

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS**

YURI SARRETA ODA

Bioestimulação de sementes de soja com luz de
comprimento de onda 660 nm

São Carlos
2021

YURI SARRETA ODA

Bioestimulação de sementes de soja com luz de comprimento de
onda 660 nm

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Física do Instituto de Física de
São Carlos da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Física Biomolecu-
lar

Orientador: Prof. Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Unidade que aloja o Programa)

São Carlos
2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica revisada pelo Serviço de Biblioteca e Informação do IFSC,
com os dados fornecidos pelo autor

Oda, Yuri Sarreta

Bioestimulação de sementes de soja com luz de comprimento de onda 660 nm / Yuri Sarreta Oda. ; orientador Jarbas Caiado de Castro Neto - versão corrigida - São Carlos, 2021.

102 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Física Biomolecular) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2021.

1. Bioestimulação de sementes. 2. Estufa *indoor* automatizada. 3. Agricultura. 4. Germinação de soja. *Raspberry Pi* 3. I. Castro Neto, Jarbas Caiado de, orient.
II. Título.

*Aos meus pais, Cláudio e Renata,
e à minha tia Fernanda,
pelo apoio incondicional durante
todas as etapas da minha vida até agora.*

AGRADECIMENTOS

De início, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Jarbas C. de Castro Neto, pela excelente orientação e apoio imprescindível em todas as minhas decisões, por acreditar em mim e pela amizade construída durante o período de realização deste projeto.

Agradeço à todos os meus colegas do Laboratório de Inovações Optrônicas para Oftalmologia e Agricultura pelo companheirismo, conselhos, discussões, momentos de descontração, apoio e suporte. Em especial, gostaria de agradecer ao Lucas Orlandi pela amizade e inúmeras discussões e questionamentos que me guiaram no decorrer do projeto, ao Rogério Barros pela amizade, paciência e principalmente pela bondade em fornecer grande parte de seu tempo para me ingressar no mundo da eletrônica no início de meu mestrado e também ao Filipe Marinho, por ter me apresentado a possibilidade da criação de interfaces em *NodeRed*. Agradeço também aos meus colegas de trabalho André Orlandi, Fátima Yasuoka e Vicente Mattos que, com suas experiências, me ajudaram em diversas etapas durante o período decorrido.

Agradeço ao João Marcelo Nogueira do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e ao Luiz Paulo Damaceno do Laboratório do Relógio Atômico por continuarem motivando o meu interesse na área de eletrônica, ampliando e auxiliando na construção de novos conhecimentos. Vocês foram essenciais para a realização deste projeto!

Agradeço aos meus pais, Cláudio e Renata, por acreditarem em mim e fornecerem todo apoio, suporte e amor, sempre se orgulhando de minhas decisões. Agradeço à minha tia Fernanda, que sempre me incentivou à ingressar na pós-graduação, assim como ela o fez nos caminhos de sua vida. Agradeço aos meus avós Gilberto e Oneida, não mais aqui, mas sempre olhando por mim.

Agradeço à Natalia Cardozo, pelo carinho, conselhos, amor e por sempre acreditar que eu sou capaz, me levantando nos momentos de desânimo e me ensinando à comemorar as pequenas vitórias. Agradeço ao meu melhor amigo Mateus Priolo, pela amizade construída durante os anos de graduação, que se prolongou durante os dois anos de mestrado e que seguirá para o resto de nossas vidas. Agradeço também à Tamires Galvani, uma grande amiga que sempre se interessou pelo projeto e diz se orgulhar de ter um amigo na carreira científica.

Por fim, agradeço ao Instituto de Física de São Carlos, à bibliotecária Maria Cristina Cavarette pelo carinho e atenção durante a correção desta dissertação, ao CEPOF e ao professor Vanderlei Salvador Bagnato, que sempre disponibilizaram uma ótima infraestrutura para o desenvolvimento das pesquisas e à CAPES, que financiou este projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

*“Temos de fazer o melhor que podemos;
esta é a nossa sagrada responsabilidade humana.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

ODA, Y. S. **Bioestimulação de sementes de soja com luz de comprimento de onda 660 nm**. 2021. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

A agricultura moderna tem como alguns de seus grandes problemas a poluição de rios e lençóis freáticos gerada pelo descarte incorreto de agrotóxicos, o desperdício de água devido à irrigações mal executadas e a modificação do panorama ambiental para implementação de novas lavouras visando o aumento do volume de produção. Além disso, os efeitos negativos do uso exacerbado e em concentrações inadequadas de substâncias químicas vêm sendo reportados. Em contrapartida, métodos físicos como a irradiação de luz para a bioestimulação de sementes surgem como uma possível alternativa sustentável para o tratamento de sementes visando reduzir alguns dos danos causados pelo modelo de produção atual. Esse método é possível devido a ativação dos fitocromos, fotorreceptores que absorvem luz de comprimento de onda correspondente à cor vermelha (660 nm) quando em sua forma inativa, e interconvertem-se de maneira reversível para a forma ativa que absorve luz no 730 nm, participando das etapas de floração e germinação. Neste projeto, os efeitos da bioestimulação de sementes de soja utilizando duas fontes de luz de comprimento de onda 660 nm (*laser* e LED) são estudados. Para o crescimento das plantas, foi construída uma estufa *indoor* com iluminação artificial e automação com o sistema embarcado *Raspberry Pi 3*. O sistema construído é responsável por controlar os equipamentos de irradiação através de uma interface criada em *NodeRED*, obter imagens da bancada de cultivo com o módulo câmera *Raspicam*, coletar dados da temperatura, umidade e pressão da sala e disponibilizar na plataforma *online ThingSpeak* e ativar a válvula solenóide do sistema de irrigação. Os resultados indicam que a irradiação de sementes é capaz de gerar efeitos de bioestimulação positivos, neutros ou negativos, dependendo da dose de luz utilizada. Os melhores resultados obtidos foram para a dose de luz $1,6 J/cm^2$, responsável por aumentar significativamente a taxa de germinação (5,5%), a massa fresca (32%) e a massa seca (84%) de plântulas normais no experimento de germinação, enquanto a dose $0,8 J/cm^2$ aumentou a massa fresca da parte aérea (19,2%) e das raízes (19,6%) e a massa seca da parte aérea (38,4%) de plantas de soja no experimento de cultivo na estufa. Além disso, a dose $1,6 J/cm^2$ também aumentou 28% a velocidade de emergência de plântulas normais no experimento de cultivo em bandejas na estufa.

Palavras-chave: Bioestimulação de sementes. Estufa *indoor* automatizada. Agricultura. Germinação de soja. *Raspberry Pi 3*.

