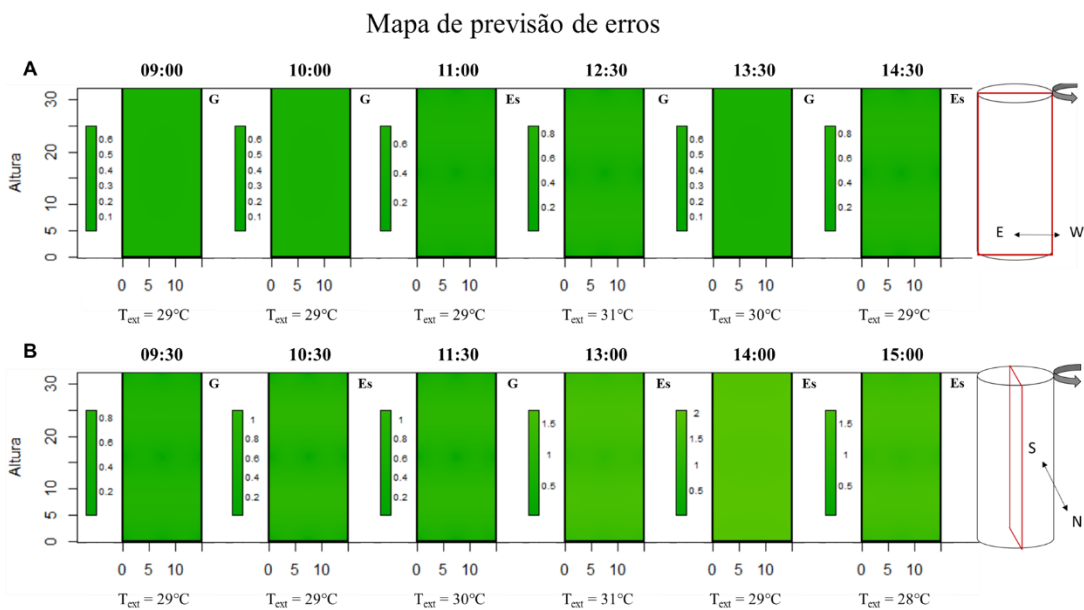


Figura 34 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com janela na posição sul.



O gradiente de temperatura seguiu novamente o movimento do sol, corroborando com os resultados anteriores. Na direção norte-sul, o lado norte que teve a maior incidência de raios

solares, manteve-se mais aquecido. Porém, como a janela de plástico estava na direção sul, não foi observada a formação bolsões de calor. Os erros de previsão se mantiveram em um máximo de 2°C.

Optou-se assim por realizar mais um ensaio usando um material refletor para mitigar o efeito da incidência solar direta. As Figura 35 e Figura 36 apresentam, respectivamente, o perfil de temperatura e o mapa de erros de previsão para o dispositivo com material refletor.

Figura 35 – Perfil de temperatura no decorrer do dia em casa de vegetação, usando material refletor. A) Secção versal ao exaustor orientada oeste-leste; B) Secção paralela ao exaustor orientada sul-norte.

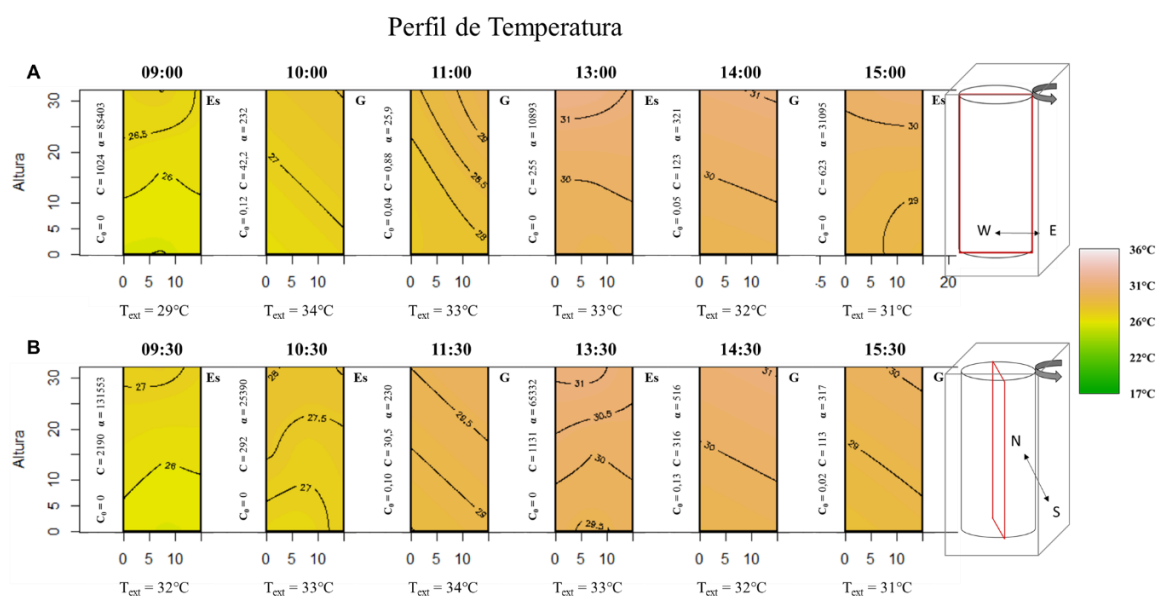
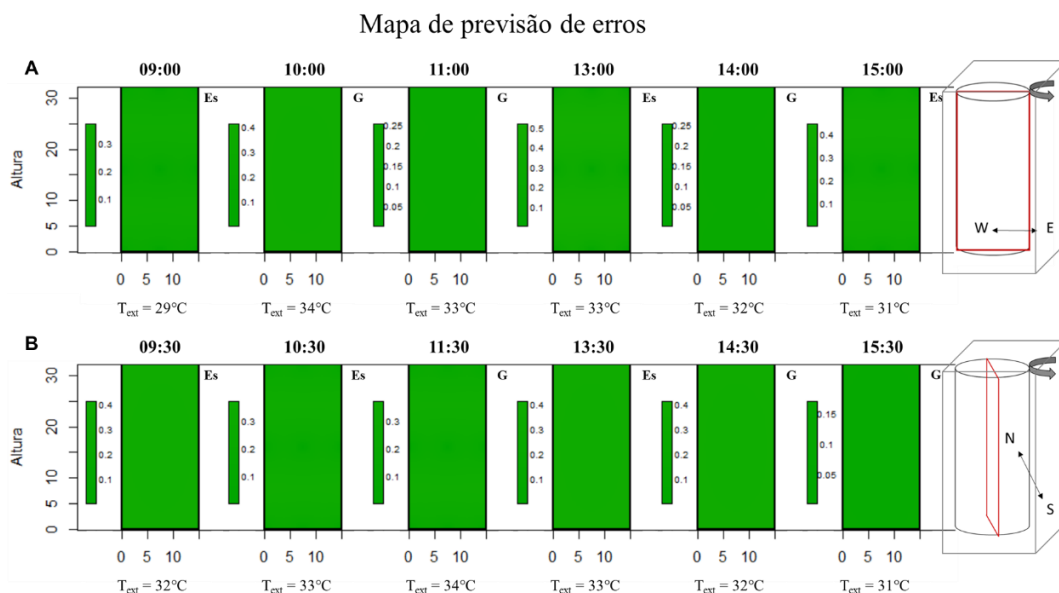


Figura 36 – Mapa de erros de previsão para a temperatura em casa de vegetação com material refletor.



Neste cenário, não se observou uma relação direta com o movimento do sol. O perfil de temperatura se mostrou mais homogêneo, com um gradiente positivo na direção da placa de luz, aumentando a temperatura média no decorrer do dia. É interessante notar também que o material refletor funcionou também como um bom isolante, mantendo a temperatura interna de 2 a 6°C menor. O erro máximo de previsão foi de 0,4°C.

4.2.2. Testes de arrefecimento

Os testes de arrefecimento também foram conduzidos na **primeira versão** do protótipo, revestido internamente com alumínio, tanto em ambiente controlado como em casa de vegetação. Para detalhes da metodologia ver itens [Determinação do Sistema de Arrefecimento](#) e [Testes do sistema de arrefecimento](#).

A) Vazão máxima de exaustão

A velocidade média de saída do ar, com exaustor na máxima potência, foi de:

$$v_{\text{méd}} = (1,1 + 0,2) \text{ m s}^{-1}$$

Considerando a área de saída como a área da coroa, isto é, $A_{\text{out}} \approx 41 \text{ cm}^2$, então, pela Equação 1, obtém-se que a vazão máxima de saída de ar é de, aproximadamente:

$$Q_{\text{out}} = 4,51 \text{ dm}^3\text{s}^{-1}$$

Para o volume de troca de ar de $V = 7,55 \text{ dm}^3$, região compreendida entre os furos de entrada de ar e o exaustor, tem-se que:

$$N = \frac{V}{Q_{\text{out}}} = 1,67 \text{ s}$$

Isto significa que o ar é completamente renovado a cada 1,67 s, quando o exaustor se encontra na sua máxima potência. Caso a velocidade de saída do ar reduza à metade, tem-se que o tempo de renovação do ar dobra.

B) Ambiente controlado

O protótipo, agora revestido internamente com alumínio, foi colocado em uma sala fechada mantida a aproximadamente 20°C. A Figura 37 traz o perfil de temperatura e a Figura 38 o mapa de erros de previsão para esta condição.

De modo semelhante ao dispositivo sem o revestimento interno, o perfil de temperatura se mantém coerente ao longo do tempo (Figura 29 e Figura 37) e o erro de previsão é da ordem de 0,5°C. A temperatura aumenta até 2°C ao se aproximar da placa de luz.

Figura 37 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em um ambiente controlado a aproximadamente 20°C com revestimento interno. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor

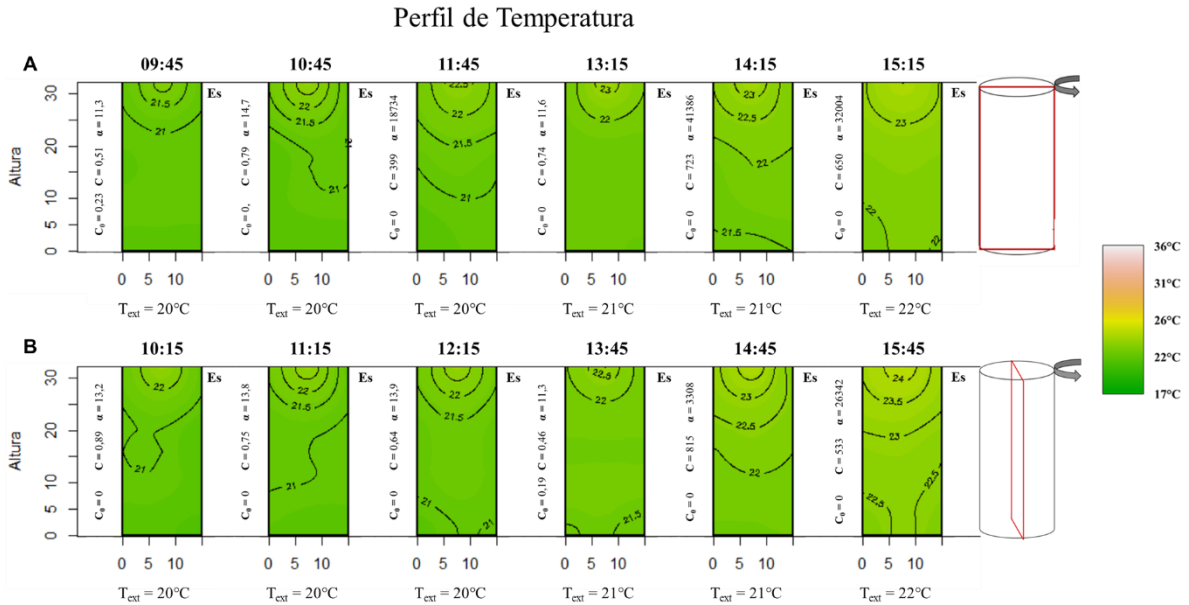
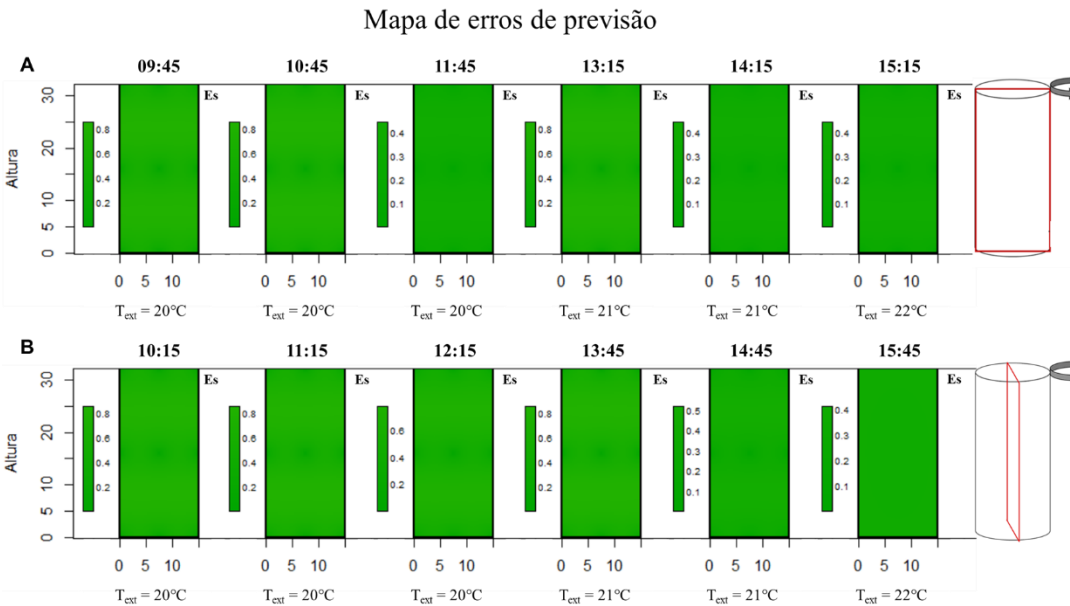


Figura 38 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em ambiente controlado com revestimento interno.



Para investigar a influência do sistema de arrefecimento, o exaustor foi completamente desligado. As Figura 39 e Figura 40 trazem o perfil de temperatura e o mapa de erros de previsão nesta condição.

Com o exaustor desligado, o perfil de temperatura mostra um gradiente bem acentuado de temperatura em direção à placa de luz, aumentando em cerca de 5 a 6°C a temperatura interna comparada a temperatura ambiente. Pode-se inferir da comparação entre a Figura 37 e Figura 39 que o sistema de exaustão dissipa parte do calor emitido pelas lâmpadas de LED. O erro de previsão é da ordem de 1,2°C.

Figura 39 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em um ambiente controlado a aproximadamente 20°C com exaustor desligado. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor

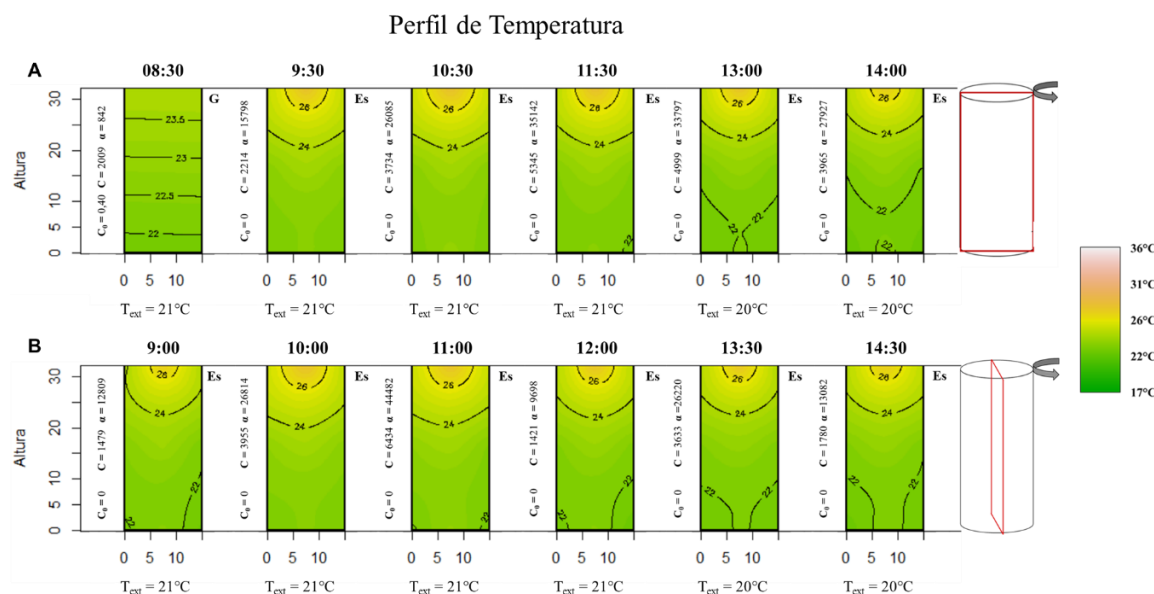
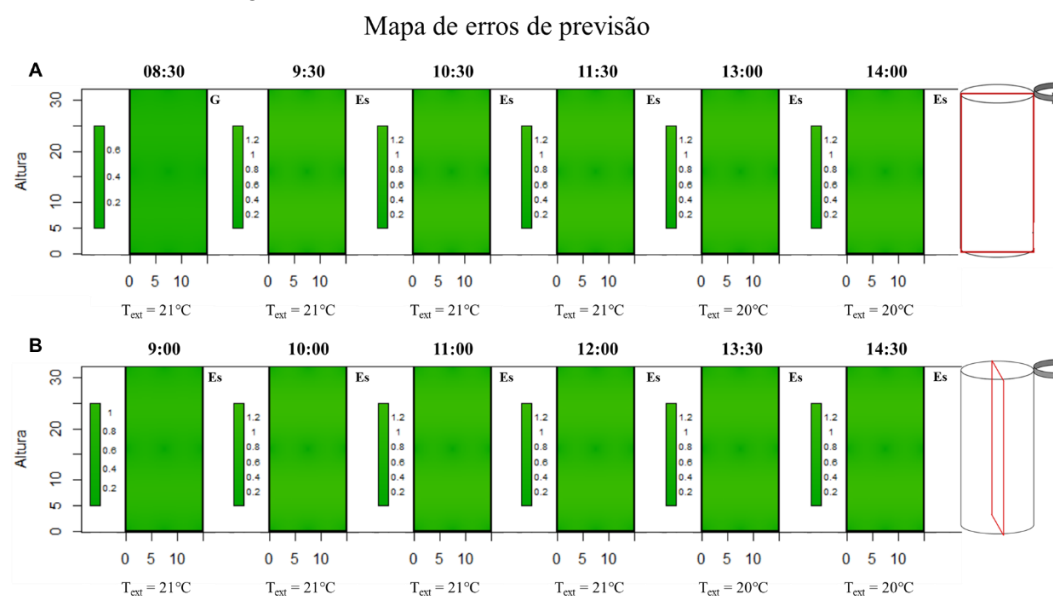


Figura 40 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em ambiente controlado com exaustão desligada.



Ainda para entender melhor a influência da exaustão na temperatura interna, realizou-se um teste com o exaustor na metade de sua potência. A Figura 41 mostra o perfil de

temperatura para a exaustão a 50% da potência e a Figura 42 mostra o mapa de erros de previsão.