ABSTRACT

ODA, Y. S. **Biostimulation of soybean seeds with 660 nm wavelength light**. 2021. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Modern agriculture has as some of its major problems the rivers and groundwater pollution generated by the incorrect disposal of pesticides, the waste of water due to poorly executed irrigation and the modification of the environmental landscape to implement new crops in order to increase the volume of production. In addition, the negative effects of overuse and in inadequate concentrations of chemicals have been reported. In contrast, physical methods such as light irradiation for seeds biostimulation emerge as a possible sustainable alternative for seed treatment aiming to reduce some of the damage caused by the current production model. This method is possible due to the activation of phytochromes, photoreceptors that absorb light of a wavelength corresponding to the red color (660 nm) when in its inactive form, and are reversibly interconverted to the active form that absorbs light at 730 nm, participating in the flowering and germination stages. In this project, the effects of soybean seeds biostimulation using two 660 nm wavelength light sources (laser and LED) are studied. For plants growth, an indoor greenhouse with artificial lighting and automation was built with the embedded system Raspberry Pi 3. The built system is responsible for controlling the irradiation equipments through an interface created in NodeRED, get pictures of the cultivation bench with the Raspicam camera module, collect room's temperature, humidity and pressure data and make it available on the online ThingSpeak platform and activate the irrigation system's solenoid valve. The results indicate that seeds irradiation is capable of generating positive, neutral or negative biostimulation effects, depending on the light dose used. The best results obtained were for the light dose $1.6 J/cm^2$, responsible for significantly increase the germination rate (5.5%), the fresh mass (32%) and the dry mass (84%) of normal seedlings in the germination experiment, while the dose $0.8 J/cm^2$ increased the fresh weight of shoots (19.2%) and roots (19.6%) and dry shoots weight (38.4%) of soybean plants in the greenhouse cultivation experiment. In addition, the dose $1.6 J/cm^2$ also increased the emergence rate of normal seedlings by 28% in the greenhouse tray experiment.

Keywords: Seeds biostimulation. Automated indoor greenhouse. Agriculture. Soybeans germination. Raspberry Pi 3.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Espectro de absorção do fitocromo em suas duas formas: P_r (inativa, com pico máximo de absorção em 660 nm) e P_{fr} (ativa, com pico máximo de absorção em 730 nm). | 26 |
| Figura 2.1 – Concentração e distribuição da insegurança alimentar por severidade entre as regiões do mundo. | 30 |
| Figura 2.2 – Proporção de pessoas em condição de pobreza e extrema pobreza por unidade da federação. | 31 |
| Figura 2.3 – Classificação dos agrotóxicos de acordo com a toxicidade. | 33 |
| Figura 2.4 – Consolidação de dados fornecidos pelas empresas registrantes de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme artigo 41 do Decreto 4.074/2002, pelo IBAMA no Brasil. | 33 |
| Figura 2.5 – Área terrestre por classe de uso da terra - 2010. | 35 |
| Figura 2.6 – Área irrigada total e participação das regiões - 1960-2015. | 36 |
| Figura 3.1 – Área colhida, quantidade produzida e valor da produção para diversas culturas no ano de 2018. (a) Área colhida (hectares). (b) Quantidade produzida (toneladas). (c) Valor da produção (mil reais). | 38 |
| Figura 3.2 – Agroindústrias de base agrícola: variação anual do volume, preços reais e faturamento das indústrias agrícolas. | 39 |
| Figura 3.3 – Estrutura de uma planta de soja. | 40 |
| Figura 4.1 – Desenvolvimento de plantas regulado pela luz. | 45 |
| Figura 5.1 – Equipamento <i>biotable</i> desenvolvido pelo CEPOF para pesquisas na área de PDT. | 50 |
| Figura 5.2 – Esquemáticos das fontes de corrente da <i>biotable</i> . (a) Fonte de alimentação do <i>peltier</i> . (b) Fonte de alimentação dos LEDs de alta potência. | 51 |
| Figura 5.3 – <i>Layout</i> da PCB das fontes de corrente da <i>biotable</i> | 51 |
| Figura 5.4 – Equipamento <i>biotable</i> com placa de 24 poços e fonte de energia construída. | 52 |
| Figura 5.5 – Espectro da radiação emitida pela <i>biotable</i> com pico de intensidade centrado em 660 nm. | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.6 – Estrutura do equipamento desenvolvido para tratamento de sementes com <i>lasers</i> . (a) Ilustração do projeto no Solid Works®: 1) Base de PLA com suporte para hastes de alumínio; 2) Caixa de PLA para posicionamento das sementes; 3) Porta-amostra de sementes; 4) Hastes de alumínio responsáveis pela sustentação do equipamento; 5) Difusor de acrílico; 6) Conjunto dissipador e <i>lasers</i> 660 nm; 7) Parafusos de contenção para manter dissipador e peça suporte presos nas hastes; 8) Peça suporte da estrutura. (b) Versão renderizada. (c) Face inferior do dissipador ilustrando a posição geométrica dos cinco <i>lasers</i> de 660 nm. | 53 |
| Figura 5.7 – Esquemático da fonte de corrente do conjunto de <i>lasers</i> desenvolvido em laboratório. | 54 |
| Figura 5.8 – <i>Layout</i> da PCB da fonte de corrente dos <i>lasers</i> | 54 |
| Figura 5.9 – Equipamento desenvolvido contendo cinco <i>lasers</i> de diodo de comprimento de onda 660 nm conectado à fonte de energia desenvolvida. (a) Estrutura do equipamento com 100 sementes de soja no porta-amostras. (b) Equipamento ligado. | 55 |
| Figura 5.10–Espectro da radiação emitida pelos <i>lasers</i> com pico de intensidade bem definido e centrado em 660 nm. | 55 |
| Figura 5.11–Gráfico da irradiância por distância das fontes de luz <i>laser</i> usado para estimar a irradiância das fontes de luz em $d = (130,20 \pm 0,02)$ mm. Barras de erros representam o desvio padrão de 15 medidas, sendo três medidas em uma mesma distância para cada um dos cinco <i>lasers</i> . <i>Fitting</i> de decaimento exponencial se ajustou aos dados com $R^2 = 0,95954$ | 56 |
| Figura 5.12–Laboratório estufa <i>indoor</i> construído para o cultivo de plantas de soja com iluminação artificial. (a) Bancadas para realização dos experimentos e armazenamento dos materiais de consumo. (b) Bancada com os equipamentos de irradiação desenvolvidos, <i>Raspberry Pi 3</i> , balança analítica e estufa de secagem e bancada de cultivo com iluminação artificial. | 57 |
| Figura 5.13–Bancada de cultivo de plantas de soja construída com iluminação artificial. | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.14–Espectros da radiação emitida pelas lâmpadas utilizadas na bancada de cultivo. | |
| (a) Espectro da radiação emitida pelas lâmpadas <i>Full Spectrum</i> , com picos acentuados nas vizinhanças de 448 nm (azul) e 636 nm (vermelho), picos menores nas vizinhanças de 532 nm (verde) e 570 nm (verde amarelado) e dois picos pequenos nas vizinhanças de 398 nm (UV-A) e 736 nm (vermelho distante). | |
| (b) Espectro da radiação emitida pelos plafons de LEDs brancos, com picos acentuados nas vizinhanças de 457 nm (azul), 532 nm (verde) e 565 nm (verde amarelado). | |
| (c) Espectro da radiação emitida pelas lâmpadas <i>Full Spectrum</i> e dos plafons de LEDs brancos juntos, com picos acentuados nas vizinhanças de 457 nm (azul), 532 nm (verde), 565 nm (verde amarelado) e 634 nm (vermelho). Os picos UV-A (398 nm) e vermelho distante (736 nm) não apareceram no espectro uma vez que suas intensidades eram bem menores do que as dos outros comprimentos de onda. | 59 |
| Figura 5.15–Computador embarcado <i>Raspberry Pi 3</i> utilizado para automação da estufa <i>indoor</i> . À esquerda, o embarcado <i>Raspberry Pi 3</i> . À direita, módulo relé com quatro canais usado para conectar os equipamentos de irradiação e o sistema de irrigação. | 60 |
| Figura 5.16–Área de programação do <i>Node-RED</i> | 61 |
| Figura 5.17–Interface criada em <i>Node-RED</i> para controle dos equipamentos. | 62 |
| Figura 5.18–Instalação do módulo <i>Raspicam</i> na bancada de cultivo. (a) Conjunto contendo a <i>Raspicam</i> , peça suporte impressa em PLA e parte móvel de um tripé de câmera. (b) Conjunto instalado na face superior esquerda da bancada de cultivo. | 62 |
| Figura 5.19–Imagem obtida pela <i>Raspicam</i> exibindo a bancada de cultivo da estufa. . . . | 63 |
| Figura 5.20–Sensor BME280 responsável por coletar dados de temperatura, umidade e pressão atmosférica da bancada de cultivo à cada 15 minutos. | 64 |
| Figura 5.21–Gráficos da temperatura (°C), umidade (%) e pressão atmosférica (hPa) da bancada de cultivo disponibilizados online na plataforma <i>ThingSpeak</i> . (a) Temperatura. (b) Umidade. (c) Pressão atmosférica. | 64 |
| Figura 5.22–Sistema de irrigação. (a) Válvula solenóide utilizada no sistema de irrigação acoplada a torneira da área externa do laboratório. (b) Sistema de irrigação utilizado na estufa <i>indoor</i> com mangueira de gotejamento. | 65 |
| Figura 5.23–Experimento de germinação em rolo germitest. (a) Método para posicionamento de sementes de soja em folhas de papel germitest. (b) Rolo de papel germitest confeccionado. | 66 |
| Figura 5.24–Plântulas de soja utilizadas como guia para classificação nos experimentos de germinação. 1) Plântulas normais. 2) Plântulas anormais. 3) Sementes mortas. | 67 |
| Figura 5.25–Experimento de velocidade de emergência na bancada de cultivo. | 69 |
| Figura 5.26–Experimento de cultivo na estufa. | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.1 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 74 |
| Figura 6.2 – Plântulas normais obtidas no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> . (a) Controle. (b) $0,2 J/cm^2$. (c) $0,4 J/cm^2$. (d) $0,8 J/cm^2$. (e) $1,6 J/cm^2$. (f) $3,2 J/cm^2$ | 75 |
| Figura 6.3 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com a <i>biotable</i> após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 76 |
| Figura 6.4 – Plântulas normais obtidas no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o <i>biotable</i> . (a) Controle. (b) $0,2 J/cm^2$. (c) $0,4 J/cm^2$. (d) $0,8 J/cm^2$. (e) $1,6 J/cm^2$. (f) $3,2 J/cm^2$ | 77 |
| Figura 6.5 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no segundo experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 78 |
| Figura 6.6 – Plântulas normais obtidas no segundo experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> . (a) Controle. (b) $1,0 J/cm^2$. (c) $1,3 J/cm^2$. (d) $1,6 J/cm^2$. (e) $1,9 J/cm^2$. (f) $2,1 J/cm^2$ | 79 |
| Figura 6.7 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no terceiro experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 80 |
| Figura 6.8 – Plântulas normais obtidas no terceiro experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> . (a) Controle. (b) $5 J/cm^2$. (c) $10 J/cm^2$ | 81 |
| Figura 6.9 – Emergência (%), índice de velocidade de emergência e tempo médio de emergência (dias) de plântulas no experimento de velocidade de emergência em bandejas na estufa. (a) Emergência. (b) Índice de velocidade de emergência. (c) Tempo médio de emergência. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 82 |
| Figura 6.10–Plântulas obtidas no experimento de velocidade de emergência em bandejas na estufa após sete dias de cultivo. (a) Controle. (b) $1,6 J/cm^2$. (c) $3,2 J/cm^2$ | 82 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.11–Altura ao longo de 28 dias (cm) e teor de clorofila (unidades SPAD) nos seis primeiros estádios vegetativos de plantas de soja no primeiro experimento de cultivo na estufa com <i>laser</i> após 30 dias de crescimento. (a) Altura. (b) Teor de clorofila. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 83 |
| Figura 6.12–Massa fresca (g) e massa seca (g) da parte aérea e raiz de plantas de soja no primeiro experimento de cultivo na estufa com <i>laser</i> após 30 dias de crescimento. (a) Massa fresca. (b) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra de mesma cor nas colunas não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 84 |
| Figura 6.13–Plantas de soja do primeiro experimento de cultivo na estufa cujos valores aferidos para altura são mais próximos da média das quatro repetições para cada tratamento. (a) Controle. (b) $0,2 J/cm^2$. (c) $0,4 J/cm^2$. (d) $0,8 J/cm^2$. (e) $1,6 J/cm^2$. (f) $3,2 J/cm^2$ | 84 |
| Figura 6.14–Altura ao longo de 28 dias (cm) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa com <i>laser</i> após 30 dias de crescimento. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 85 |
| Figura 6.15–Teor de clorofila (em unidades SPAD) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa com <i>laser</i> após 30 dias de crescimento. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 86 |
| Figura 6.16–Massa fresca (g) e massa seca (g) da parte aérea e raiz de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa com <i>laser</i> após 30 dias de crescimento. (a) Massa fresca. (b) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 87 |
| Figura 6.17–Plantas de soja do segundo experimento de cultivo na estufa cujos valores aferidos para altura são mais próximos da média das oito repetições para cada tratamento. (a) Controle. (b) $0,8 J/cm^2$. (c) $1,6 J/cm^2$ | 88 |
| Figura 6.18–Diferença do comportamento da incidência de luz proveniente de um <i>laser</i> (à esquerda) e de um LED (à direita) na superfície de uma semente de soja. | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Estádios vegetativos e reprodutivos da soja. | 41 |
| Tabela 3.2 – Previsões para a taxa de crescimento do PIB agropecuário (%) por segmento e por produto (2020). | 41 |
| Tabela 3.3 – Produção de soja (em milhões de toneladas) das safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 (abril) dos maiores produtores de soja do mundo. | 42 |
| Tabela 4.1 – Espectro da radiação eletromagnética. | 43 |
| Tabela 6.1 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> . Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 73 |
| Tabela 6.2 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com a <i>biotable</i> . Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 75 |
| Tabela 6.3 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no segundo experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> . Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 77 |
| Tabela 6.4 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no terceiro experimento de germinação em rolo germitest com o <i>laser</i> . Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 79 |
| Tabela 6.5 – Emergência aos 7 dias (%), índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo médio de emergência (TME) de plântulas no experimento de velocidade de emergência em bandejas na estufa. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 81 |
| Tabela 6.6 – Altura aos 28 dias (cm), teor de clorofila (unidades SPAD), massa fresca (g) e massa seca (g) de plantas de soja no primeiro experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 83 |
| Tabela 6.7 – Altura (cm) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 85 |