Figura 41 – Perfil de temperatura em um ambiente controlado a aproximadamente 20°C com exaustor em 50%. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor

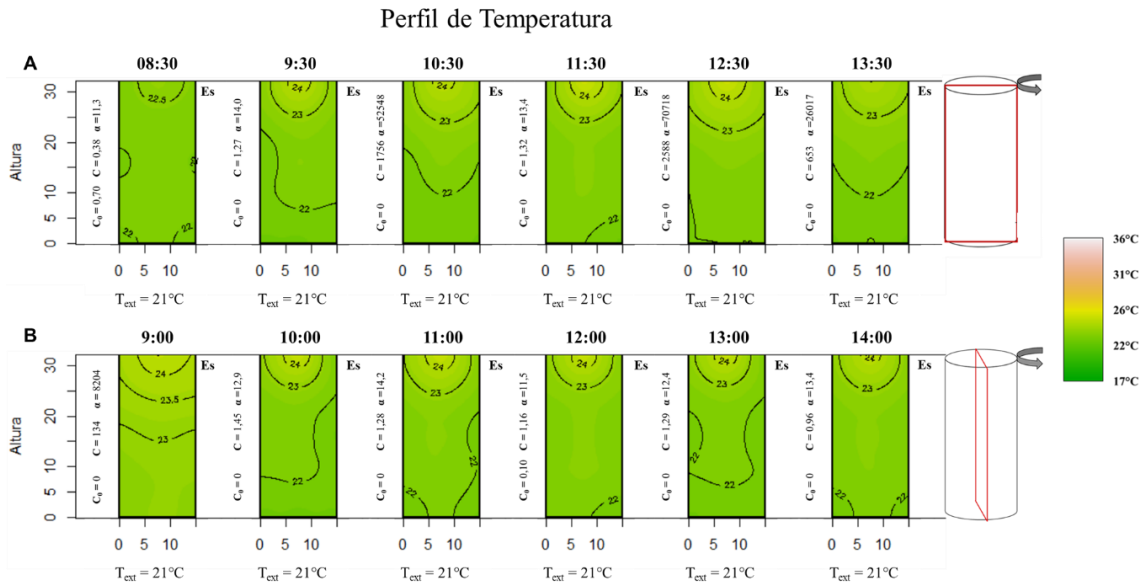
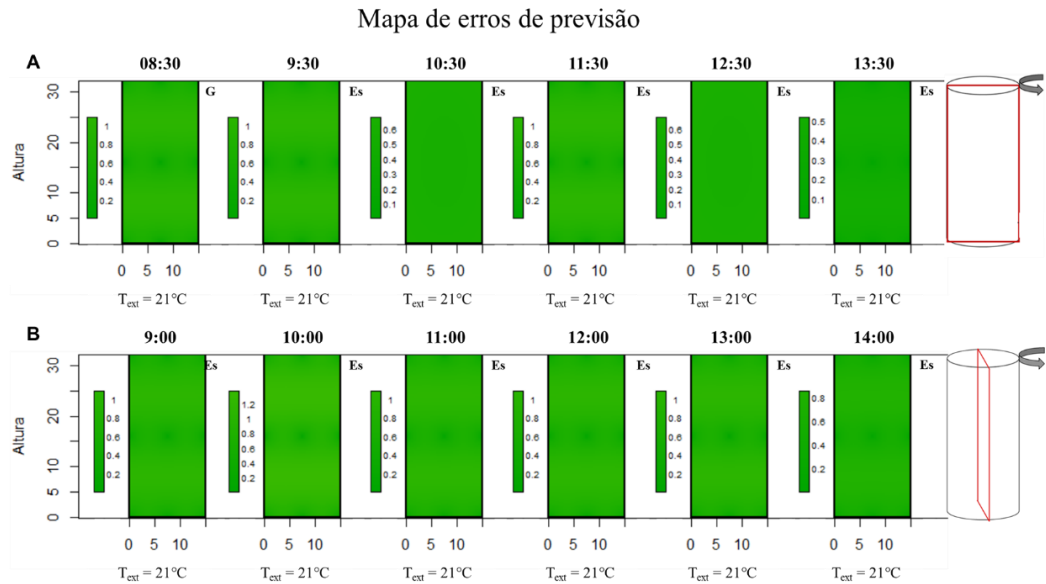


Figura 42 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em ambiente controlado com exaustão em 50%



O efeito do exaustor ligado na metade de sua capacidade máxima sobre o perfil de temperatura é muito semelhante quando ligado na sua máxima potência, com um aumento máximo de 3°C próximo da placa de luz (Figura 37 e Figura 41). O erro máximo é de 1,2°C.

C) Casa de vegetação

Os testes de arrefecimento também foram conduzidos em casa de vegetação com temperaturas entre 28 a 38°C, utilizando material refletor e revestimento interno. A Figura 43 mostra o perfil de temperatura em casa de vegetação com o exaustor ligado a máxima potência e a Figura 44 mostra o mapa de erros de previsão.

Figura 43 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em casa de vegetação com exaustão ligada a máxima potência, material refletor e revestimento interno. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor

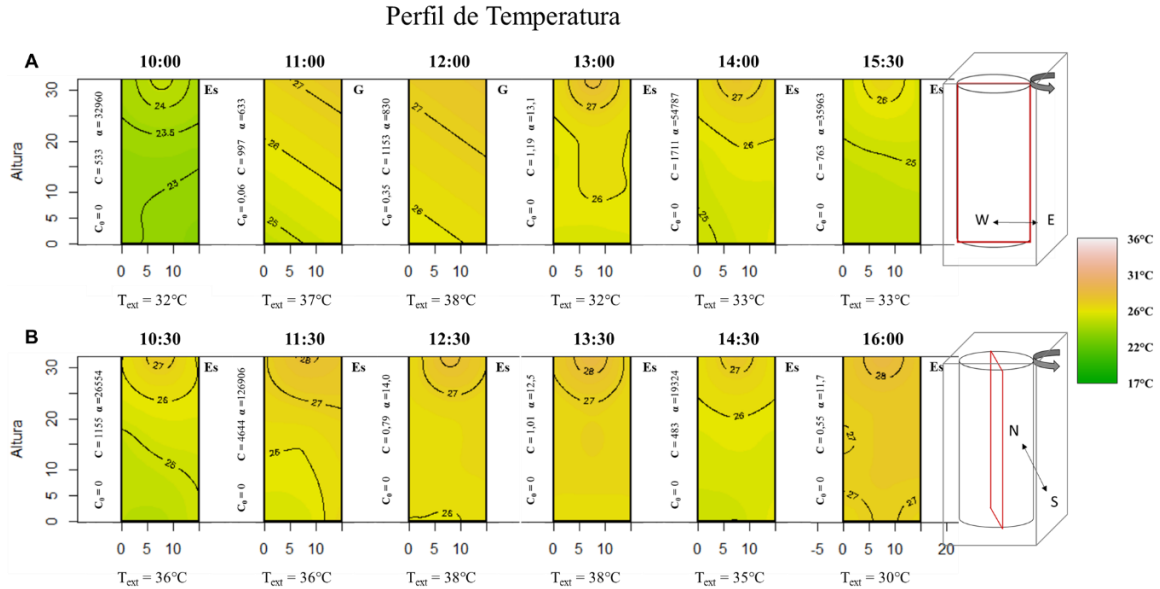
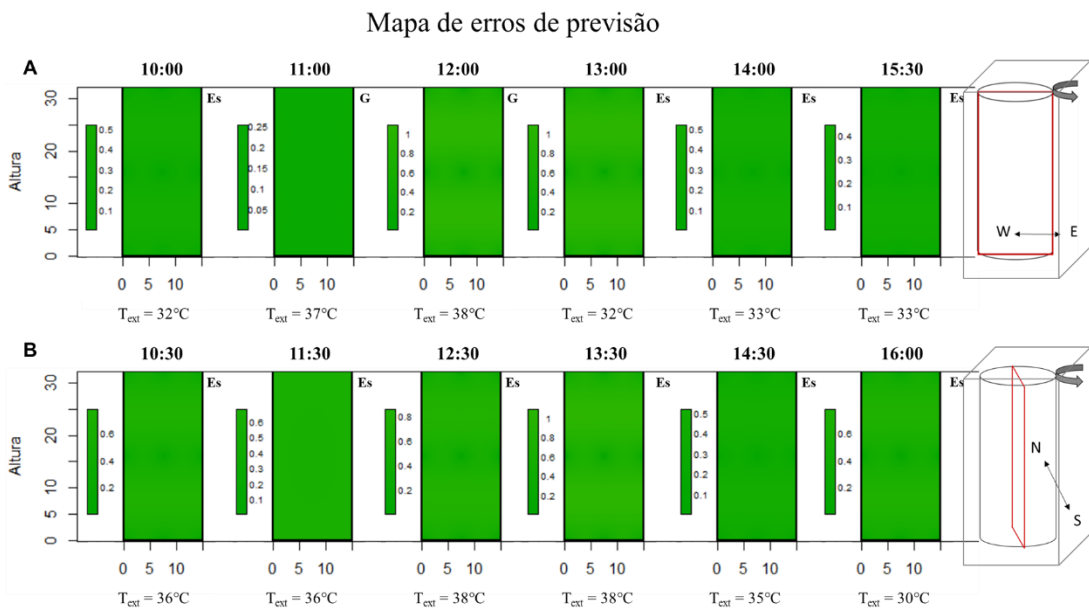


Figura 44 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com exaustor a máxima potência, material refletor e revestimento interno.



Assim como no ensaio anterior para a casa de vegetação com o uso da caixa refletora, porém sem o revestimento interno de alumínio, o perfil de temperatura não sofreu influência do movimento do sol e manteve uma temperatura mais amena que do ambiente externo. No

entanto, ao se comparar a Figura 35 e a Figura 43, tem-se que o revestimento interno manteve os perfis de temperatura mais homogêneos ao decorrer do dia, mesmo que as temperaturas externas tenham sido mais abruptas. O revestimento ainda se mostrou mais eficiente em manter temperaturas mais baixas, promovendo um delta de até 10°C em relação à temperatura externa. O erro de previsão foi de no máximo 1°C.

Mantendo as condições anteriores, desligou-se a exaustão. A Figura 45 traz o perfil de temperatura para o dispositivo em casa de vegetação com material refletor e revestimento interno, porém com a exaustão desligada. A Figura 46 mostra o mapa de previsão de erros.

Figura 45 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em casa de vegetação com exaustão desligada. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor

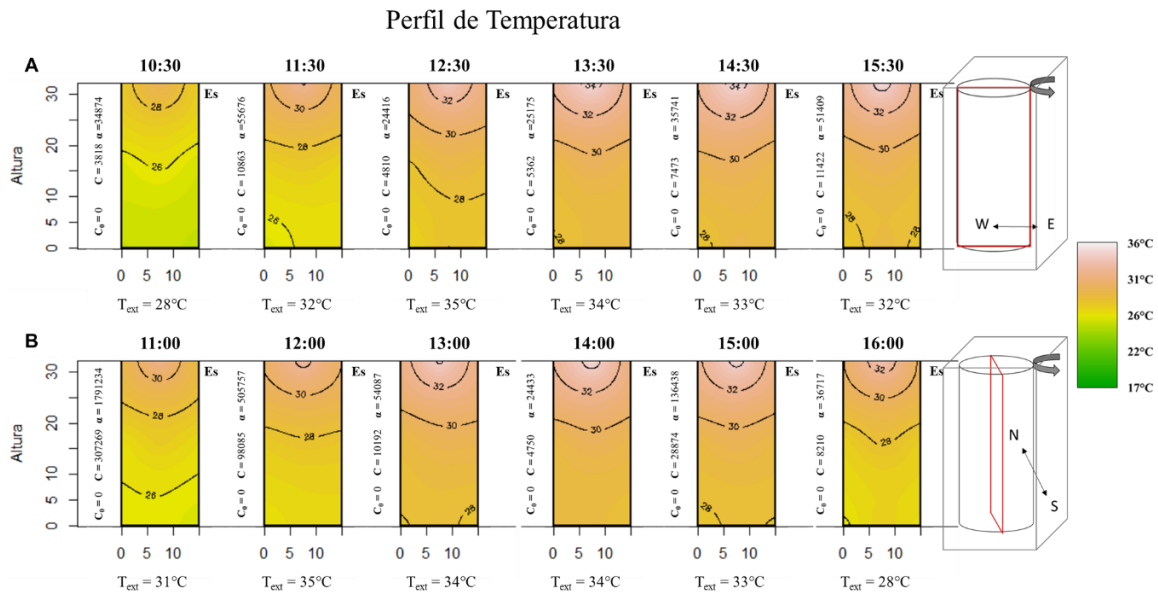
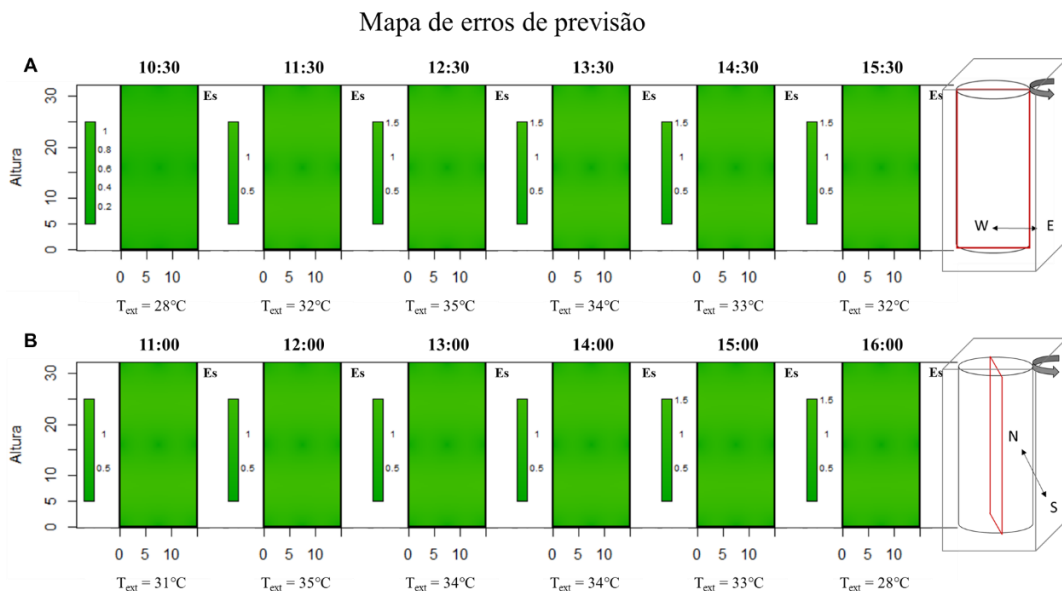


Figura 46 – Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura em casa de vegetação com exaustor desligado.



A ausência da exaustão implica em um gradiente muito acentuado de temperatura, aumentando na direção da placa de luz. Além disso, o efeito isolante promovido pelo material refletor não pode ser notado e a temperatura interna é muito próxima à temperatura externa. Comparado ao perfil de temperatura quando o sistema de exaustão está funcionando, Figura 43 e Figura 45, o arrefecimento é da ordem de 5°C, mesmo com o ambiente externo a uma maior temperatura. O erro de previsão chega a 1,5°C aproximadamente.

4.2.3. Caracterização dos estágios

A segunda versão do protótipo possui três diferentes estágios, a depender da posição da placa de luz e do sistema de iluminação lateral instalado. Assim, os testes de caracterização dos estágios investigaram como se comporta a temperatura no interior do dispositivo em cada um dos diferentes estágios. Para detalhes do funcionamento, ver item [Adaptação do Dispositivo](#) e para a metodologia, ver item [Investigação da temperatura](#).

O perfil de temperatura para o Estágio de crescimento 1 é apresentado na Figura 47. Para melhor visualização dos resultados, optou-se por cortes radiais em alturas diferentes do dispositivo. A Figura 48 traz o mapa de previsão de erros.

Nota-se que o perfil de temperatura é dinâmico e leva cerca de duas horas para se estabilizar. Em todos os estágios, o gradiente de temperatura foi radial com o centro a uma temperatura mais elevada que as bordas, porém apenas na Secção 2 essa diferença foi mais acentuada. Uma possível explicação é a presença da haste metálica, que possui alta condutividade térmica. A diferença máxima de temperatura para o meio externo é de 2, 4 e 1°C respectivamente para as Secções 1, 2 e 3 e o erro de previsão é na ordem de 2, 5 e 2°C.

O perfil de temperatura para o Estágio de crescimento 2 é apresentado na Figura 49, assim como seu respectivo mapa de erro é apresentado na Figura 50.

A temperatura média em cada uma das secções do Estágio 2 é mais elevada quando comparadas ao Estágio 1 (Figura 47 e Figura 49), chegando a temperaturas de 27, 30 e 27°C para as Secções 1, 2 e 3, respectivamente. O aumento da temperatura é explicado pela maior quantidade de luzes LED acesas, dissipando calor. A distribuição de temperatura também é radial, porém menos acentuada. O erro de previsão é aproximadamente 2, 3,5 e 2,5°C para cada secção.

A Figura 51 traz o perfil de temperatura característico do Estágio de crescimento 3. O mapa de erros de previsão é apresentado na Figura 52. Neste estágio, as máximas de

temperatura para cada secção é de 30, 30 e 27°C. A média de temperatura da Secção 1 apresentou um aumento comparado ao Estágio 2 (Figura 49 e Figura 51), explicado pela maior quantidade de luzes. Porém a Secção 3 permanece com a mesma temperatura, provavelmente pela posição da placa de luz próxima ao sistema de exaustão. O erro de previsão é de cerca de 2, 2 e 2,5°C para as respectivas secções.

4.2.4. Dinâmica da planta

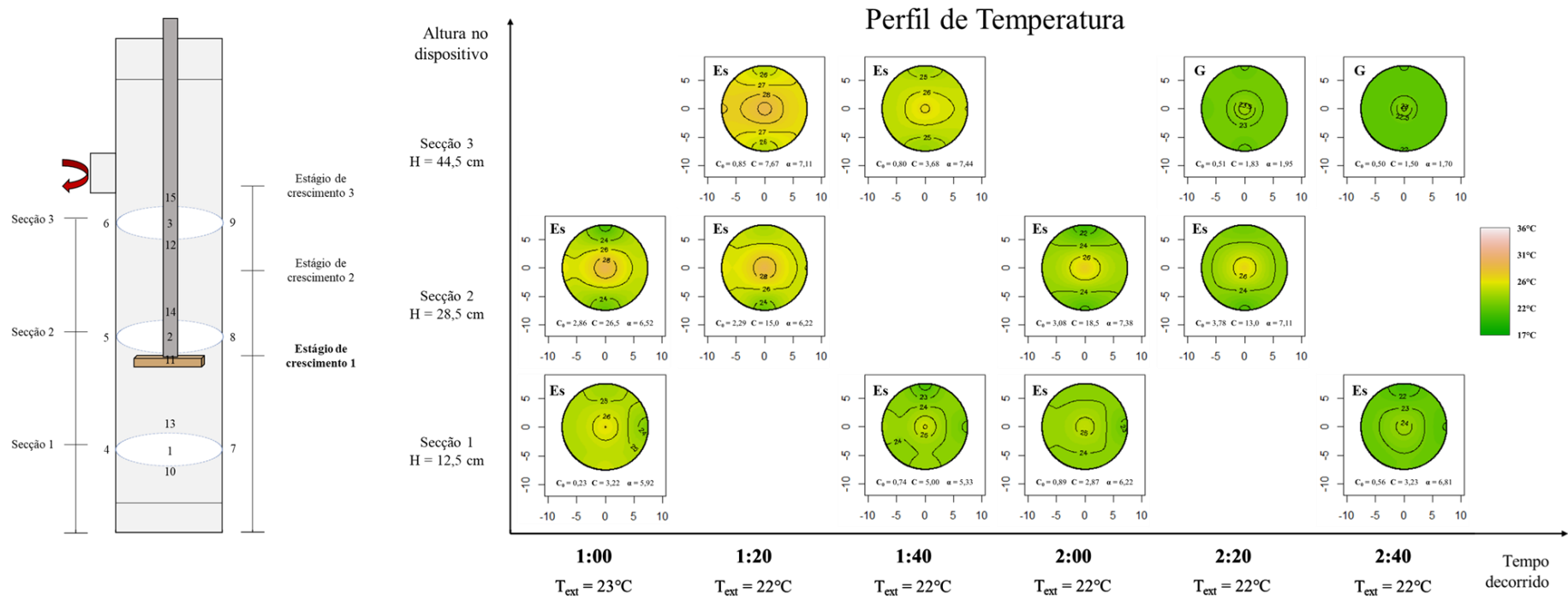
Os processos envolvendo as trocas gasosas em plantas (fotossíntese, respiração e transpiração), podem alterar a dinâmica do meio. Dada a escolha da *Arabidopsis* como planta modelo, investigou-se apenas o primeiro estágio, e as duas primeiras secções. Para detalhes da metodologia ver o item Caracterização dos perfis de temperatura.