| | |
|---|----|
| Tabela 6.8 – Teor de clorofila (unidades SPAD) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 86 |
| Tabela 6.9 – Massa fresca (g) e massa seca (g) da parte aérea e raiz de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. | 87 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-----------|-------|--|
| ANA | ..... | Agência Nacional de Águas |
| ANVISA | . | Agência Nacional de Vigilância Sanitária |
| CEPEA | ... | Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada |
| CEPOF | ... | Centro de Pesquisas em Óptica e Fotônica |
| CNA | ..... | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil |
| DIC | ..... | delineamento inteiramente casualizado |
| DMS | ..... | Diferença Mínima Significativa |
| EMBRAPA | | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EPIs | ..... | Equipamentos de Proteção Individual |
| ESALQ-USP | | Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz |
| FAO | ..... | Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura |
| IA | ..... | ingrediente ativo |
| IBAMA | .. | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| IBGE | ..... | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IFSC | ..... | Instituto de Física de São Carlos |
| INCA | .... | Instituto Nacional de Câncer |
| IVG | ..... | índice de velocidade de germinação |
| LASER | ... | amplificação de luz por emissão estimulada de radiação |
| LAT | ..... | Laboratório de Inovações Tecnológicas |
| LED | ..... | diodo emissor de luz |
| LIEPO | ... | Laboratório de Instrumentação Eletrônica para Óptica |
| LIO2A | ... | Laboratório de Inovações Optrônicas para Oftalmologia e Agricultura |
| LSPA | .... | Levantamento Sistemático da Produção Agrícola |
| NASA | .... | Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica |
| OGMs | .... | Organismos Geneticamente Modificados |
| ONU | ..... | Organização das Nações Unidas |
| PAM | ..... | Produção Agrícola Municipal |
| PCB | ..... | placa de circuito impresso |
| PDT | ..... | Terapia Fotodinâmica |
| PES | ..... | Princípio de Equivalência Substancial |
| PIB | ..... | Produto Interno Bruto |
| RAS | ..... | Regras para Análise de Sementes |

SAN Política de Segurança Alimentar e Nutricional
SAR Resistência Sistêmica Adquirida
SiBCS Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIS Síntese de Indicadores Sociais
TMG tempo médio de germinação
USDA Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
VNC computação em rede virtual

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 | Motivação | 27 |
| 1.2 | Estrutura do trabalho | 27 |
| 2 | PROBLEMAS DA AGRICULTURA MODERNA | 29 |
| 2.1 | Insegurança alimentar | 29 |
| 2.2 | Agrotóxicos | 32 |
| 2.3 | Modificação do panorama e poluição ambiental | 35 |
| 3 | IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA AGRICULTURA | 37 |
| 3.1 | Agronegócio no Brasil | 37 |
| 3.2 | Soja (<i>Glycine max</i>) | 40 |
| 4 | MÉTODOS FÍSICOS COMO ALTERNATIVAS | 43 |
| 4.1 | Fotorreceptores | 44 |
| 4.2 | Bioestimulação de sementes com luz | 46 |
| 5 | METODOLOGIA | 49 |
| 5.1 | Fonte de luz LED: <i>biotable</i> (660 nm) | 49 |
| 5.2 | Fonte de luz <i>laser</i> (660 nm) | 53 |
| 5.3 | Estufa <i>indoor</i> automatizada | 57 |
| 5.3.1 | <i>Iluminação</i> | 58 |
| 5.3.2 | <i>Raspberry Pi 3</i> | 60 |
| 5.3.3 | <i>Interface em Node-RED</i> | 61 |
| 5.3.4 | <i>Módulo câmera Raspberry Pi 3</i> | 62 |
| 5.3.5 | <i>Monitoramento da temperatura, umidade e pressão atmosférica</i> | 63 |
| 5.3.6 | <i>Sistema de irrigação</i> | 65 |
| 5.4 | Parâmetros de irradiação e cultivar de soja | 65 |
| 5.5 | Experimentos de germinação em rolo germitest | 66 |
| 5.5.1 | <i>Taxa de germinação</i> | 67 |
| 5.5.2 | <i>Massa fresca e massa seca de plântulas</i> | 67 |
| 5.6 | Experimentos de velocidade de emergência | 68 |
| 5.7 | Experimentos de cultivo na estufa | 69 |
| 5.7.1 | <i>Altura das plantas</i> | 70 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.7.2 | <i>Teor de clorofila</i> | 70 |
| 5.7.3 | <i>Massa fresca e massa seca de plantas</i> | 71 |
| 5.8 | Estatística dos dados | 71 |
| 6 | RESULTADOS | 73 |
| 6.1 | Experimentos de germinação em rolo germitest | 73 |
| 6.2 | Experimento de velocidade de emergência | 81 |
| 6.3 | Experimentos de cultivo na estufa | 83 |
| 7 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 91 |
| | REFERÊNCIAS | 93 |

INTRODUÇÃO

A elevada produção mundial de alimentos é uma das formas mais significantes em que o ser humano modificou o meio ambiente. O impacto causado pela modernização da agricultura vai desde o esgotamento de rios e lençóis freáticos para a irrigação das plantas até a poluição causada por plantações mecanizadas e o uso de pesticidas.¹ Além disso, existe uma preocupação crescente com as consequências da combinação do acelerado aumento populacional com a produção atual de alimentos ao redor do mundo. Nos últimos 50 anos, a demanda por alimentos triplicou devido a fatores como a duplicação da população mundial, que atingiu mais de 6 bilhões de pessoas, e o aumento da demanda per capita de alimentos gerada pela evolução dos padrões de vida da sociedade atual.²

Como principal desafio da agricultura moderna, surge a necessidade de adequar os métodos de produção atuais e buscar por novos, visando produzir alimentos de qualidade e em quantidades compatíveis.³ Dentre os fatores adversos que restringem a produção agrícola ao redor do mundo, como por exemplo a escassez de áreas aptas ao plantio, mudanças climáticas, poluição ambiental e estresses bióticos e abióticos, a seca destaca-se como uma das principais agravantes da falta de alimentos.⁴ Dessa forma, o desenvolvimento de novas tecnologias deve levar em conta os problemas citados, possibilitando a extensão da agricultura em áreas consideradas não favoráveis ao plantio.

Apesar do século passado ter apresentado um grande avanço na área de aplicações químicas voltadas para a agricultura, os efeitos negativos do constante uso dessas tecnologias vêm sendo reportados tanto para produtos alimentícios, quanto para o meio ambiente.⁵ O uso extensivo de fertilizantes e pesticidas gera uma grande quantidade de resíduos químicos responsáveis pela poluição do solo e da água, causando efeitos nocivos à saúde humana a longo prazo.⁶ Em contrapartida, métodos físicos como a irradiação de luz para a bioestimulação de sementes surgem como uma alternativa sustentável ao modelo atual.⁷ Métodos físicos aumentam o potencial energético através da transformação interna da energia e influenciam a cinética de processos bioquímicos, aumentando a capacidade de germinação de sementes, atividade enzimática e concentração de clorofila,⁸ assim como aumento na resistência à doenças e no vigor das sementes.⁹

Devido ao fato de interagir com proteínas fotorreceptoras, a incidência de luz provoca respostas específicas nas plantas, atuando como principal fonte energética e determinando seu ciclo de vida.¹⁰ Os fitocromos são uma família de fotorreceptores que absorvem no vermelho (660 nm) e vermelho distante (730 nm), constituídos por uma apoproteína ligada ao tetrapirrol

fitocromobilina, atuando como cromóforo. Nas plantas, o fitocromo está presente em duas formas reversivelmente interconvertíveis: o estado P_r , biologicamente inativo, que absorve luz de 660 nm e é prontamente convertido em um segundo estado que absorve luz no 730 nm chamado P_{fr} , atuando como um interruptor biológico e permitindo a percepção de fotoperíodo (Figura 1.1).^{11,12} Estudos demonstram que luz polarizada de baixa energia e em comprimentos de onda adequados atua como agente bioestimulante, uma vez que o sinergismo entre os feixes luminosos e os fotorreceptores leva a mais altas ativações do fitocromo, fitohormônios e sistemas fermentativos.⁹ O aumento do balanço energético causado pela incidência de luz intensifica o desenvolvimento das plantas através do excitamento de estruturas bioenergéticas, resultando em aumentos notáveis na altura da parte aérea, massa das raízes, superfície foliar e consequentemente a taxa fotossintética.⁵

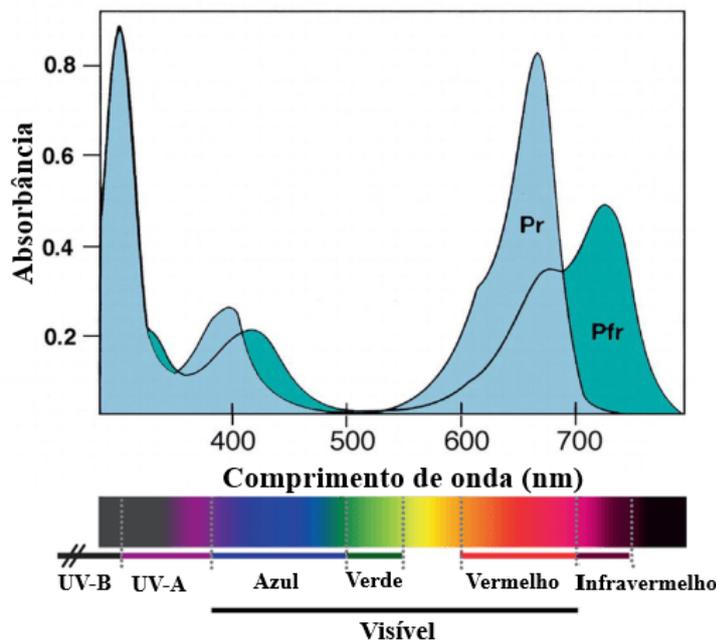


Figura 1.1 – Espectro de absorção do fitocromo em suas duas formas: P_r (inativa, com pico máximo de absorção em 660 nm) e P_{fr} (ativa, com pico máximo de absorção em 730 nm).

Fonte: Adaptada de LI; WANG; DENG;¹²

A característica mais importante das sementes é sua capacidade de germinar e crescer. Os estados iniciais da germinação e crescimento determinam o posterior desenvolvimento das plantas, assim como o rendimento final da produção. Plantas consideradas vigorosas desenvolvem-se mais ativamente e tornam-se mais aptas a se protegerem em ambientes desfavoráveis.¹³ Após o tratamento de sementes com luz de comprimento de onda 660 nm , foram observadas taxas de germinação maiores e mais rápidas para culturas cujas sementes levam muito tempo para germinar, assim como a promoção de crescimento das plantas dessas espécies em ambientes pobres e sujeitos ao estresse hídrico, aumentando a atividade de enzimas conversoras de radicais livres em espécies não reativas, como a superóxido oxidase (SOD) e a peroxidase (POD), e reduzindo o conteúdo de malondialdeído (MDA) produzido quando os lipídeos da membrana passam por processos de peroxidação.⁴

1.1 Motivação

Com o crescente aumento populacional e a demanda mundial de alimentos, faz-se necessário a busca por novos métodos e tecnologias para o aumento da produção agrícola de maneira sustentável, substituindo metodologias atuais prejudiciais ao meio ambiente e contribuindo com a economia do país. Dentre a vasta quantidade de leguminosas disponíveis, a soja tornou-se um dos maiores e mais importantes cultivos do mundo devido à sua grande quantidade de proteínas, lipídeos, carboidratos, minerais e vitaminas, sendo adequada para a alimentação de humanos e à nutrição de animais.¹⁴ Além de apresentar um conteúdo elevado de fitoestrogênio isoflavona, o consumo de soja está relacionado a efeitos benéficos em pacientes diagnosticados com diabetes mellitus.¹⁵ Em 2012, a produção mundial de soja foi de 268 milhões de toneladas métricas, com o Brasil em primeiro lugar contribuindo com 31% desse valor, seguido dos Estados Unidos (30%) e Argentina (19%). Uma vez que o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de soja, seja para o setor alimentício ou para a produção de insumos, a escolha dessa leguminosa foi estrategicamente adequada, contribuindo para a relevância do estudo.