Inicialmente, procedeu-se a caracterização do substrato apenas. O perfil de temperatura nesta condição é mostrado na Figura 53 e o mapa de erros de previsão na Figura 54.

O perfil de temperatura apresenta um gradiente radial, com temperaturas mais elevadas no centro. A temperatura média na primeira secção se manteve entre 23-24°C e na segunda próxima de 26°C. O erro de previsão associado é de aproximadamente 2 e 1,5°C, respectivamente.

A *Arabidopsis*, por ser uma planta rasteira no seu estágio vegetativo, ficará posicionada principalmente no centro da secção 1, que se encontra a 24°C. Esta temperatura está dentro da faixa ótima para esta planta.

Figura 47 – Perfil de temperatura nas diversas secções do dispositivo, mantido em ambiente controlado a 22°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento 1.



Legenda: Es – Esférico, Ex – Exponencial e G – Gaussiano (modelos geoestáticos). As variáveis de cada modelo são: C_0 , *nugget*; C , *still* e α , *range*.

Figura 48 - Mapa de erros de previsão para a caracterização do Estágio 1.

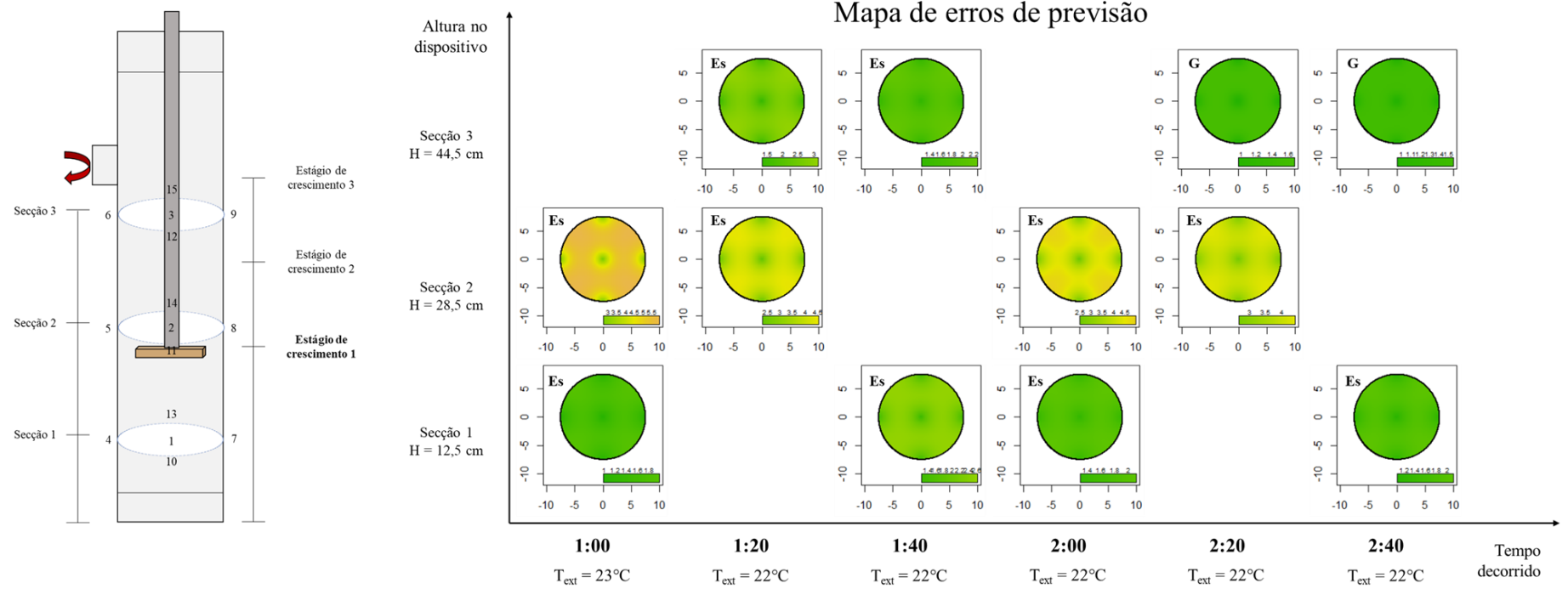


Figura 49 – Perfil de temperatura nas diversas secções do dispositivo, mantido em ambiente controlado a 22°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento 2.

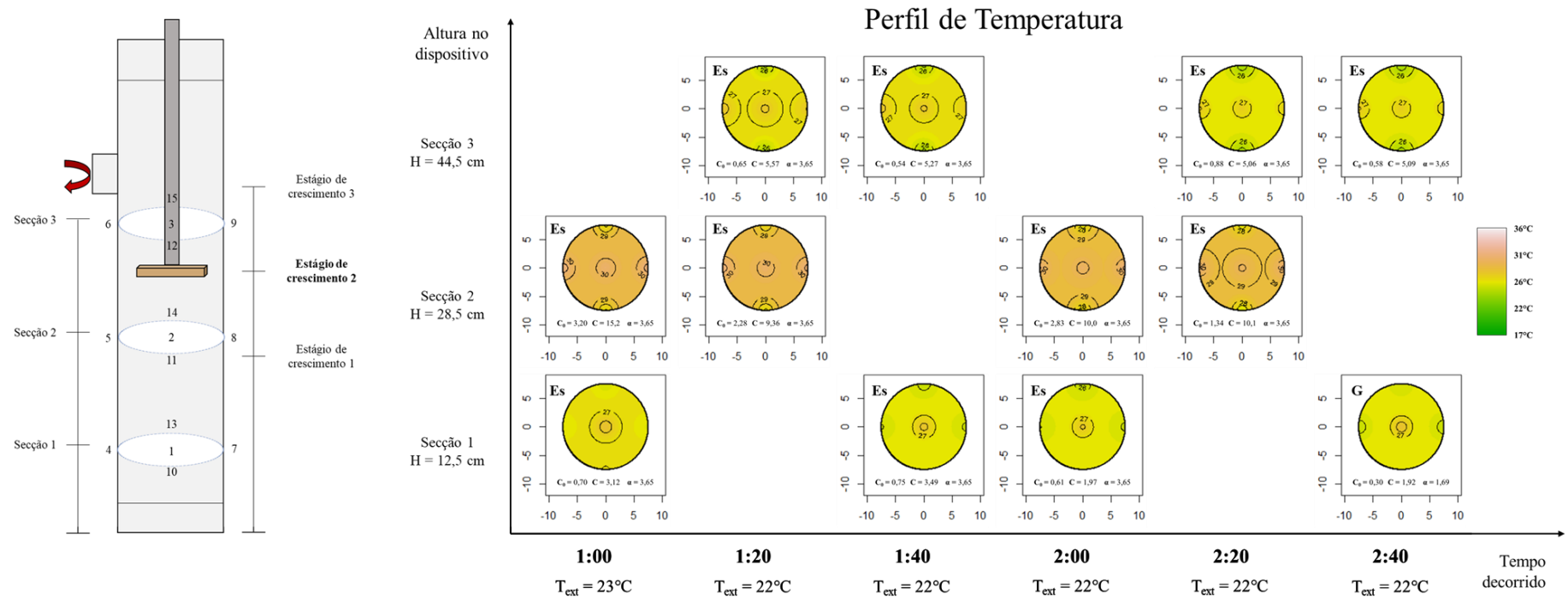


Figura 50 – Mapa de erros de previsão para a caracterização do Estágio 2.

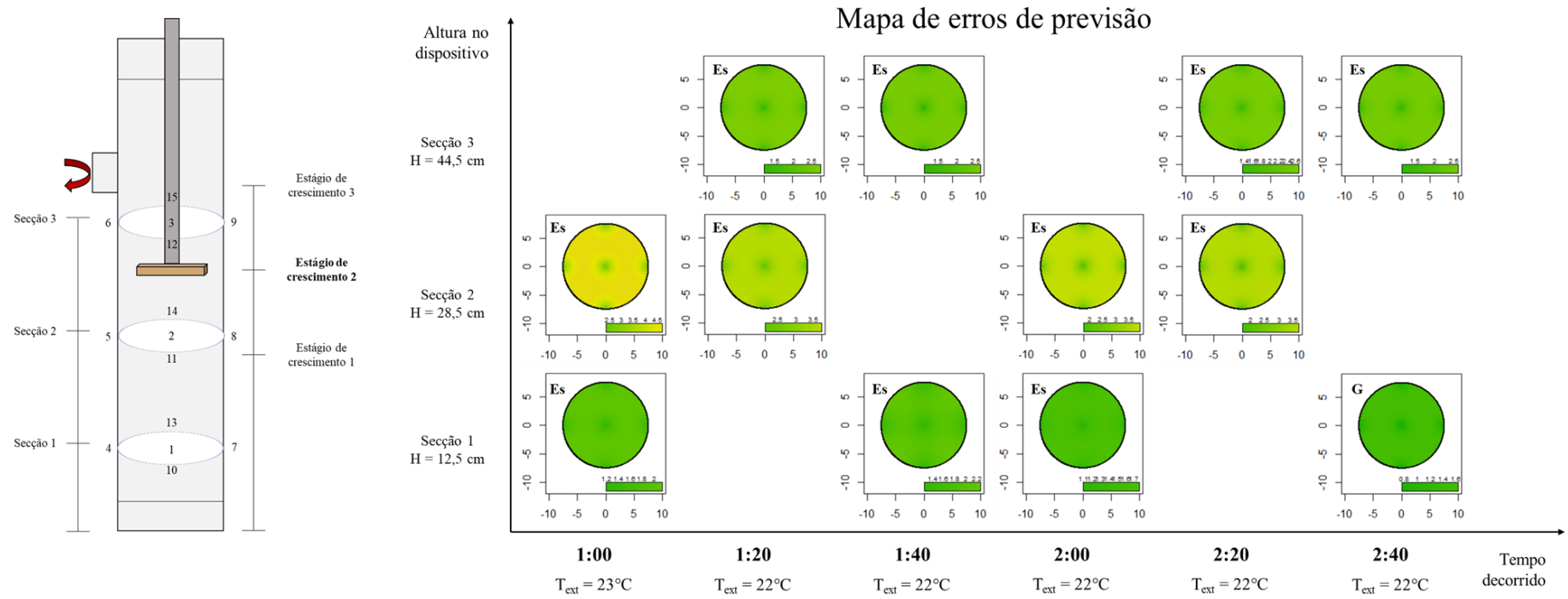


Figura 51 – Perfil de temperatura nas diversas secções do dispositivo, mantido em ambiente controlado a 22°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento 3.

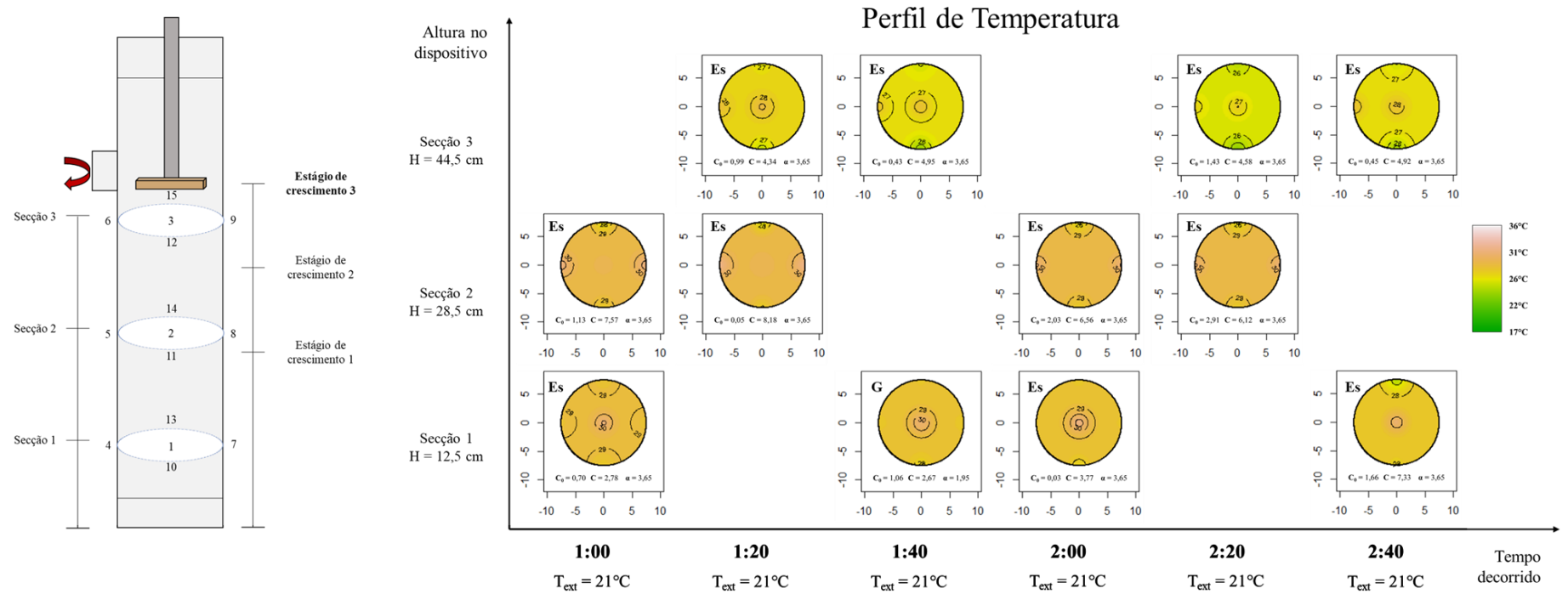


Figura 52 – Mapa de erros de previsão para a caracterização do Estágio 3

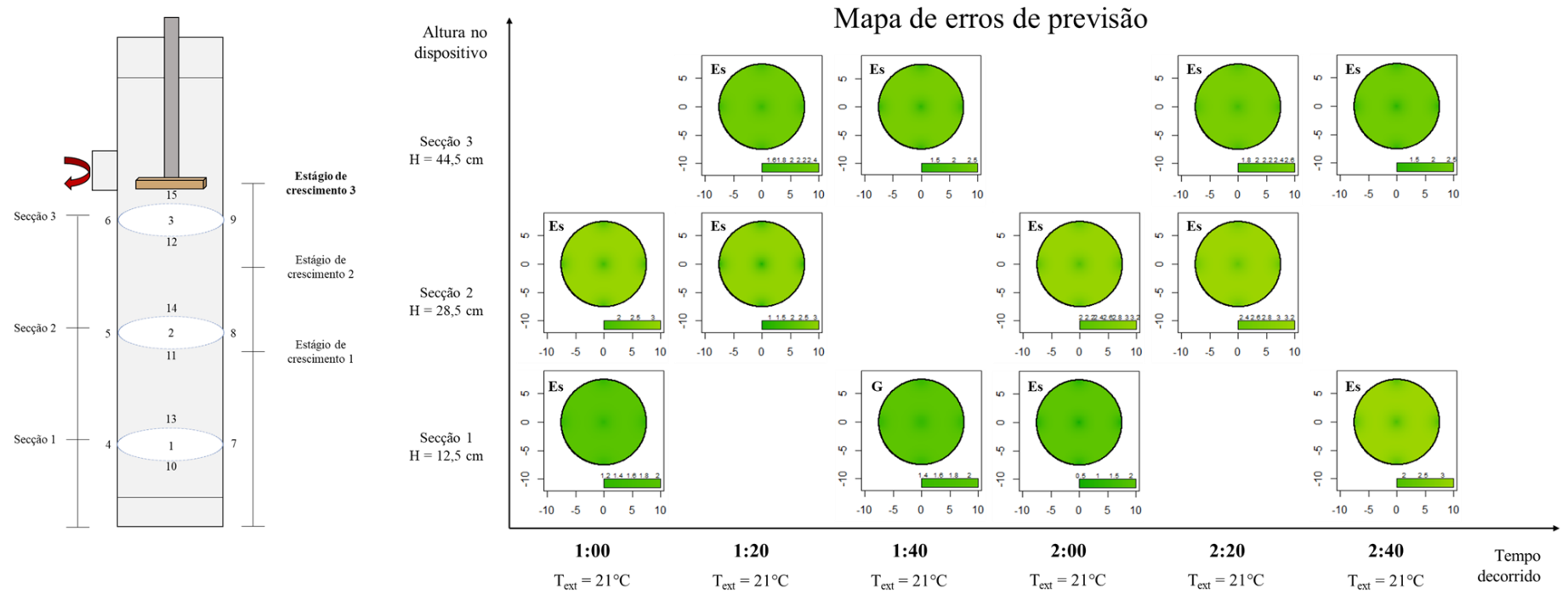


Figura 53 – Perfil de temperatura no dispositivo com substrato, mantido em ambiente controlado a 19°C, ao longo do tempo com a placa de luz posicionada no Estágio de crescimento 1.