1.2 Estrutura do trabalho

Além do capítulo introdutório, este trabalho apresenta o desenvolvimento de mais seis capítulos, de acordo com a seguinte estrutura:

Capítulo 2 - **Problemas da agricultura moderna** - apresenta uma introdução à respeito dos problemas do modelo de produção agrícola atual como insegurança alimentar, agrotóxicos, modificação do panorama e poluição ambiental.

Capítulo 3 - **Importância econômica da agricultura** - apresenta a importância econômica do agronegócio para o PIB do Brasil, com destaque para a soja.

Capítulo 4 - **Métodos físicos como alternativas** - apresenta uma breve introdução sobre a luz, alguns fotorreceptores das plantas e diversos exemplos benéficos do tratamento de sementes com luz.

Capítulo 5 - **Metodologia** - apresenta a metodologia do desenvolvimento das fontes luminosas, da estufa *indoor* automatizada e da obtenção dos resultados de bioestimulação.

Capítulo 6 - **Resultados** - apresenta os resultados obtidos através da irradiação de sementes de soja com diferentes fontes de luz (660 nm).

Capítulo 7 - **Conclusões e trabalhos futuros** - apresenta as conclusões do trabalho e as perspectivas futuras para o projeto.

PROBLEMAS DA AGRICULTURA MODERNA

Ao longo dos últimos anos, dezenas de estudos a respeito dos problemas causados pela agricultura moderna foram realizados. Apesar dos grandes avanços nos setores de produção agrícola baseados na preocupação com o crescente aumento populacional e demanda por alimentos, uma análise a respeito das consequências desses avanços é necessária. Existem alguns fatores importantes que devem ser debatidos visando uma agricultura mais sustentável. Dentre eles, o questionamento de que se todos os hectares aptos ao plantio deveriam ser utilizados para maximizar a produção de alimentos para o ser humano, e as possíveis consequências dessa prática como, por exemplo, a modificação em larga escala do panorama ambiental. Além disso, mesmo que a produção agrícola atinja níveis adequados para o sustento da população mundial, problemas como a distribuição desigual desses alimentos permanecem.¹⁶

2.1 Insegurança alimentar

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO)*, o número de pessoas que se encontram em situação de fome ao redor do mundo aumentou por dois anos consecutivos, subindo de 811 milhões em 2017 para quase 820 milhões em 2018.¹⁷ Ao mesmo tempo, problemas como sobrepeso e obesidade continuam crescendo ao longo dos anos, evidenciando a atual distribuição irregular de alimentos. Ainda de acordo com a FAO de 2019,¹⁸ cerca de 9,2% da população mundial experienciam níveis severos de insegurança alimentar, o que significa que essa população não tem acesso regular a alimentos nutritivos e em quantidades suficientes. Ainda de acordo com esses dados, 2 bilhões de pessoas do mundo (26,4%) vivenciam a combinação de níveis moderados e severos de insegurança alimentar. Apenas no continente africano, os fatores supracitados chegam à 21,5% e 52,5%, respectivamente (Figura 2.1).

Visando mudar o cenário de subnutrição atual, a FAO elaborou um plano para erradicar a fome no mundo até o ano de 2030.¹⁸ Esse plano baseia-se em relatórios que analisam dados sobre o papel da desaceleração econômica nas tendências recentes de segurança alimentar e nutrição, buscando entender as tendências futuras da fome ao redor do mundo considerando as previsões mais recentes das perspectivas econômicas globais, como o crescimento econômico lento e

* Do inglês, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

estagnado em muitos países, incluindo economias emergentes e em desenvolvimento. Como possíveis soluções, esse plano aborda duas vertentes: a primeira, através de políticas econômicas e sociais que ajudem a combater os efeitos causados pelas desacelerações econômicas, como por exemplo a garantia de financiamento de redes de segurança social e acesso universal à saúde; a segunda, através de políticas multissetoriais que ajudem a combater as desigualdades existentes em todos os níveis, possibilitando uma saída mais sustentável para a insegurança alimentar.¹⁹

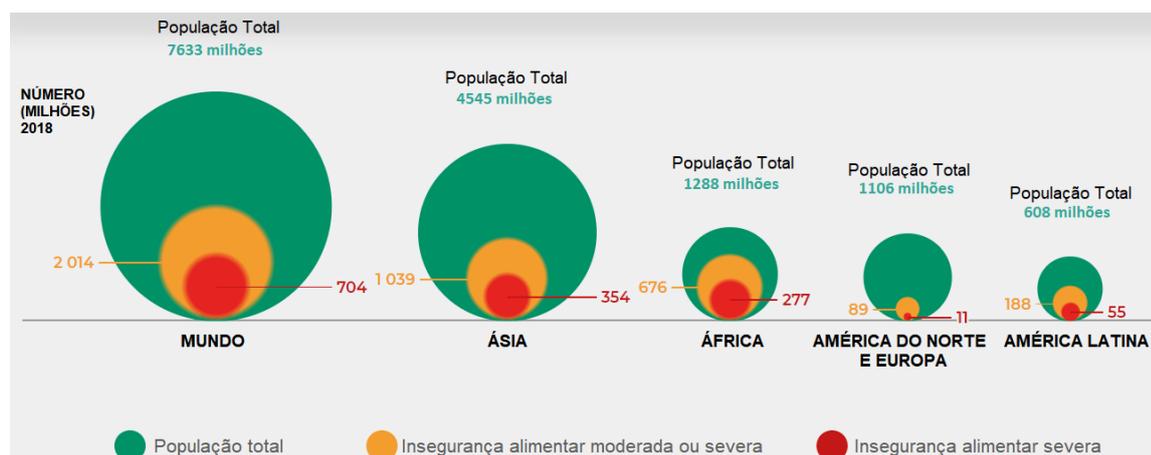


Figura 2.1 – Concentração e distribuição da insegurança alimentar por severidade entre as regiões do mundo.

Fonte: Adaptada de FAO.¹⁸

O Brasil, como membro fundador da FAO, tem colaborado nos últimos 70 anos para erradicar a fome, a insegurança alimentar e a subnutrição, e melhorar as condições de vida no meio rural.²⁰ Combinando o conhecimento desta fundação com as prioridades de desenvolvimento do país, foram elaboradas quatro prioridades:²¹

1. Segurança alimentar: inclui o acesso a uma alimentação saudável e adequada de forma permanente e sustentável, como articulado pela Política de Segurança Alimentar e Nutricional (SAN).
2. Cooperação Sul-Sul: inclui a criação de uma plataforma de cooperação para disseminação de boas práticas brasileiras voltadas para a segurança alimentar, agricultura, sicultura e pesca, agricultura familiar e adaptação às mudanças climáticas.
3. Superação da extrema pobreza: inclui o melhoramento de políticas públicas para promover a importância econômica da agricultura e aquicultura familiar, ampliar sua participação na estrutura econômica do país e com isso reduzir a pobreza de modo sustentável.
4. Gestão sustentável de recursos naturais: inclui a introdução da matriz de produção agroecológica para a sustentabilidade social e ambiental, visando o combate à desertificação através do uso de estratégias produtivas que levam em conta informações meteorológicas e os efeitos das mudanças climáticas.

Um dos fatores que mais contribuem para a insegurança alimentar é a desigualdade social. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), o Brasil ocupa a décima posição entre 140 países no *ranking* de nações desiguais.²² Esse fator torna-se mais evidente através da análise dos dados de 2017 da organização Oxfam Brasil,²³ responsável por apontar que cerca de 5% das famílias brasileiras possuem a mesma fatia de renda das demais 95%. Seguindo essa premissa, dados da Síntese de Indicadores Sociais (SIS) divulgados em 2019 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)²⁴ demonstram que aproximadamente 13,5 milhões de brasileiros viviam no ano de 2018 com renda mensal per capita inferior a R\$145, critério adotado pelo Banco Mundial para identificar a condição de extrema pobreza (Figura 2.2).

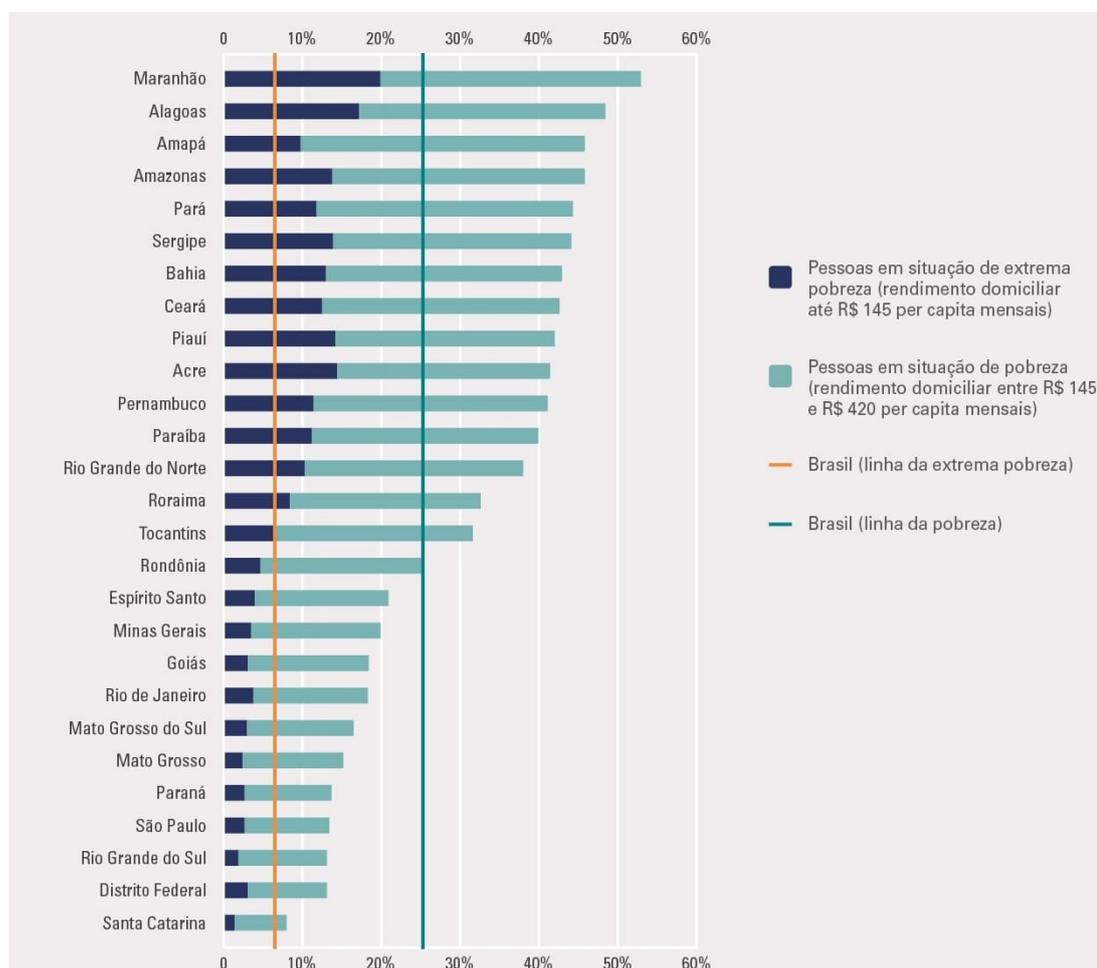


Figura 2.2 – Proporção de pessoas em condição de pobreza e extrema pobreza por unidade da federação.

Fonte: IBGE.²⁴

Na Figura 2.2, é possível observar que grande parte dos estados brasileiros cuja população encontra-se em situação de pobreza e/ou extrema pobreza pertencem às regiões Norte e Nordeste do país.²⁴ Nessas mesmas regiões, famílias que dependem da agricultura familiar como forma de sustento carecem de novas tecnologias, seja por fatores socioeconômicos ou por fatores sistêmicos como o acesso ao crédito rural e assistências técnicas.²⁵ Dessa forma, as prioridades dois e quatro do plano da FAO devem ser aplicadas visando melhorar a agricultura no Brasil e, em especial, nas regiões Norte e Nordeste.

2.2 Agrotóxicos

O desenvolvimento científico do século XX foi responsável por apresentar diversas tecnologias voltadas para a agricultura visando impulsionar o crescimento econômico e prover melhorias na qualidade de vida da sociedade. Essas tecnologias vão desde a criação de cultivares transgênicos, pesquisas nas áreas de biotecnologia e melhoramento genético, até o desenvolvimento de novos agrotóxicos.²⁶ Entretanto, as consequências do uso exarcebado dessas substâncias nas lavouras brasileiras, assim como o uso indiscriminado de fertilizantes, vêm sendo reportadas em casos de intoxicação de trabalhadores rurais,²⁷⁻³¹ contaminação de alimentos,³²⁻³⁴ e poluição ambiental.³⁵⁻³⁹

Conforme o artigo 2º da lei Nº 7.802 de 11 de julho de 1989,⁴⁰ os agrotóxicos são classificados como:

"a) produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou implantadas, e de outros ecossistemas e também de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos".

"b) substâncias e produtos, empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento".