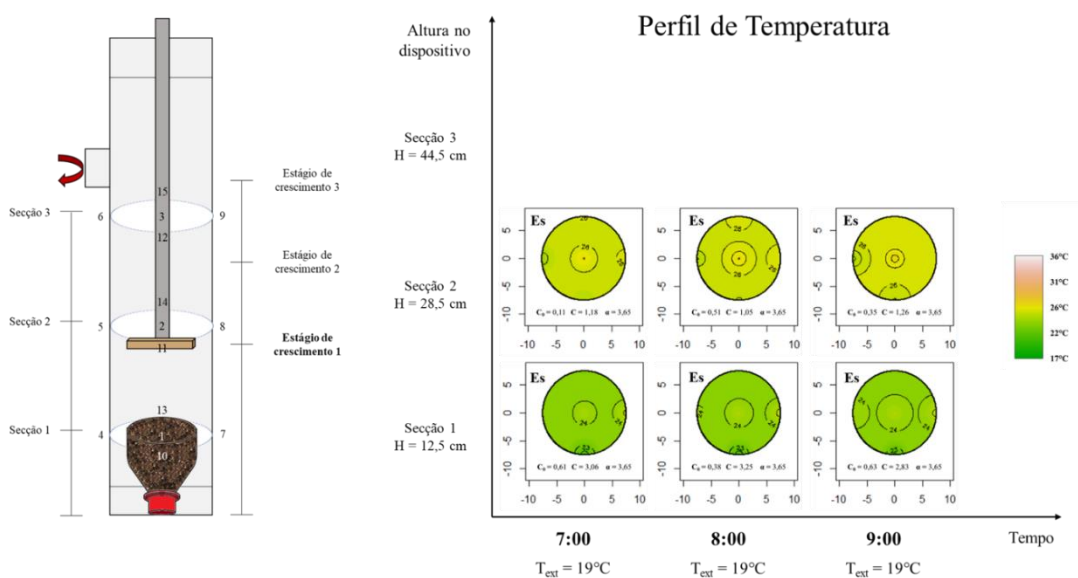
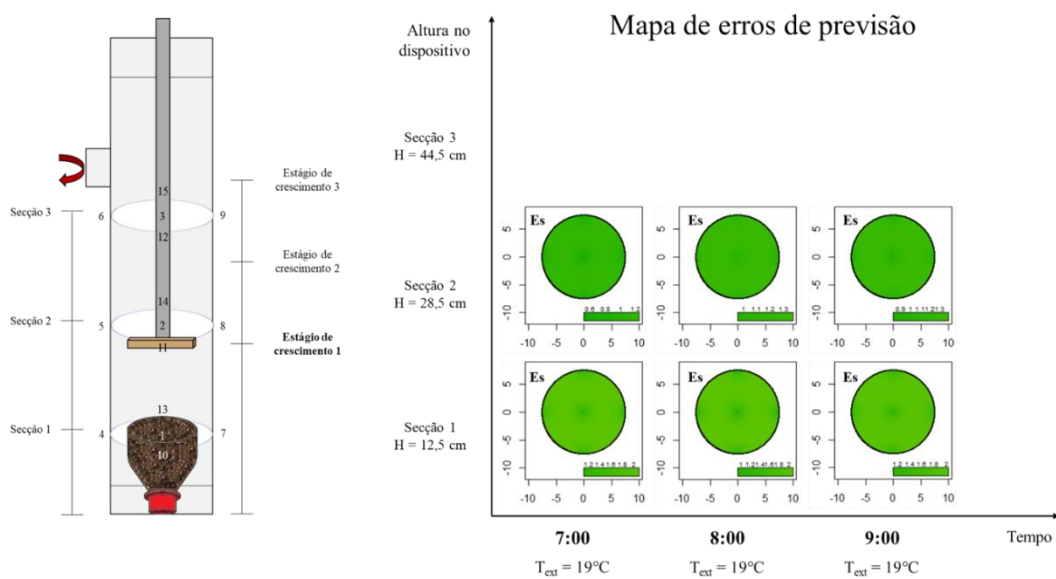


Figura 54 – Mapa de erros de previsão para dispositivo com substrato no Estágio de crescimento



Após o plantio, caracterizaram-se os perfis ao longo do desenvolvimento da planta. Apenas a segunda repetição foi considerada na determinação dos perfis de temperatura, devido a problemas na condução do primeiro experimento.

As imagens Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58 apresentam a sequência do perfil de temperatura diurno para os 18, 25, 32 e 39 dias após a semeadura. A Figura 59 traz os respectivos mapas de previsão de erros. O perfil de temperatura noturno é apresentado nos Anexos de Temperatura.

A primeira secção circular do dispositivo apresenta temperaturas médias aproximadas de 24, 23, 23 e 22°C para o decorrer dos dias, indicando uma tendência de diminuição da temperatura média. A segunda secção se mantém a aproximadamente 24°C.

O erro de previsão está em torno de 2°C.

Figura 55 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 18 dias da germinação.

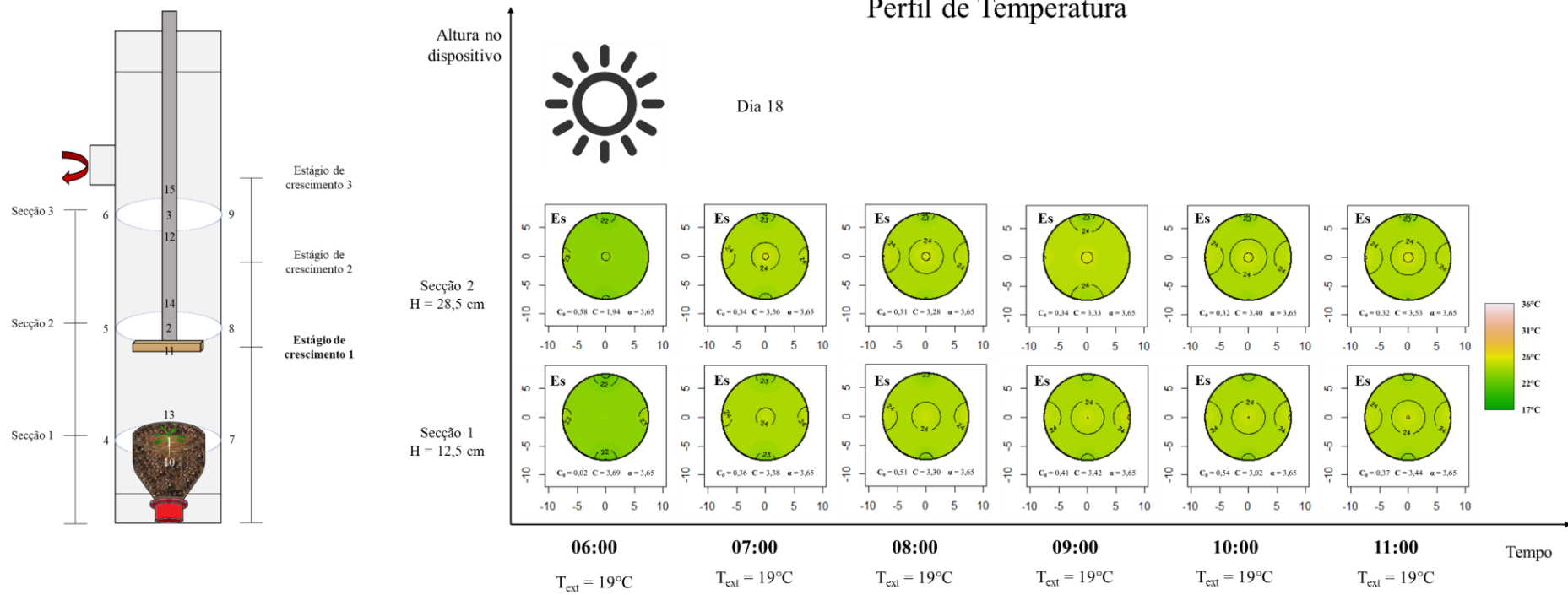


Figura 56 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 25 dias de germinação.

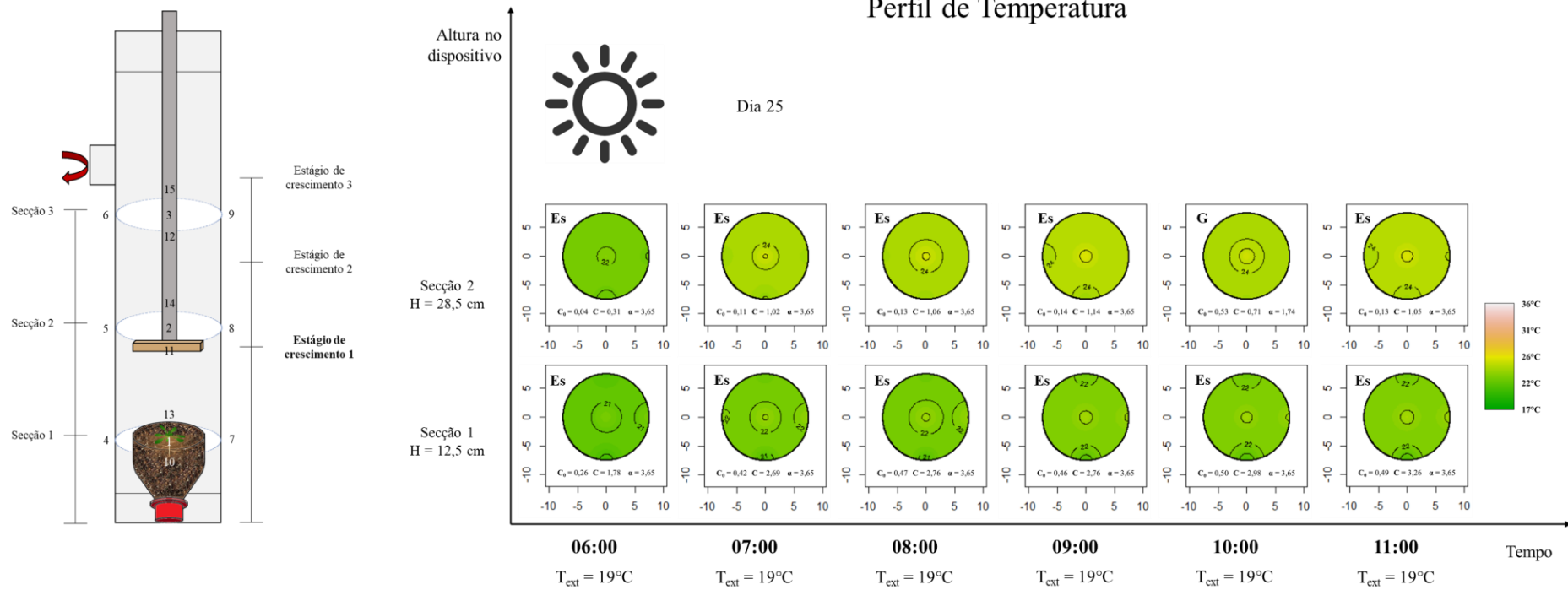


Figura 57 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 32 dias da germinação.

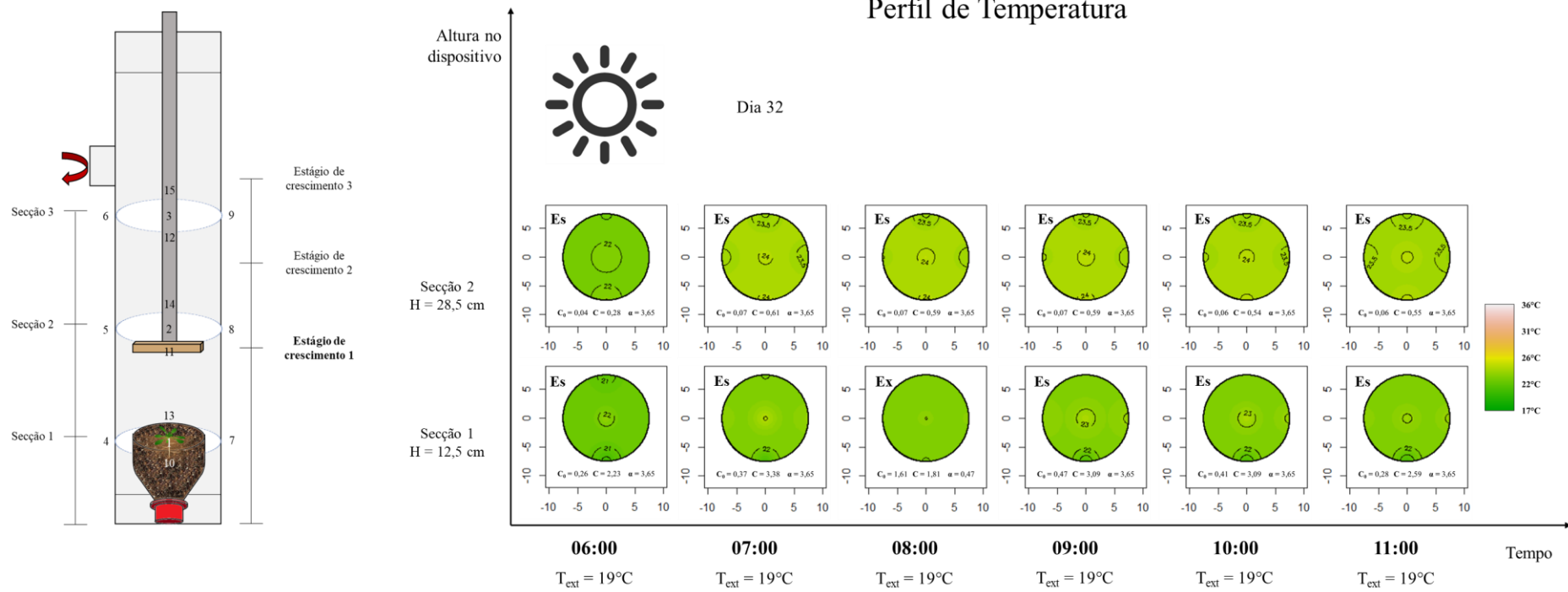


Figura 58 – Perfil de temperatura ao decorrer da manhã no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 19°C após 39 dias da germinação.

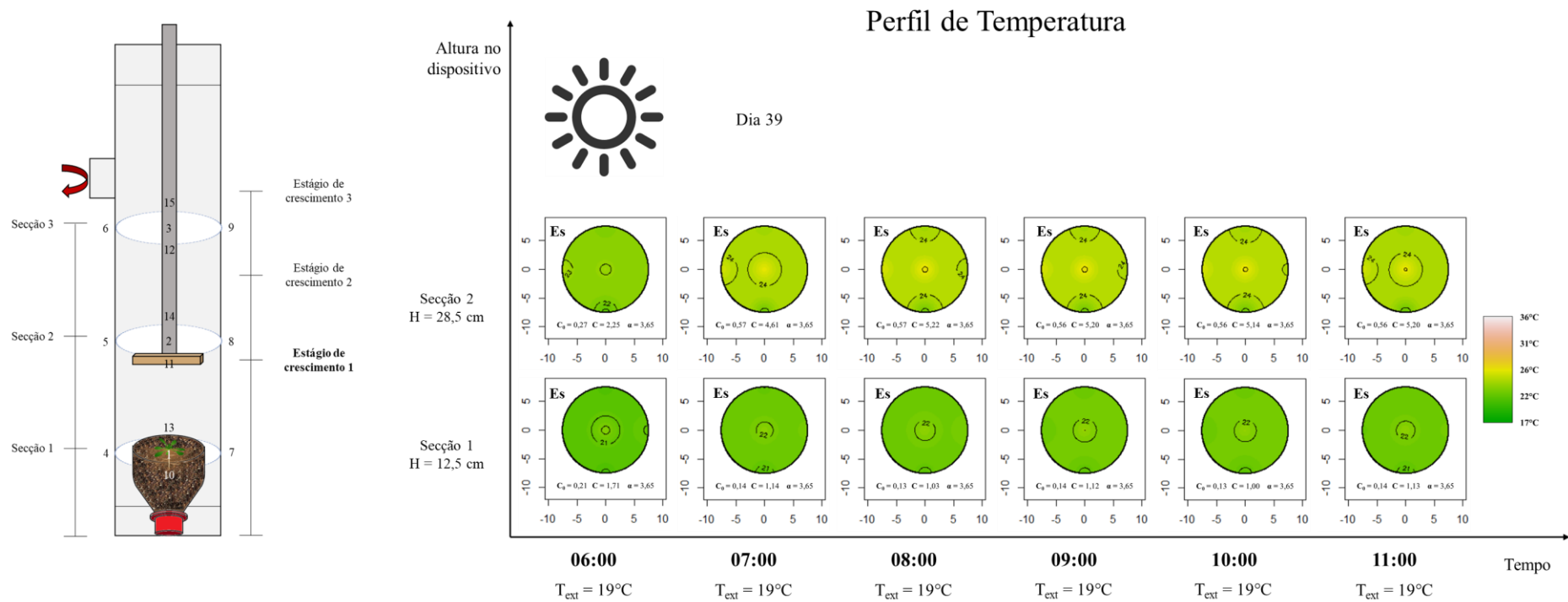
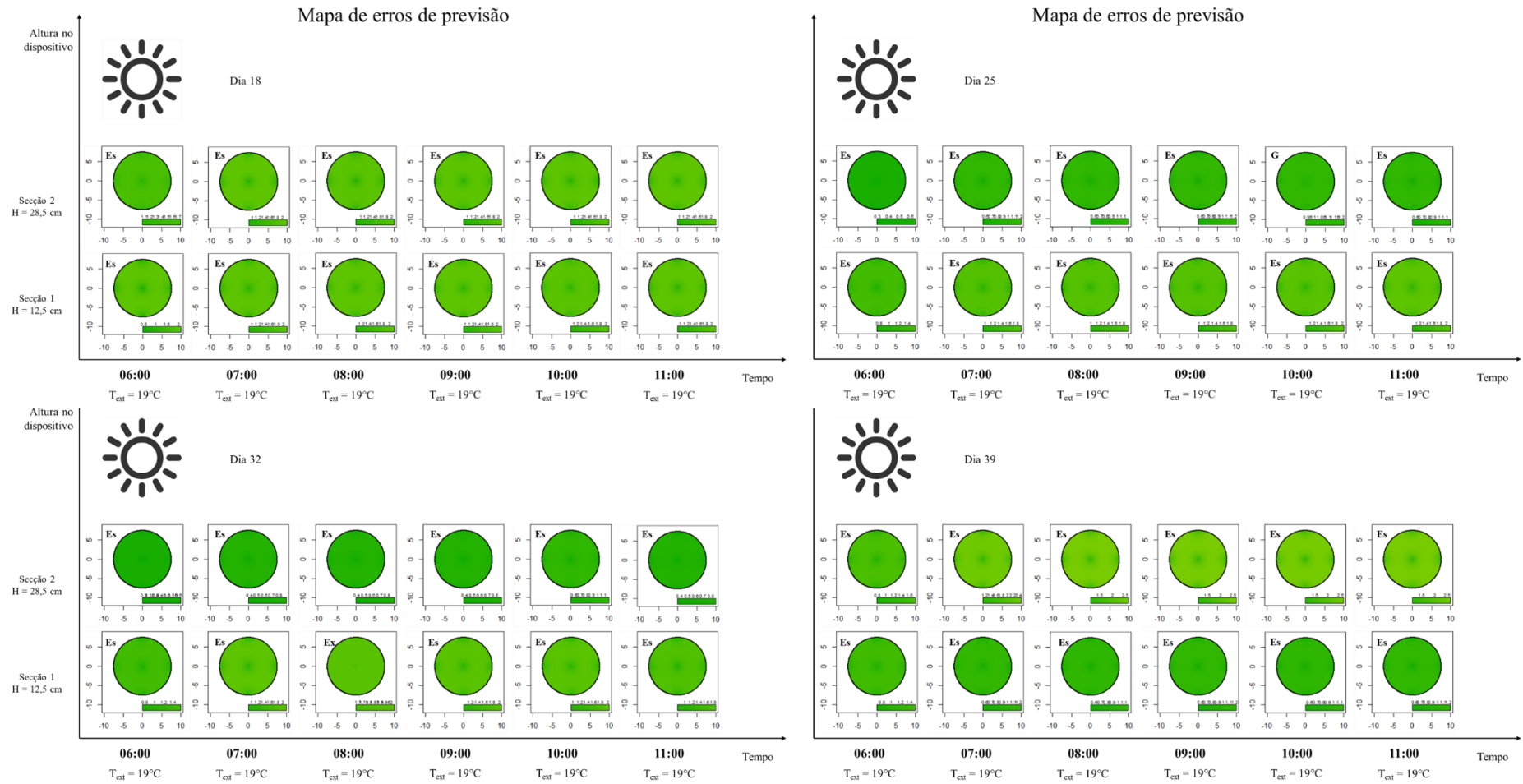


Figura 59 – Mapa de previsão de erros para os perfis de temperatura da manhã para os 18, 25, 32 e 39 dias após germinação.



4.3. Da planta

O objetivo final do dispositivo é o cultivo de plantas saudáveis e que estejam aptas a completar seu ciclo. Nesta seção, busca-se inferir através da área foliar e do aparecimento de estruturas reprodutivas como a planta cresce e se desenvolve ao longo do tempo no interior do protótipo. Para detalhes da metodologia ver o item Avaliação do crescimento.

A Tabela 10 apresenta os dados coletados para as duas repetições.

Tabela 10 – Área foliar e número de folhas ao longo do tempo

Tempo [dias]	Medida 1 [cm²]	Medida 2 [cm²]	Medida 3 [cm²]	Média [cm²]	Nº folhas
Planta 1					
14	0,55	-	-	0,55	2
18	2,37	-	-	2,37	4
21	4,38	4,16	4,12	4,22	6
25	12,08	11,21	10,81	11,37	8
Planta 2					
14	0,22	0,22	0,18	0,21	
18	0,47	0,42	0,38	0,42	2
21	0,96	0,94	0,87	0,92	3
25	2,22	2,09	1,93	2,01	5
28	5,13	4,70	4,23	4,69	8
32	7,60	7,40	6,83	7,28	9
39	30,21	27,05	26,83	28,03	13
43	43,82	42,65	41,20	42,56	15

Ressalta-se que não há dados suficientes para a primeira repetição, já que o experimento precisou ser interrompido devido a uma queda de energia de aproximadamente três horas no 23º dia, comprometendo o fotoperíodo imposto. Assim, os dados foram usados apenas para inferir tendências e confirmar observações.

De forma geral, as duas repetições resultaram em plantas sadias e propensas a produzirem flores. Os valores de área foliar atingidos foram de 11 e 43 cm², respectivamente. A primeira planta apresentou um crescimento mais rápido comparado à segunda planta e aos 25 dias após a germinação já era possível observar a invocação floral. A segunda planta concluiu sua fase vegetativa próxima dos 40 dias.

A Figura 60 e Figura 61 exemplificam o crescimento da primeira e segunda planta, respectivamente, através de imagens fotográficas tiradas em diferentes dias.

Figura 60 – Análise visual do crescimento da área foliar de Arabidopsis para a primeira repetição.

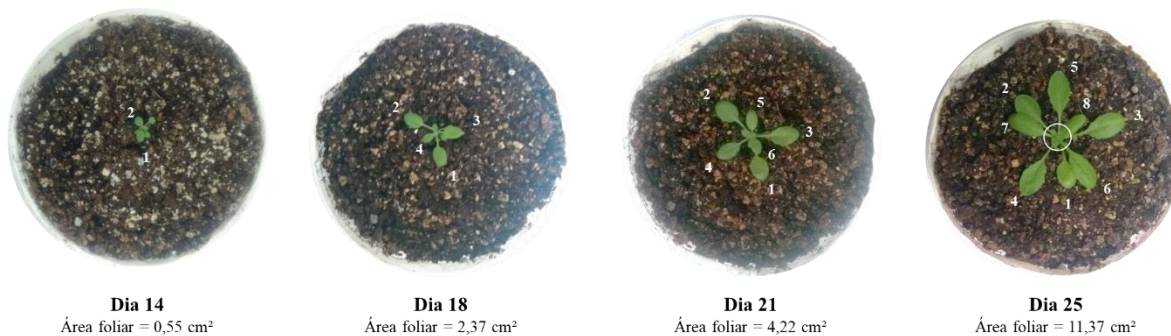
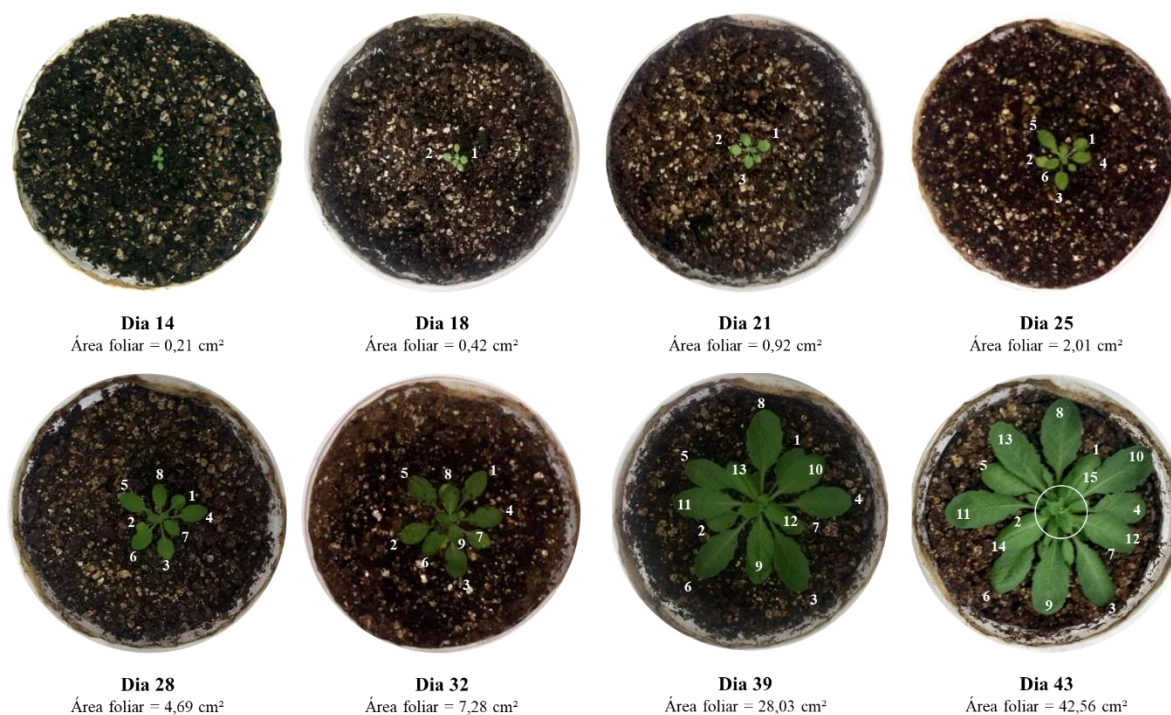


Figura 61 – Análise visual do crescimento da área foliar de Arabidopsis para a segunda repetição.



Os parâmetros de crescimento de planta, de forma geral, assim como muitos comportamentos da natureza, podem ser ajustados por uma sigmoide. As curvas sigmóides descrevem um crescimento inicial lento, seguido por uma fase de rápida expansão até atingir uma fase de estabilização (platô).

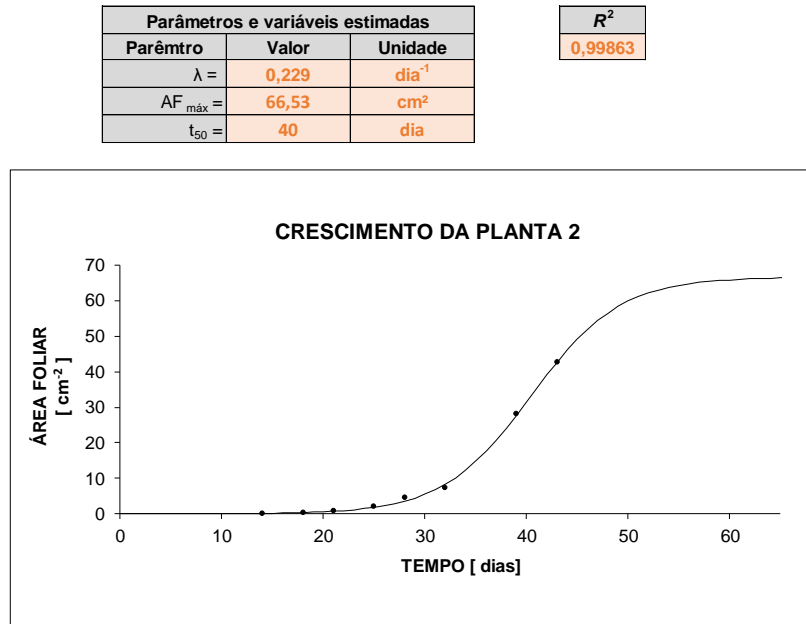
Assim, ajustaram-se os dados coletados para curvas sigmóides segundo a **Equação 8**.

$$AF = \frac{AF_{m\acute{a}x}}{1 - e^{-\lambda(t-t_{50})}} \quad \text{Equação 8}$$

O parâmetro AF é o valor medido da área foliar e $AF_{máx}$ representa o máximo teórico de área foliar. λ indica a velocidade de crescimento e tem unidade de $[\text{tempo}^{-1}]$, t_{50} é o tempo necessário para atingir metade da máxima área foliar e t é o tempo decorrido da análise.

As Figura 62 mostra o ajuste da área foliar ao longo do tempo para a segunda repetição.

Figura 62 – Ajuste sigmoidal do crescimento da área foliar para a segunda planta cultivada no dispositivo.



O ajuste se mostrou adequado com valor de R^2 de 0,999. O parâmetro da velocidade, relacionado à inclinação da curva, foi de $0,229 \text{ cm}^2\text{dia}^{-1}$. A área foliar máxima teórica é de 67 cm^2 e o tempo necessário para a planta atingir metade dessa área foliar é de aproximadamente 40 dias.

5. DISCUSSÃO

5.1. Análise do material

A escolha do material deve recair principalmente na adequação para desempenhar sua função. Para um dispositivo de cultivo de plantas, é necessário um material rígido, resistente, durável e não inflamável. Outras características desejáveis recaem sobre o custo e a estética do produto.

Na máquina de cultivo da Seven Sensors (<http://www.7sensors.com/>), utiliza-se vidro em sua estrutura. Esse tipo de construção tem um grande apelo comercial, já que permite a visualização em tempo real do processo do crescimento da planta. Porém o uso em ambientes externos, com alto incidência solar, poderia ser restrito, uma vez que o vidro pode gerar um efeito estufa indesejável no interior do equipamento (ANAVIDRO, 2013). Além disso, como não se controla a quantidade e a qualidade da radiação externa que chega à planta, o desenvolvimento de programas de controles específicos para atender às necessidades particulares de cada espécie é dificultado.

O dispositivo da Seedo (seedolab.com), por sua vez, é feito de lâminas de aço com acabamento em tinta branca. O aço confere leveza e resistência ao produto (FOGAÇA) e a tinta branca, além de evitar a corrosão do material, pode servir como uma película refletora (HAUS, 2014). Este tipo de construção é, no entanto, de maior custo.

O produto escolhido para as primeiras versões do protótipo foi o policloreto de vinila, popularmente conhecido como PVC. Seu módulo de elasticidade é superior aos plásticos mais comuns, polietileno e polipropileno, conferindo maior rigidez à sua estrutura. Além disso, sua composição de cloro e eteno torna o material pouco inflamável (RODOLFO JR, 2006). A temperatura de transição vítrea (“amolecimento”) se encontra entre 60 a 80°C, a depender do método de polimerização (HARPER, 2002), indicando que o produto pode ficar exposto ao sol sem muitos problemas. É ainda considerado um material de baixo custo e longa vida útil (INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC, 2013).

Para os testes de temperatura, o PVC se mostrou indicado, porém com algumas ressalvas. O material promoveu um pequeno isolamento térmico quando exposto ao sol (Figura 31 e Figura 33), mantendo temperaturas mais amenas no interior do dispositivo e permanecendo quase constante mesmo quando o ambiente externo começa a esfriar. Todavia, o efeito da irradiação direta foi perceptível e poderia restringir o uso do equipamento em varandas e quintais, por exemplo. Já a janela de plástico transparente, à base de polipropileno, foi

reprovada nos testes. A incidência de radiação direta foi capaz de provocar bolsões de calor (Figura 31), o que não aconteceu ao rotacionar a posição da janela (Figura 33) ou ao refletir a irradiação (Figura 35).

Assim, a segunda versão do protótipo contou com uma película refletora de alumínio. Este material possui alta reflexividade ótica, sendo que aproximadamente 70% da energia eletromagnética incidente é refletida (BARBALACE, 1995). Na parte externa, além de conferir uma estética mais agradável, devido às características especulares, a película refletora tem a função de mitigar os efeitos da radiação direta e promover um isolamento térmico mais eficiente, como foi observado com o uso da caixa refletora (Figura 35). O uso do alumínio na parte interna do equipamento se justifica para concentrar a radiação proveniente da placa de luz, como nos modelos da ProBox (growplant.com.br). Esse efeito pode ser visto na comparação da Tabela 6 e Tabela 7.

5.2. Sistema de arrefecimento

A temperatura é uma das variáveis mais importante de ser mensurada e controlada, devido à sua influência nas funções metabólicas das plantas. A estratégia para a manutenção de temperaturas mais amenas no protótipo foi a adoção de um sistema de arrefecimento por exaustão do ar (TERUEL, 2010). Devido ao clima tropical da região, não se considerou um sistema de aquecimento para o protótipo.

No interior do dispositivo, os LEDs são considerados fontes emissoras de calor, mesmo que essas lâmpadas possuam alta eficiência. A energia térmica emitida pelos LEDs resulta em temperaturas mais elevadas próximas à fonte, assim gerando gradientes de temperatura consideráveis no interior do protótipo (Figura 39 – Perfil de temperatura ao longo do tempo em um ambiente controlado a aproximadamente 20°C com exaustor desligado. A) Secção versal ao exaustor; B) Secção paralela ao exaustor). Esse gradiente de temperatura é indesejável, já que pequenas diferenças de temperatura dos órgãos podem fazer grandes diferenças sobre taxas fotossintéticas, respiratórias e outras atividades bioquímicas, podendo significar alterações fisiológicas, morfológicas e anatômicas (TRIBUZY, 2005).

O acionamento do exaustor se mostrou eficiente para reduzir o gradiente de temperatura e concentrar as temperaturas mais elevadas bem próximo da fonte luminosa (Figura 37). Dessa forma, mantendo o ápice da planta a uma distância segura das lâmpadas, não haveria diferenças de temperatura na parte aérea. Mesmo a uma potência reduzida, de 50% da sua capacidade, o exaustor foi capaz de dissipar parte do calor para a parte externa (Figura 41). Este fato é

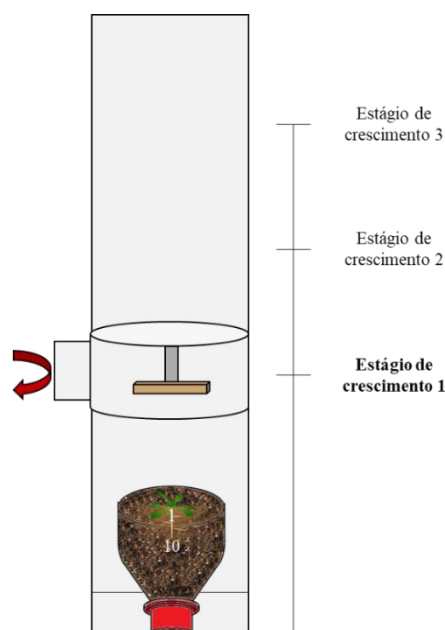
interessante, pois aumentando a velocidade de ventilação (exaustão) reduz o gradiente de temperatura, porém intensifica a transpiração da planta e pode contribuir para o estresse hídrico, caso o suprimento de água não seja suficiente. Assim, a regulação da velocidade do exaustor no interior do dispositivo requer o conhecimento dos máximos em termos da temperatura do ar e das taxas transpiratórias para evitar o fechamento estomático (KITTA, BARTZANAS e JAFFRIN, 2003).

O sistema de arrefecimento, combinado com a reflexão da radiação externa, se mostrou adequado para ambientes com temperaturas extremas, mantendo a temperatura interna próxima de 27°C quando o ambiente externo era de 38°C (Figura 44). Porém, para um controle mais eficiente da temperatura é interessante o estudo de trocadores de calor.

No caso do sistema de iluminação por estágios, nota-se que no Estágio 3, a secção 3 apresenta temperaturas mais amenas que a secção 2, mesmo que a fonte de luz esteja posicionada mais próxima daquela que desta (Figura 51). Este fato pode ser explicado justamente pelo sistema de arrefecimento, pois o exaustor se encontra mais próximo da secção 3, o que facilita a dissipação de calor.

Assim, sugere-se um sistema de arrefecimento também por estágio, associado à própria placa de luz. Outra ideia é restringir a troca de calor por convecção do ar, usando materiais que permitam a passagem da radiação, mas não sejam bons condutores, por exemplo, plásticos, acrílicos e vidros transparentes. Este novo sistema de arrefecimento poderia funcionar como uma espécie de gaveta modular, como na ilustração da Figura 63.

Figura 63 – Sugestão de novo sistema de arrefecimento modular e por estágios

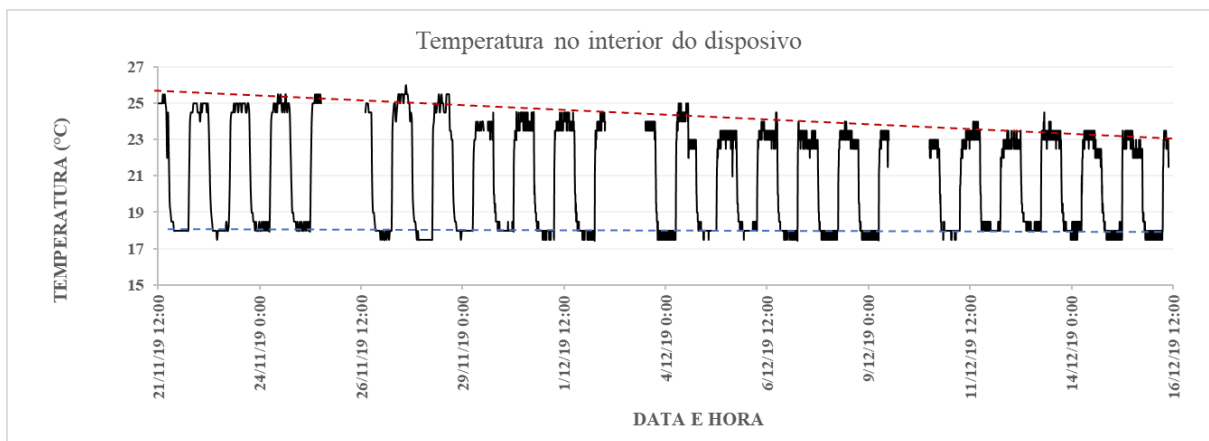


5.3. Efeito da transpiração

A assimilação de dióxido de carbono durante a fotossíntese é acompanhada por um efluxo de água pelos estômatos, em um processo conhecido como transpiração. Essa perda de água é responsável por diminuir a temperatura foliar, mantendo níveis de temperatura adequados para a manutenção dos processos biológicos na folha. De maneira geral, as taxas transpiratórias aumentam com o aumento da área foliar, já que isso representa uma maior superfície de trocas gasosas (NOBEL, 2009; ANGELOCCI, 2002).

Os perfis de temperatura gerados ao longo dos dias (Figura 55 a Figura 58) mostraram uma tendência de diminuição da temperatura no interior do dispositivo à medida que a planta se expandia. A Figura 64 apresenta o monitoramento da temperatura interna por um termosensor posicionado na altura da planta.

Figura 64 – Monitoramento da temperatura no interior do dispositivo, mostrando a oscilação dia-noite.



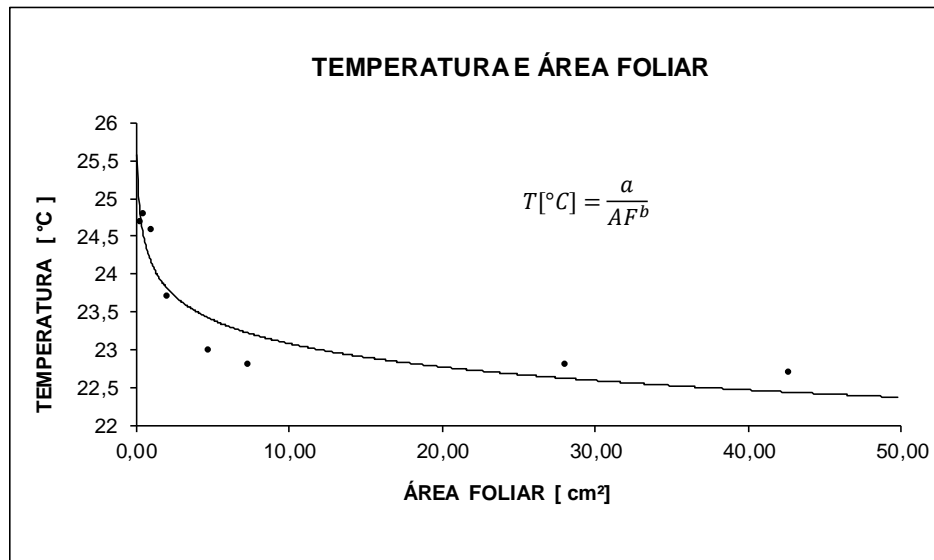
Nota-se que o patamar da temperatura diurna sofreu uma ligeira queda, passando de 26°C a 23°C, aproximadamente, enquanto a temperatura noturna manteve-se constante. Especula-se que a redução da temperatura diurna esteja associada ao aumento das taxas de transpiração, em um processo de resfriamento similar ao de um climatizador evaporativo: o ar externo, seco e quente, é puxado pela força da exaustão, passando pelas folhas, onde absorve umidade e tem sua temperatura reduzida pela evaporação da água, resultando em um ar mais úmido e frio que o ar externo.

A Figura 65 mostra a relação entre a temperatura interna e a área foliar. A análise do gráfico sugere que a diminuição da temperatura associada à transpiração da planta é limitada, onde a partir de uma determinada área foliar, as taxas de transpiração não contribuem mais significativamente para a diminuição da temperatura. Esta observação é razoável à medida que

há uma resistência à passagem da água para o ar com o aumento da umidade. Para climatizadores, por exemplo, uma umidade relativa maior que 40% já afeta a sua efetividade (VERPLOEGEN, RINKER e OGNAKOSSAN, 2018).

Figura 65 – Relação entre a temperatura média diurna (T) e a área foliar da planta (AF).

Parâmetro	Valor	R^2
b =	0,019	0,87778
a =	24,13	



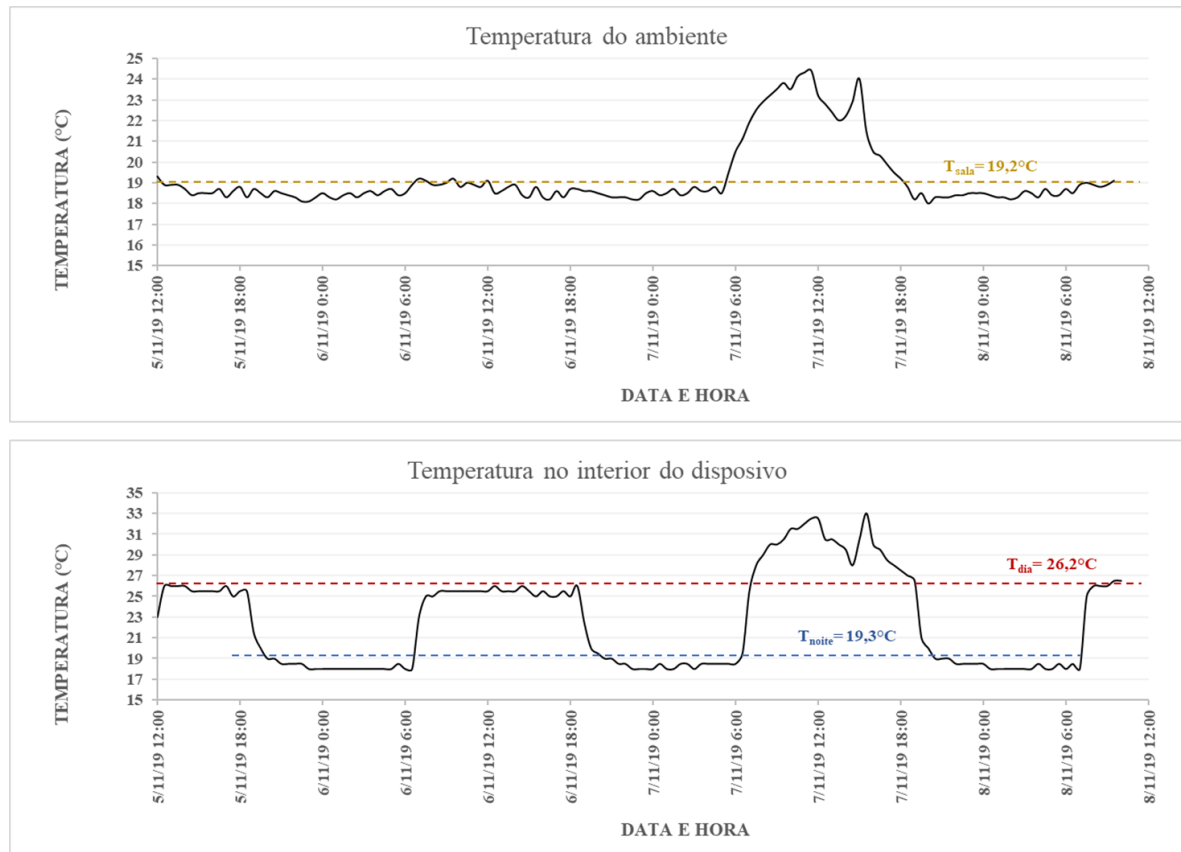
Para o controle da temperatura, então, deve-se considerar o efeito inicial da diminuição de temperatura pelo aumento das taxas transpiratórias.

5.4. Análise fenológica

O monitoramento da fenologia é uma importante ferramenta para compreender a relação entre as condições de cultivo e a saúde e produtividade do vegetal (referência).

A primeira e a segunda repetição do cultivo de *Arabidopsis* apresentaram resultados sensivelmente diferentes (Figura 60 e Figura 61). A repetição 1 apresentou menor área foliar e teve o seu ciclo reprodutivo acelerado, quando comparada à repetição 2. O comportamento apresentado pode estar relacionado a diferenças nas condições de cultivo. Isso porque durante a execução do primeiro ensaio, houve falhas no fornecimento de energia elétrica, o que suspendeu a radiação por cerca de três horas. Além disso, o condicionamento do ambiente só voltou ao funcionamento regular após quase 6 horas, resultando em altas temperaturas. A Figura 66 apresenta o monitoramento da temperatura durante o episódio.

Figura 66 – Consequências da interrupção do serviço de energia elétrica na temperatura ambiente e no interior do protótipo durante a condução do primeiro ensaio com a planta.



O aumento da temperatura é um acelerador do desenvolvimento vegetal, adiantando a observação de uma determinada fase fenológica, como o florescimento (CÂMARA, 2006). Mais especificamente, para *Arabidopsis*, um aumento brando na temperatura de crescimento, de 23°C para 27°C , por exemplo, pode ser igualmente eficiente na indução do florescimento que o uso de fotoperíodo de 16 horas, considerando se tratar de uma planta de dia longo (LDP – do inglês, *long day plants*) (BALASUBRAMANIAN, SURESHKUMAR, *et al.*, 2006).

Além disso, a interrupção no fornecimento da radiação é um indutor do florescimento para LDP consideradas luz-dominante, como a *Arabidopsis*. Para essa classe particular de resposta ao fotoperíodo, uma quebra do período contínuo de luz representa uma “noite curta”, induzindo a mudança para a fase reprodutiva (LAGERCRANTZ, 2009; THOMAS, 2006).

Embora a queda de energia não tenha sido intencional, esta revelou o potencial do dispositivo para estudos acadêmicos relacionados à fisiologia vegetal, como a influência da quantidade, qualidade e duração da luz no florescimento ou da influência da temperatura nas fases fenológicas, a um custo mais acessível que das câmaras de crescimento atual.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou que é factível a construção de um dispositivo de cultivo de plantas com um bom controle do ambiente, em especial da temperatura e da intensidade e qualidade da luz. Além disso, os custos para a construção são baixos, como indicado na Tabela 11, totalizando pouco mais de R\$400,00 e com possibilidade de otimização de gastos e custos.

Tabela 11 – Análise de custo da segunda versão do protótipo

Material	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Tubo de PVC	1 m	1	R\$ 62,99	R\$ 62,99
Tampa	un.	2	R\$ 23,99	R\$ 47,98
Haste metálica	un.	1	R\$ 5,02	R\$ 5,02
Porca sextavada	un.	2	R\$ 5,19	R\$ 10,38
Cooler	un.	1	R\$ 8,90	R\$ 8,90
Tiras de LED	1 m	3	R\$ 14,21	R\$ 42,63
Fitas de LED aquário	0,50 m	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
MDF*	-	1	R\$ 13,00	R\$ 13,00
Arduíno uno	un.	1	R\$ 54,90	R\$ 54,90
Mini-protoboard	un.	1	R\$ 7,90	R\$ 7,90
Potenciômetros	un.	4	R\$ 1,90	R\$ 7,60
Jumpers	10 peças	3	R\$ 8,90	R\$ 26,70
Mosfet	un.	4	R\$ 5,90	R\$ 23,60
Fita adesiva alumínio	3 m	1	R\$ 27,90	R\$ 27,90
Cola quente	6 bastões	1	R\$ 9,90	R\$ 9,90
Outros	-	-	-	R\$ 50,00
Total	-	-	-	R\$ 419,40

A planta modelo utilizada cresceu sadia e atingiu a fase reprodutiva, demonstrando a efetividade do protótipo. Assim, com mais estudos e resolvendo os problemas encontrados, é possível chegar a um dispositivo de cultivo semi-automatizado, que facilite o cultivo em meios urbanos, eliminando a necessidade de tempo e conhecimento para se plantar.

O equipamento se mostrou também eficiente para a condução de experimentos de fisiologia vegetal, em que se variam as condições de cultivo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. C. **Sistema Eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudos de Fisiologia Vegetal**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Juiz de Fora, p. 95. 2014. (Dissertação de Mestrado).
- ALMEIDA, C. C. et al. **Experiments, LED-Based Electronic System to Support Plant Physiology**. IEEE 23rd International Symposium. [S.l.], p. 531-536. 2014.
- ALVES, H. J. D. P. **Modelo geoestatístico espaço-temporal com funções de covariância estacionárias não-separáveis aplicado ao albedo de superfície**. Universidade Federal de Lavras (UFLA). Lavras, p. 54. 2016. (Dissertação).
- ANAVIDRO. Como funcionam as estufas de vidro? **ANAVIDRO**, 2013. Disponível em: <<https://www.anavidro.com.br/como-funcionam-as-estufas-de-vidro/>>. Acesso em: 28 Janeiro 2020.
- ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2002. 195-232 p.
- BALASUBRAMANIAN, S. et al. Potent Induction of Arabidopsis thaliana Flowering by Elevated Growth Temperature. **PLoS Genetics**, 2006. 980-989.
- BARBALACE, K. Periodic Table of Elements - Aluminium. **EnvironmentalChemistry.com**, 1995. Disponível em: <<https://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Al.html#Physical>>. Acesso em: 2020 Janeiro 28.
- BERGAMASCHI, H. O clima como fator determinante da fenologia das plantas. In: GIZELDA MARIA REGO, R. R. B. N. L. P. C. M. **Fenologia: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos**. 1ª. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. Cap. 16, p. 363.
- BETTI, M. et al. Manipulating photorespiration to increase plant productivity. **Journal of Experimental Botany**, 67, n. 10, 2016. 2977–2988.
- BORÉM, A.; VIEIRA, M. L. C. **Glossário de biotecnologia**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2005. 183 p.
- BRITO, W. C. **Casa de Vegetação: orientações gerais para projetos de construção**. Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Cametá, p. 27. 2008. (Monografia).
- BUCHANAN, B. B.; W., G.; JONES, R. L. **Biochemistry and Molecular Biology of Plants**. 2ª. ed. Oxford: Wiley Blackwell, 2015. 1283 p.
- CÂMARA, G. M. D. S. Fenologia é ferramenta auxiliar de técnicas de produção. **Visão Agrícola**, 2006. 63-66.
- CHEEMA, G. S. et al. **Urban Agriculture: food, jobs and sustainable cities**. Nova York: United Nations Development Programme, 1996.
- CHILES, J.-P.; DELFINER, P. **Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty**. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, INC., 1999.
- DELATORRE, C. A.; SILVA, A. A. D. Arabidopsis thaliana: uma pequena planta um grande papel. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 31, n. 2, p. 58-67, 2008.
- EASLON, H. M.; BLOOM, A. J. Easy Leaf Area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. **Applications in Plant Science**, 2014. 1-4.

FLUENCE. About PAR, PPF, And PPF. **FLUENCE by OSRAM**, 2020. Disponível em: <<https://fluence.science/science-articles/horticulture-lighting-metrics/>>. Acesso em: 26 Janeiro 2020.

FOGAÇA, J. R. V. Aço. **Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/aco.htm>>. Acesso em: 28 Janeiro 2020.

GUIMARÃES, I. D. A. B. **Análise e Dimensionamento de Sistema de Iluminação Artificial com LEDs para Suplementação Luminosa no Cultivo de Humulus lupulus**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Juiz de Fora, p. 99. 2017. (Monografia).

HAIFAUP. Seedo: Automatic Hydroponic Growing Machine. **Haifaup**. Disponível em: <<https://www.haifaup.co.il/startup/seedo/>>. Acesso em: 29 Setembro 2019.

HARPER, C. A. **Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites**. 4ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.

HAUS. "Conheça as vantagens de pintar o telhado de branco". **Gazeta do Povo**, 2014. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/haus/arquitetura/conheca-as-vantagens-de-pintar-o-telhado-de-branco/>>. Acesso em: 28 Janeiro 2020.

HODSON, R. Food Security. **Nature**, v. 544, p. 5-6, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. **Análise de Ecoeficiência de Janelas**. São Paulo, p. 12. 2013.

KATAGIRI, F. et al. Design and Construction of an Inexpensive Homemade Plant Growth Chamber. **PLoS ONE**, 2015. 1-14.

KING, A. Technology: The Future of Agriculture. **Nature**, v. 544, p. 21-23, 2017.

KITTAS, C.; BARTZANAS, T.; JAFFRIN, A. Temperature Gradients in a Partially Shaded Large Greenhouse equipped with Evaporative Cooling Pads. **Biosystems Engineering**, v. 85, n. 1, p. 87-94, 2003.

KOAY, T. W.; WONG, H. L.; LIM, B. H. Engineering of chimeric eukaryotic/bacterial Rubisco large subunits in Escherichia coli. **Genes & Genetic Systems**, 91, 2016. 139-150.

LAGERCRANTZ, U. At the end of the day: a common molecular mechanism for photoperiod responses in plants? **Journal of Experimental Botany**, 2009. 2501–2515.

MAUNEY, T. L. **Plant Growing System**. US 2002/0184820 A1, 2002.

MAZOEYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo: Editora UNESP, 2010. 419-485 p. ISBN 978-85-7139-994-5.

MCCOUCH, S. Feeding the future. **Nature**, v. 499, p. 23-25, 2013.

MONTAZERI, H.; MONTAZERI, F. CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. **Renewable Energy**, p. 502-520, 2018.

MUNNS, D. P. D. **Engineering the Environment: Phytotrons and the Quest for Climate Control in the Cold War**. 1ª. ed. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2017. 385 p.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and Environmental Plant Physiology**. 4ª. ed. Londres: Elsevier Academic Press, 2009.

OKAMOTO, K. et al. Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source. **Acta Horticulturae (ISHS)**, v. 440, p. 111-116, 1996.

- PLANTANDO.COM. Seedo – Máquina de cultivo automático. **plantando.com**. Disponível em: <<https://plantando.com/produto/seedo-maquina-de-cultivo-automatgico/>>. Acesso em: 29 Setembro 2019.
- RODOLFO JR, A. & J. V. Desenvolvimento de PVC reforçado com resíduos de Pinus para substituir madeira convencional em diversas aplicações. **Polímeros**, v. 16, p. 1-11, 2006.
- RODRIGUES, M. **Crescimento e trocas gasosas de copo-de-leite em função de graus-dias de desenvolvimento**. Universidade Federal de Lavras (UFLA). Lavras, p. 84. 2012. (Tese de Doutorado).
- SIMPSON, E. **Assessing Value Within Sustainable Agricultural Movements: A Case Study on The Urban Farm Collective**. Norwegian University of Life Sciences (NMBU). As. 2014.
- STRECK, N. A. A temperature response function for modeling leaf growth and development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 55-62, 2004.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6ª. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TERUEL, B. J. Controle automatizado de casas de vegetação: Variáveis Climáticas e Fertilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 237–245, 2010.
- THOMAS, B. Light signals and flowering. **Journal of Experimental Botany**, 2006. 3387–3393.
- TRIBUZY, E. S. **Variações da temperatura foliar do dossel e o seu efeito na taxa assimilatória de CO₂ na Amazônia Central**. Universidade de São Paulo (USP). Piracicaba, p. 102. 2005. (Tese).
- VERPLOEGEN, E.; RINKER, P.; OGNAKOSSAN, K. E. Producing and using evaporative cooling chambers and clay pots cooler. **Evaporative cooling best practices**, 2018.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 2000. p. 1-54.
- VILLA-NOVA, N. A. et al. **Estimativa de graus dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima**. Instituto de Geografia/USP. São Paulo, p. 8. 1972. (Caderno de Ciência da Terra, n. 30).
- VOLFOVÁ, A.; ŠMEJKAL, M. Geostatistical Methods in R. **Geoinformatics FCE CTU**, Prague, 2012. 29-54.
- WARE, R. L. **Versatile horticultural growth apparatus**. US4045911, 1977.
- WEIGEL, D.; GLAZEBROOK, J. **Arabidopsis: A Laboratory Manual**. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2002.
- YEH, N.; CHUNG, J.-P. High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009. 2175–2180.
- ZHU, X.-G.; LONG, S. P.; ORT, D. R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 19, n. 2, p. 153-159, 2008.

ANEXOS

Anexos de Radiação

Figura A-1. Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação II, posicionado no Estado 1, a uma distância de 8,5 cm da fonte. Tempo de integração de 0,02 s.

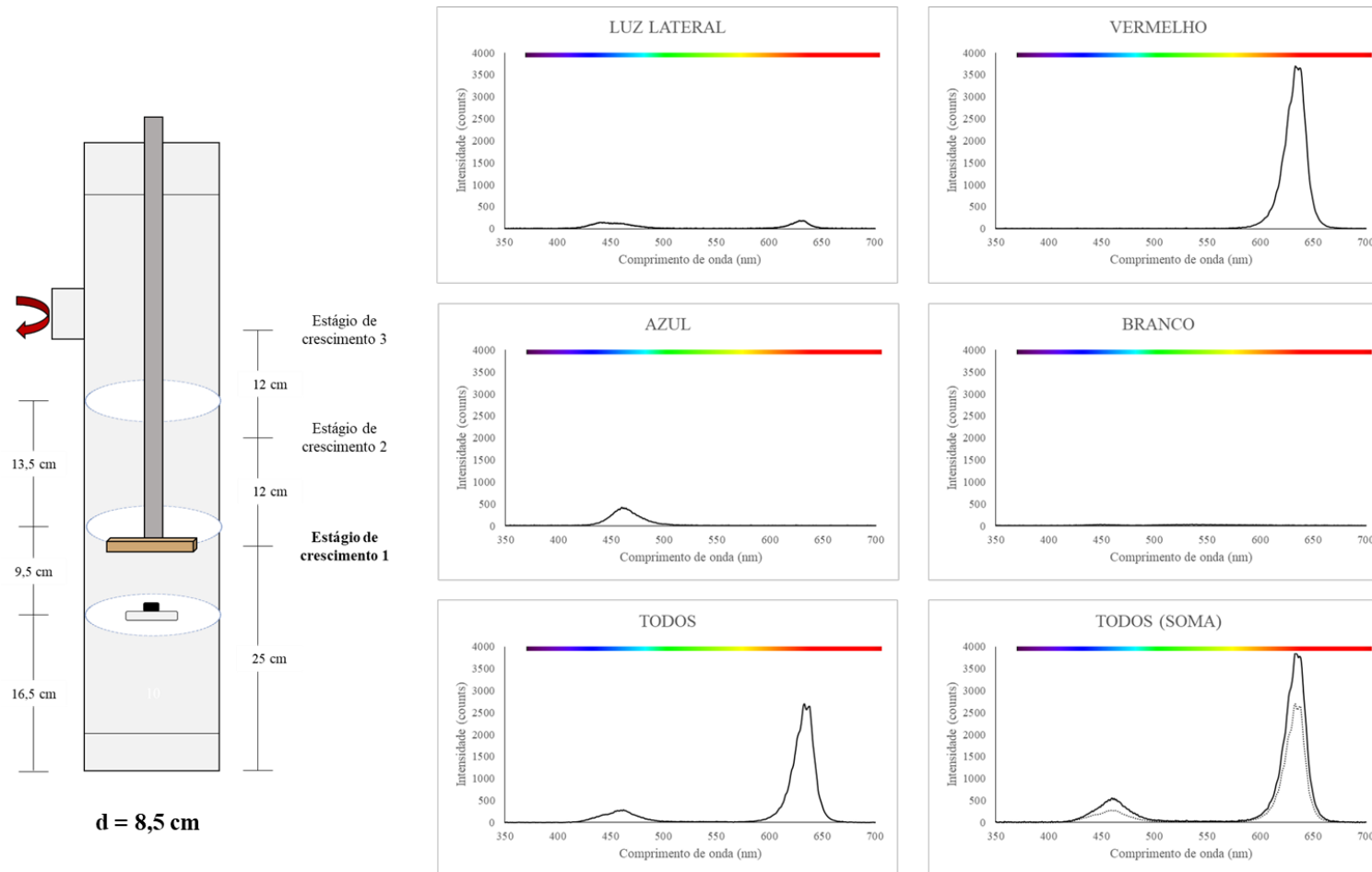


Figura A-2. Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação II, posicionado no Estado 2, a uma distância de 11 cm da fonte.

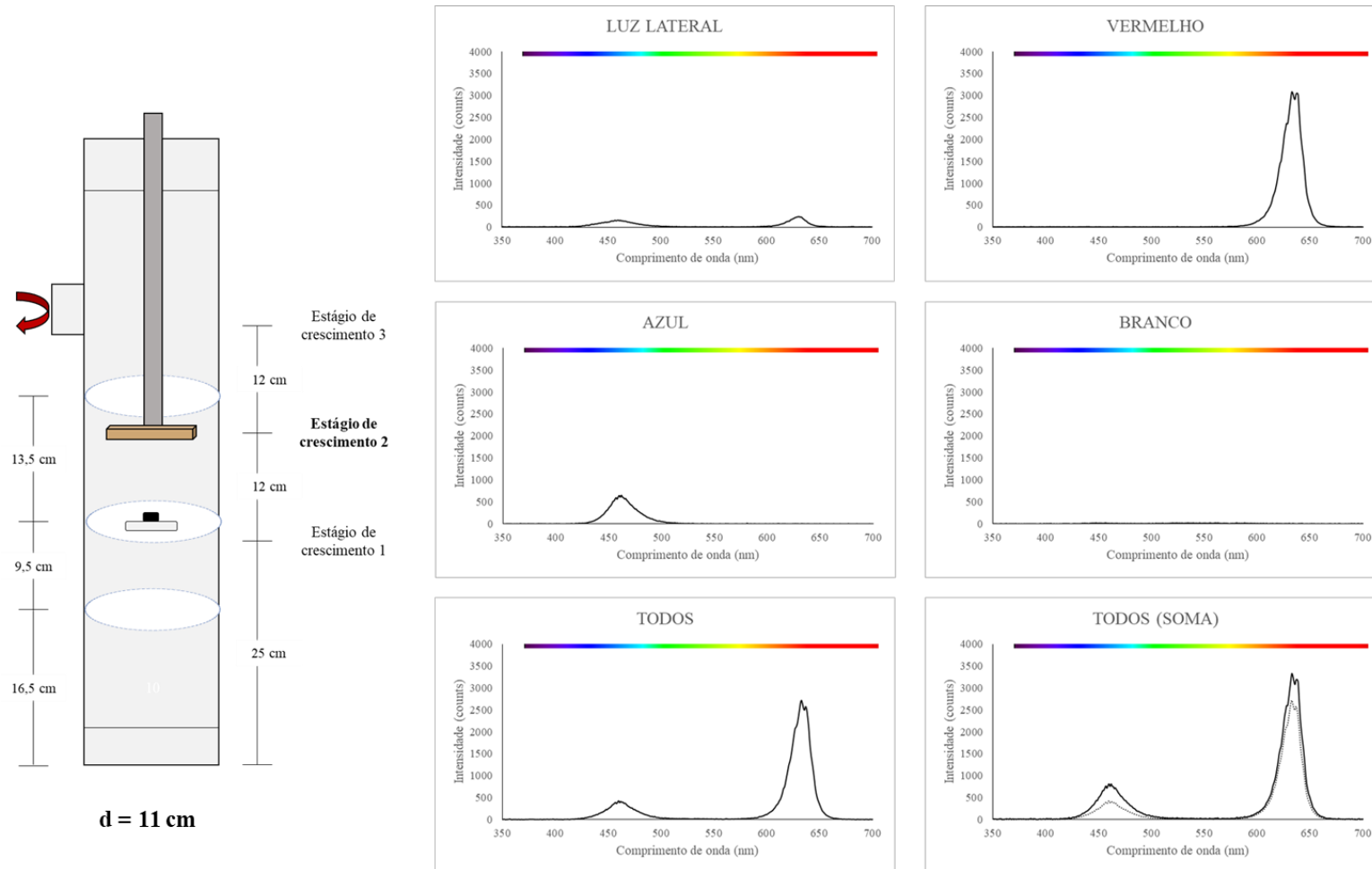


Figura A-3. Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação II, posicionado no Estado 3, a uma distância de 9,5 cm da fonte.

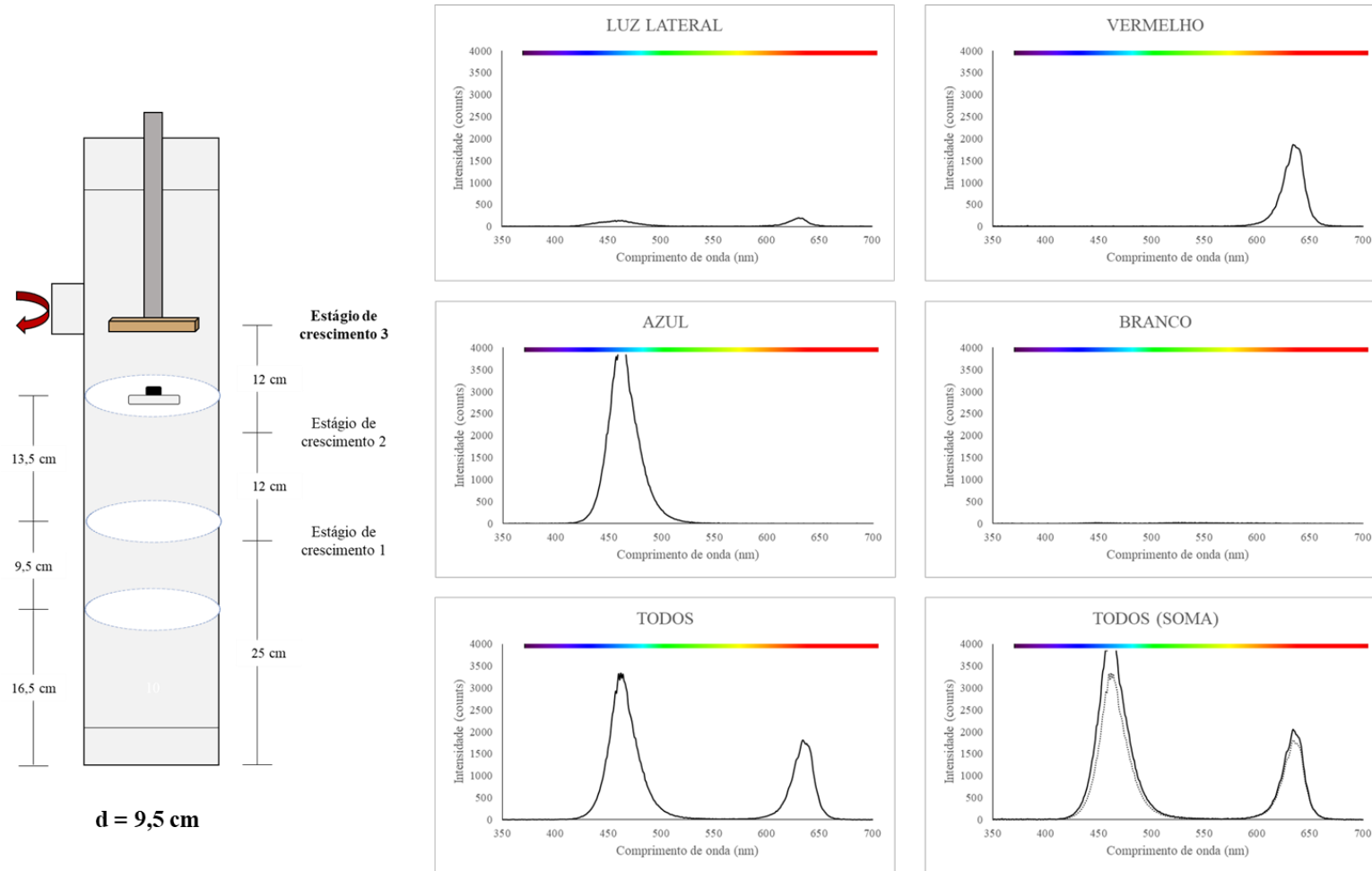


Figura A-4. Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação II, posicionado no Estado 3, a uma distância de 23 cm da fonte.

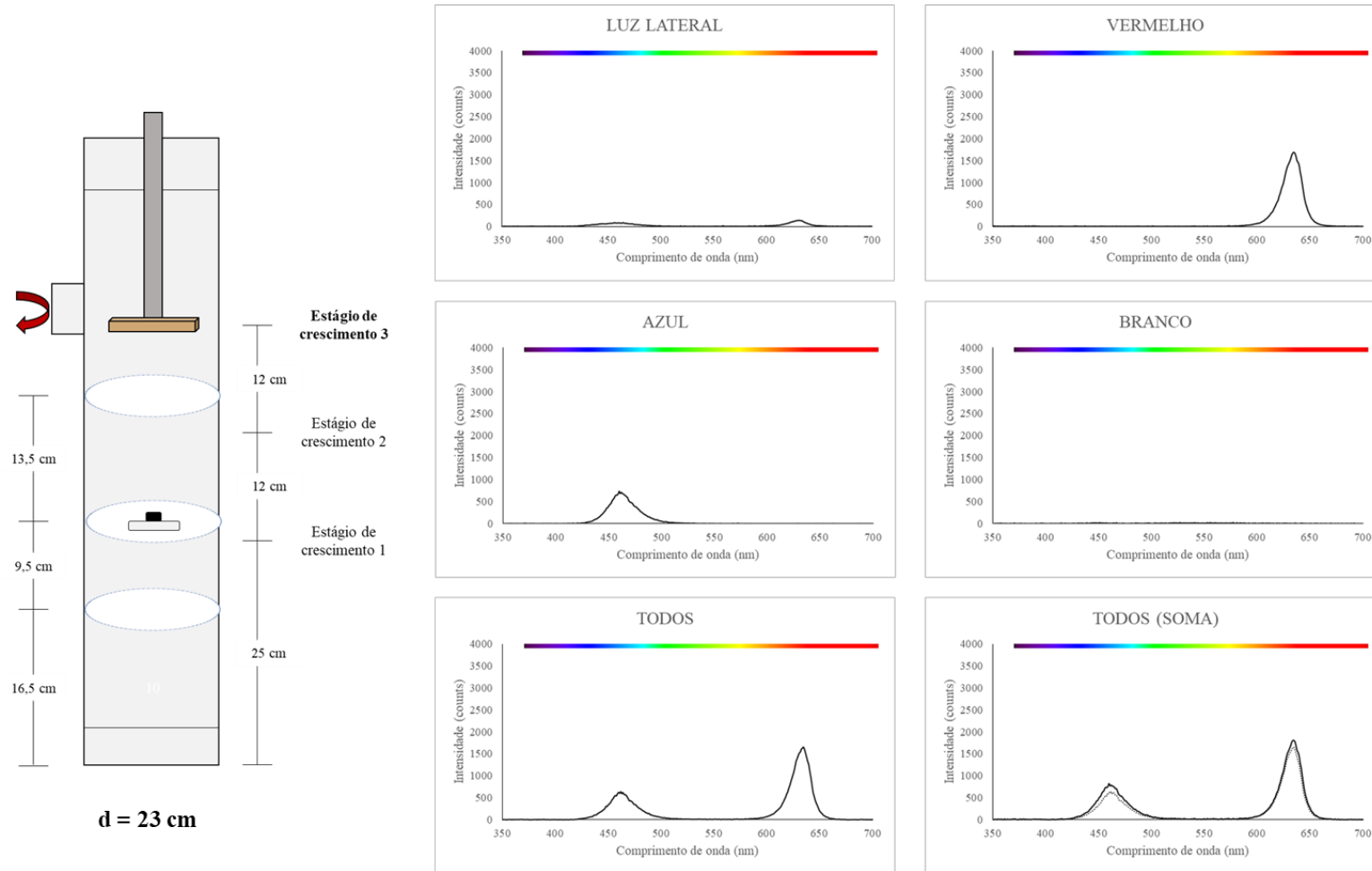
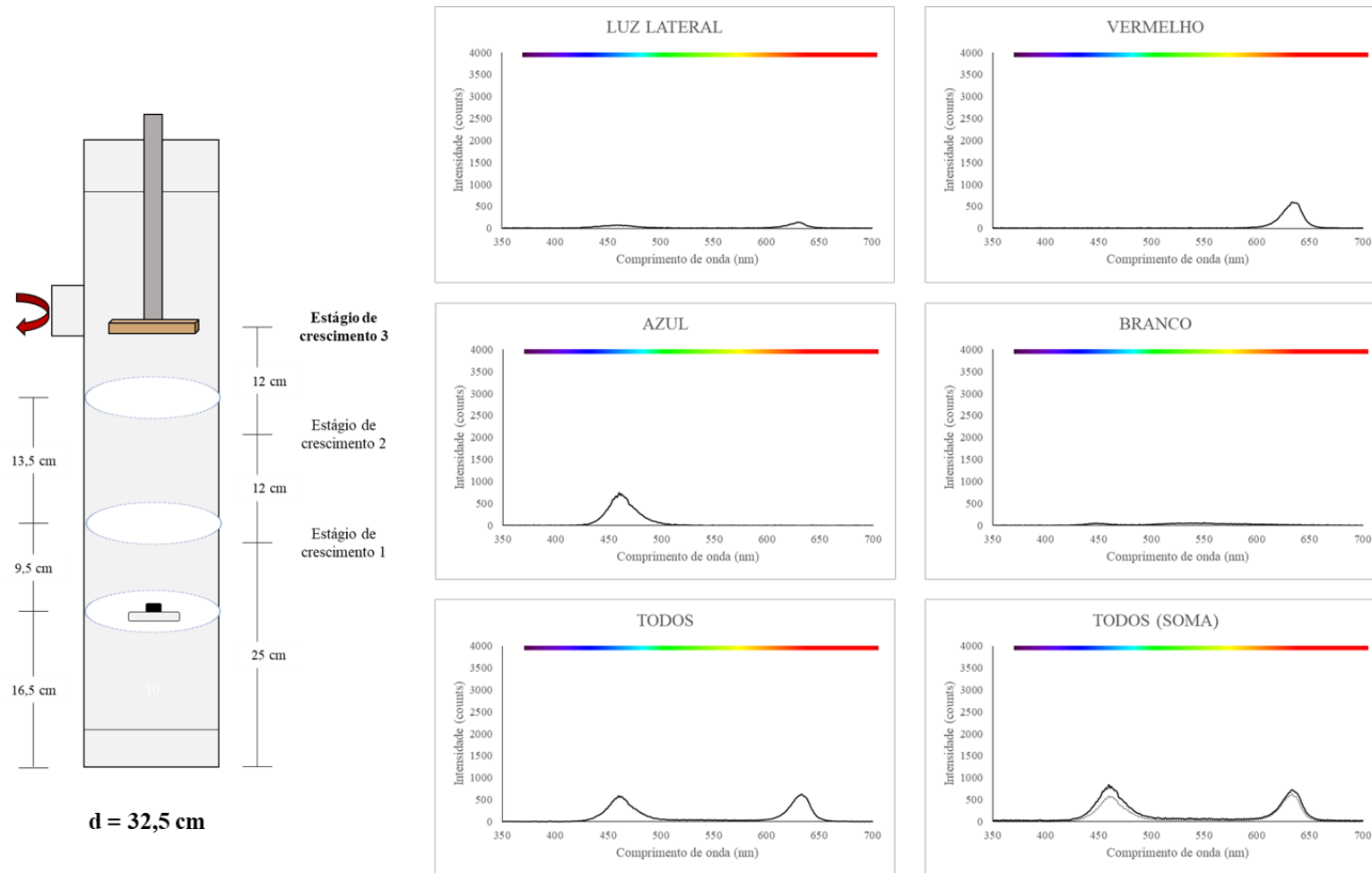


Figura A-5. Espectro da radiação emitida pela placa de luz do Sistema de Iluminação II, posicionado no Estado 3, a uma distância de 32,5 cm da fonte.



Anexos de Temperatura

Figura B-1. Perfil de temperatura noturno no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 18 dias da germinação.

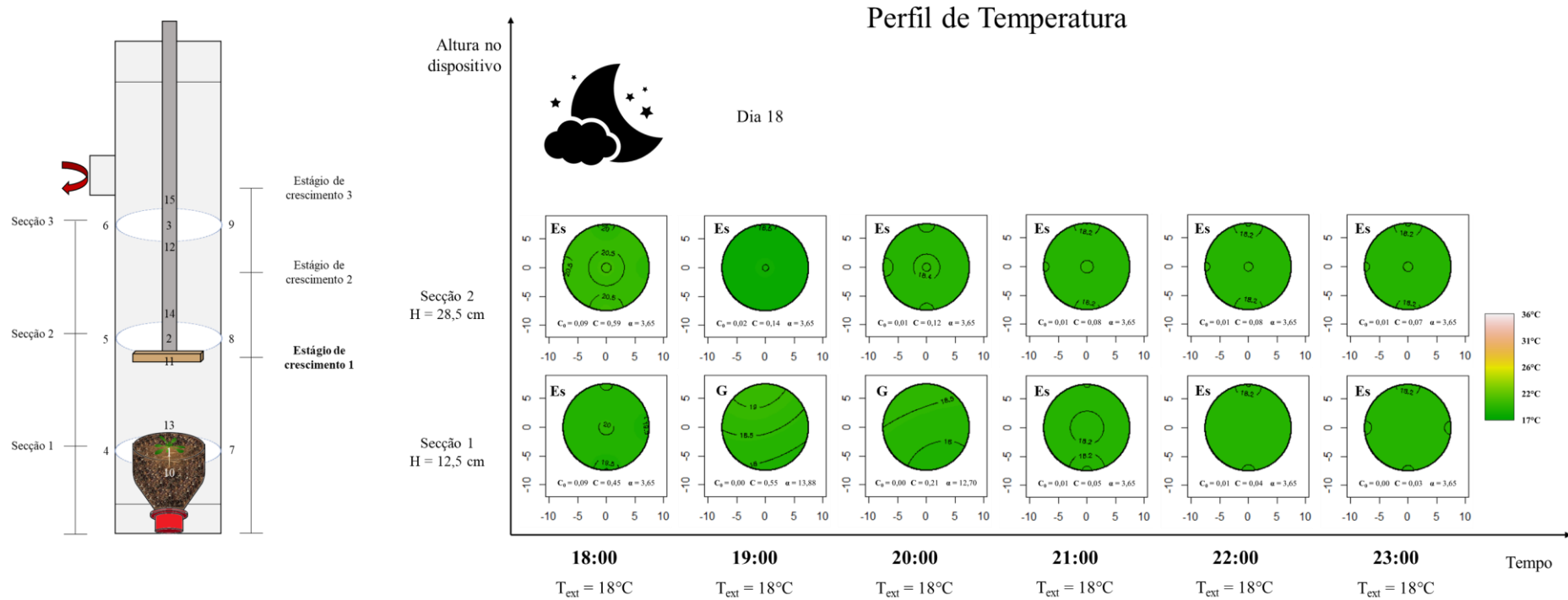


Figura B-2. Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura do dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 18 dias da germinação.

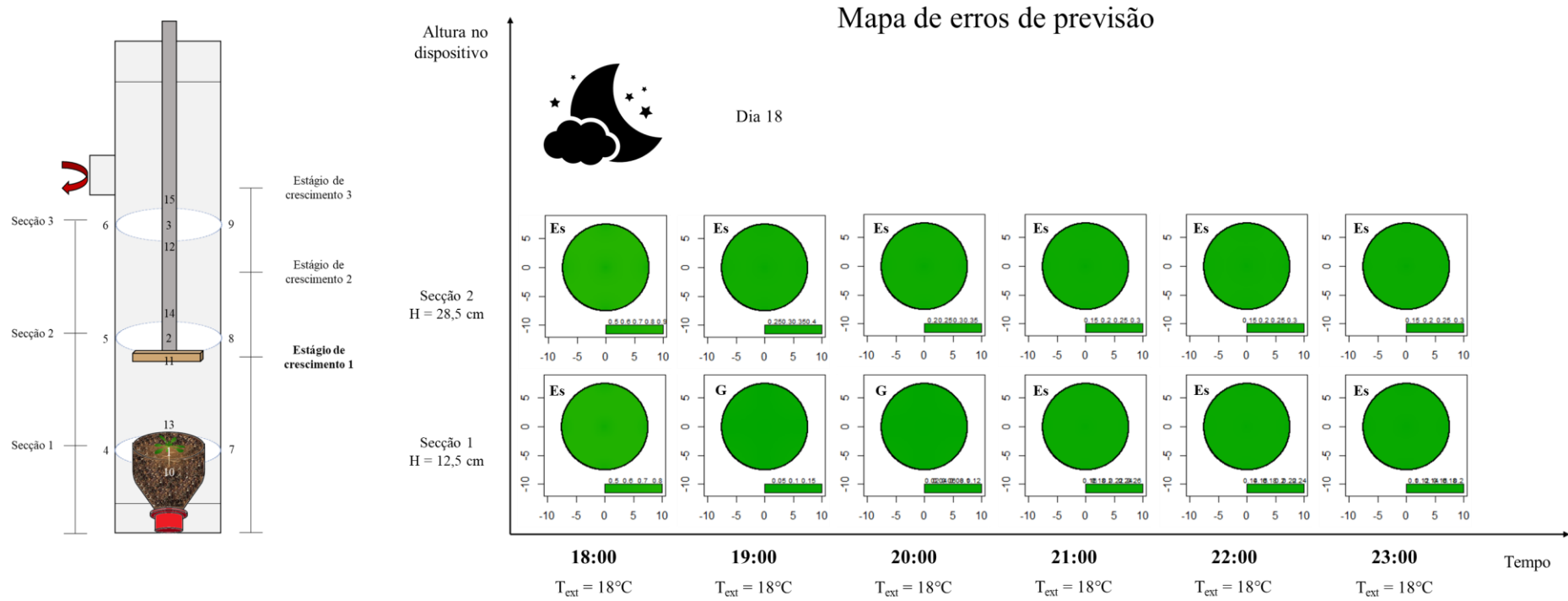


Figura B-3. Perfil de temperatura noturno no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 25 dias da germinação.

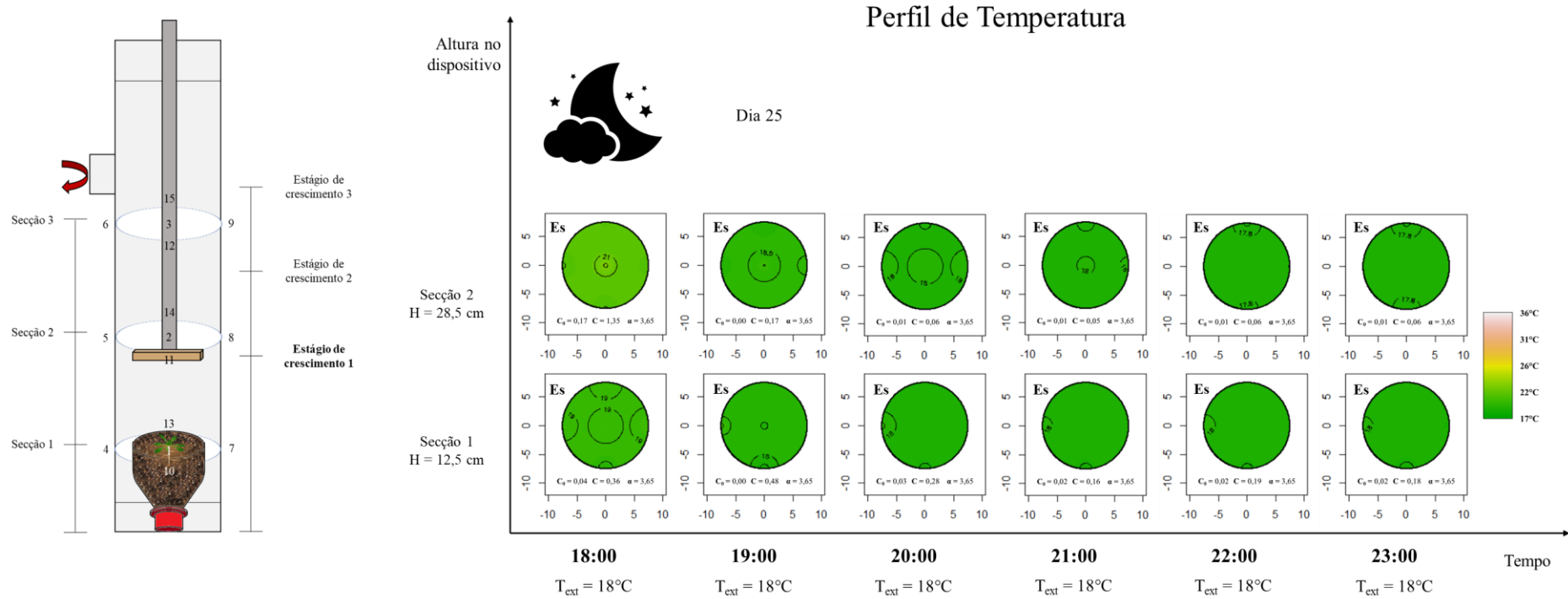


Figura B-4. Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura do dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 25 dias da germinação.

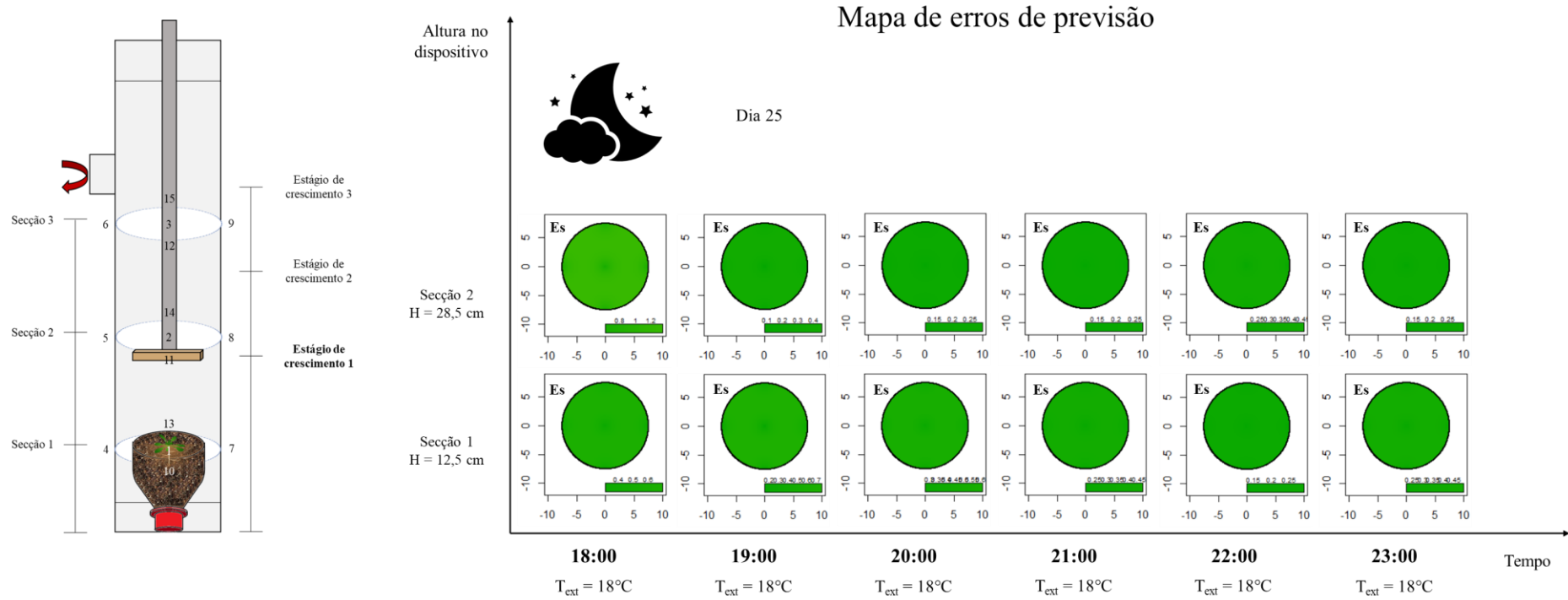


Figura B-5. Perfil de temperatura noturno no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 32 dias da germinação.

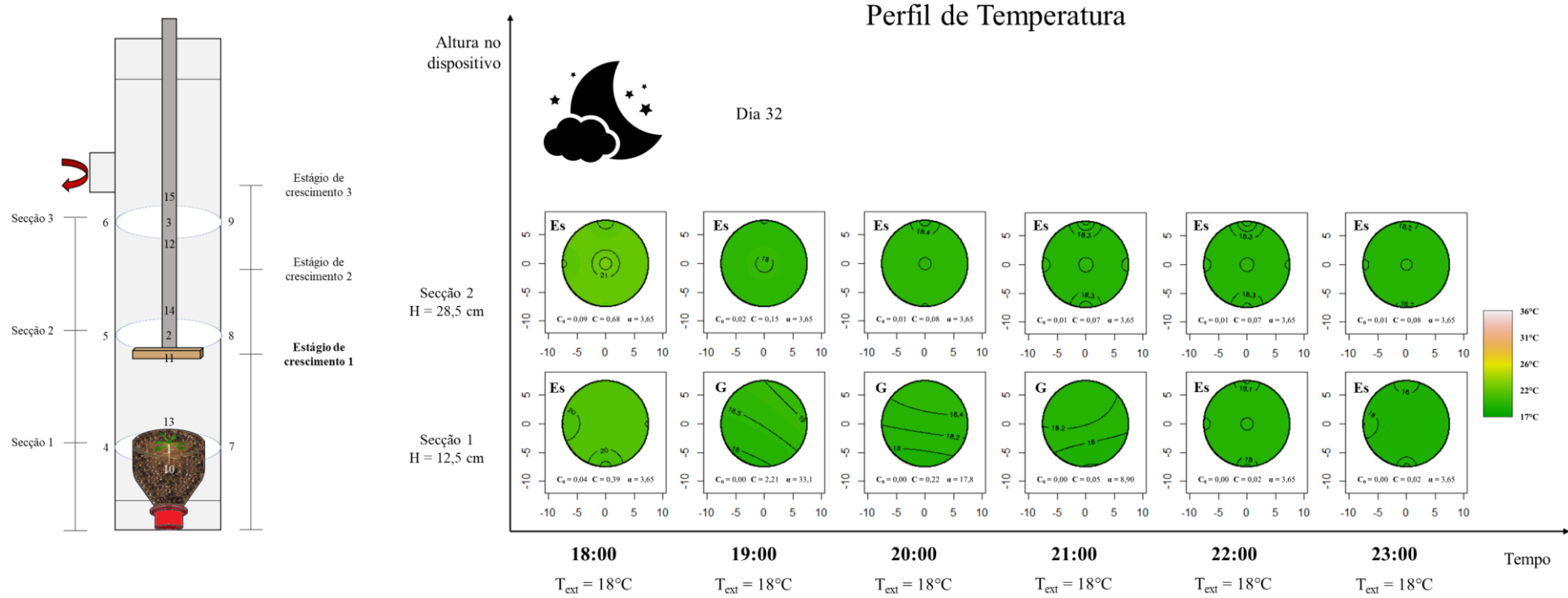


Figura B-6. Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura noturno no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 32 dias da germinação.

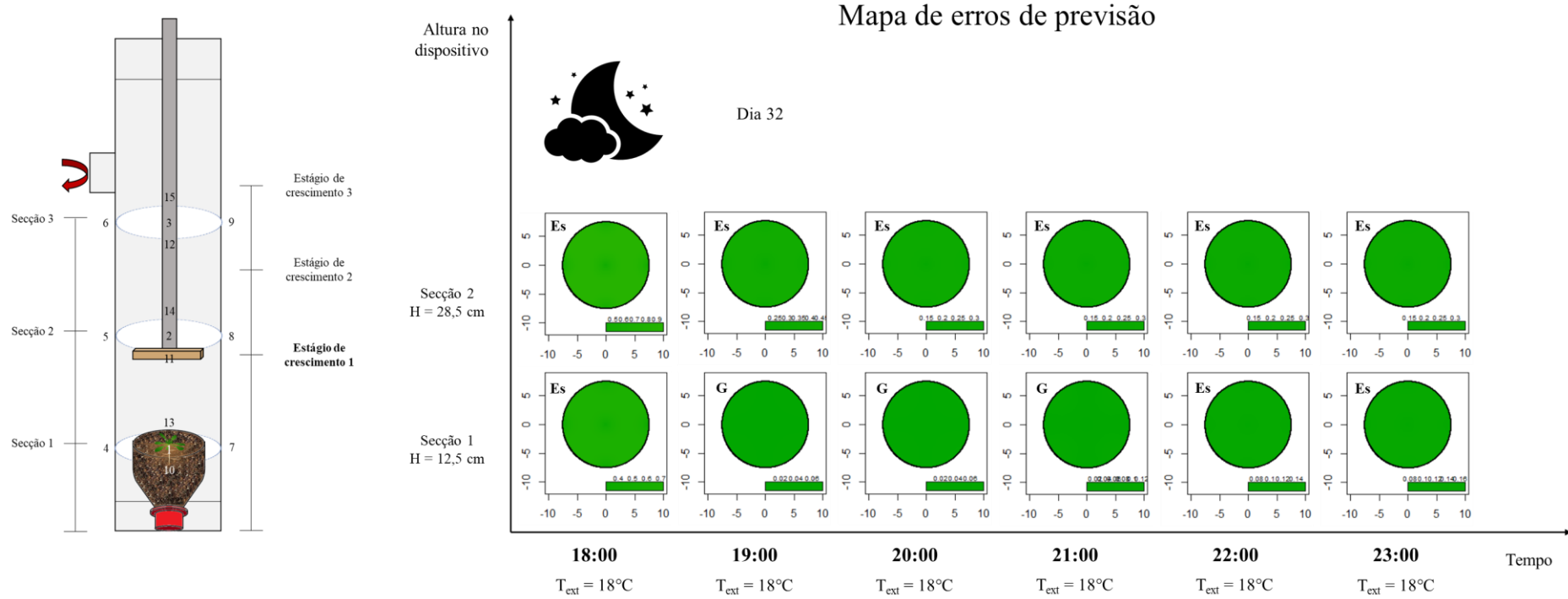


Figura B-7. Perfil de temperatura noturno no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 39 dias da germinação.

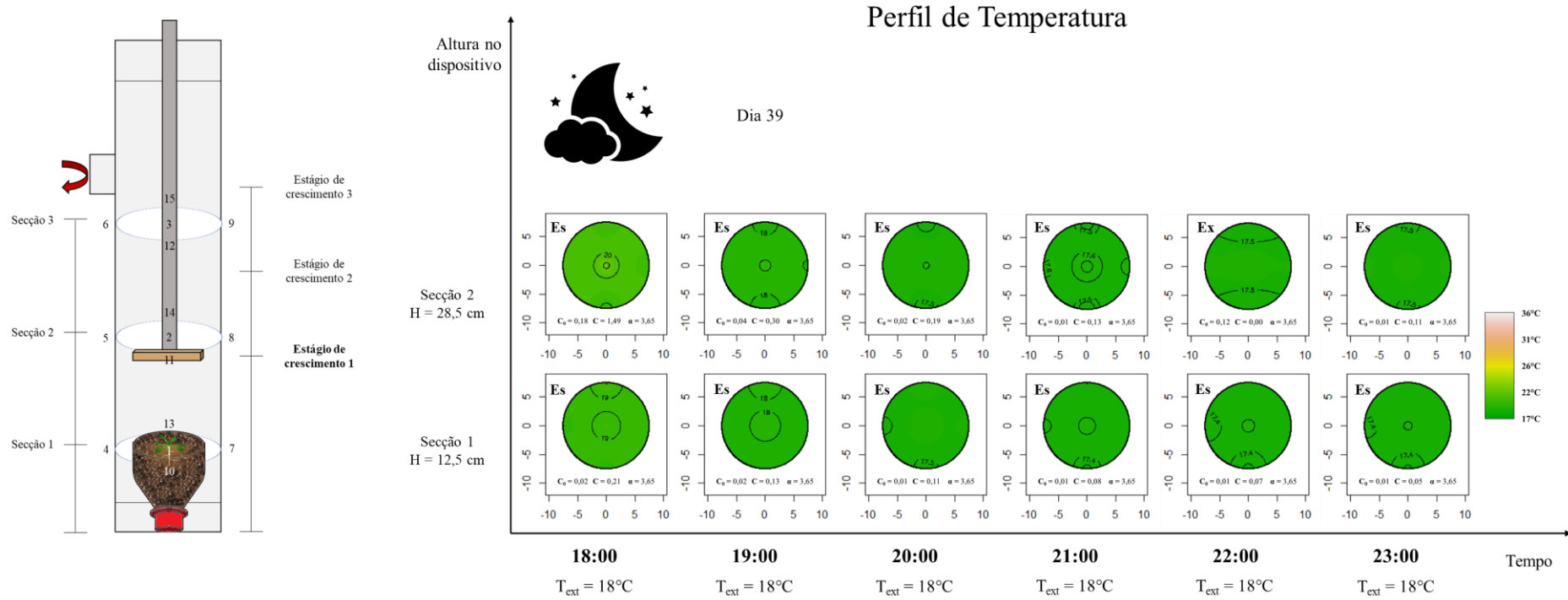


Figura B-8. Mapa de erros de previsão para o perfil de temperatura noturno no dispositivo posicionado no Estágio 1 e mantido em ambiente controlado a 18°C após 39 dias da germinação.