De acordo com o Instituto Nacional de Câncer (INCA), os principais afetados pela exposição aos agrotóxicos são os agricultores e trabalhadores da indústria de agrotóxicos, uma vez que esses estão em contato direto com essas substâncias durante os processos de manipulação e aplicação.⁴¹ Entretanto, a contaminação da água e de alimentos por agrotóxicos expande o alcance desses compostos, tornando toda a população suscetível à exposição. Ainda de acordo com o INCA,⁴¹ os efeitos da exposição aos agrotóxicos se dividem em efeitos agudos, como irritações na pele, ardência do nariz e boca, tosse, náuseas e vômitos e efeitos crônicos, como esquecimento, depressão, problemas respiratórios graves, entre outros. Apesar de não comprovada a associação entre a exposição à agrotóxicos e o desenvolvimento de câncer, inúmeros estudos vêm reportando incidências maiores de câncer em trabalhadores rurais expostos à esses compostos,⁴²⁻⁴⁵ que muitas vezes podem atuar como iniciadores e/ou promotores tumorais.⁴⁶

Os agrotóxicos podem ser classificados como inseticidas, fungicidas, herbicidas, raticidas, acaricidas, desfolhantes, entre inúmeros outros dependendo do alvo de ação, e em diferentes categorias de toxicidade (Figura 2.3). Essa classificação é feita pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), responsável por disponibilizar resultados de avaliações toxicológicas dos ingredientes ativos destinados aos usos agrícolas e não agrícolas através de monografias autorizadas.^{47,48} Além disso, a ANVISA também apresenta monografias excluídas que atualmente não possuem autorização de uso no Brasil.⁴⁹

| | CATEGORIA 1 | CATEGORIA 2 | CATEGORIA 3 | CATEGORIA 4 | CATEGORIA 5 | NÃO CLASSIFICADO |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---|------------------|
| | EXTREMAMENTE TÓXICO | ALTAMENTE TÓXICO | MODERADAMENTE TÓXICO | POUCO TÓXICO | IMPROVÁVEL CAUSAR DANO AGUDO | NÃO CLASSIFICADO |
| PICTOGRAMA | | | | | Sem símbolo | Sem símbolo |
| PALAVRA DE ADVERTÊNCIA | PERIGO | PERIGO | PERIGO | CUIDADO | CUIDADO | Sem advertência |
| CLASSE DE PERIGO | | | | | | |
| ORAL | Fatal se ingerido | Fatal se ingerido | Tóxico se ingerido | Nocivo se ingerido | Pode ser perigoso se ingerido | - |
| DÉRMICA | Fatal em contato com a pele | Fatal em contato com a pele | Tóxico em contato com a pele | Nocivo em contato com a pele | Pode ser perigoso em contato com a pele | - |
| INALATÓRIA | Fatal se inalado | Fatal se inalado | Tóxico se inalado | Nocivo se inalado | Pode ser perigoso se inalado | - |
| COR DA FAIXA | VERMELHO | VERMELHO | AMARELO | AZUL | AZUL | VERDE |

Figura 2.3 – Classificação dos agrotóxicos de acordo com a toxicidade.

Fonte: INCA.⁴¹

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), o Brasil é o maior consumidor mundial de agrotóxicos. Através dos Indicadores Ambientais Nacionais,⁵⁰ o Ministério do Meio Ambiente descreve a quantidade anual comercializada de agrotóxicos por classe de periculosidade ambiental, em toneladas de ingrediente ativo (IA).⁵⁰ As classes dividem-se em: Classe I - produto altamente perigoso ao meio ambiente; Classe II - produto muito perigoso ao meio ambiente; Classe III - produto perigoso ao meio ambiente; e Classe IV - produto pouco perigoso ao meio ambiente.⁵⁰ Visando monitorar o crescimento das importações, exportações e vendas de agrotóxicos no Brasil, o IBAMA elabora boletins anuais (Figura 2.4) com base nos dados contidos nos relatórios semestrais apresentados pelas empresas detentoras de registros desses produtos, conforme exigido pelo artigo 41 do Decreto Nº 4074 de 4 de janeiro de 2002.⁵¹ No boletim de 2018, a venda de produtos rotulados como "Químicos e Bioquímicos" atingiu o valor de 549.280,44 toneladas de ingredientes ativos, demonstrando um aumento de 1,72% quando comparado com 2017.⁵²

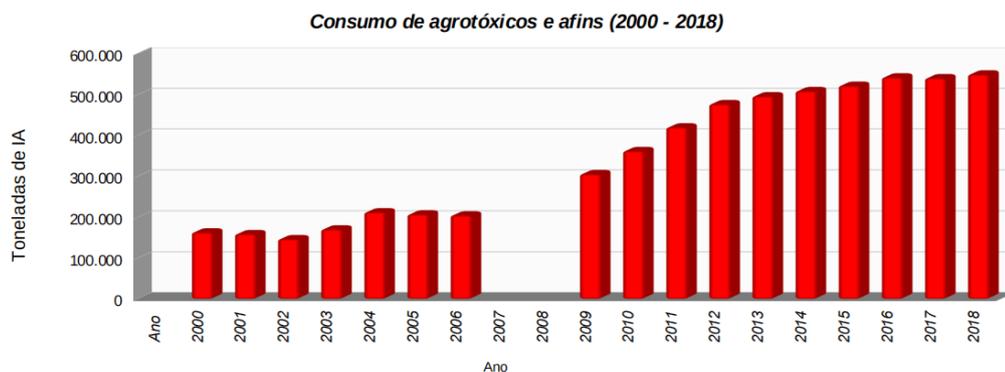


Figura 2.4 – Consolidação de dados fornecidos pelas empresas registrantes de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme artigo 41 do Decreto 4.074/2002, pelo IBAMA no Brasil.

Fonte: IBAMA.⁵²

No banco de dados do site Agrolink,⁵³ existem centenas de agrotóxicos e defensivos agrícolas cadastrados que podem ser utilizados para o manejo de lavouras de soja. Dentre os mais utilizados no Brasil e no mundo, o glifosato (N-fosfometil glicina) destaca-se como campeão de vendas, seguido do 2,4-D, mancozebe e acefato.⁵⁴ O glifosato é um herbicida capaz de controlar mais de 150 espécies de plantas daninhas, e pode ser utilizado em diversas culturas.⁵⁴ Seu modo de ação e eficácia baseiam-se na sua rápida translocação das folhas para as raízes, rizomas e meristemas apicais, inibindo a síntese da enzima 5-enolpiruvil-chiquimato-3-fosfatossintase e consequentemente impedindo a síntese de três aminoácidos essenciais, resultando na morte das plantas daninhas.⁵⁵ Devido ao fato da absorção do glifosato ser pelas folhas, sua aplicação na maioria das culturas é feita através da pulverização.⁵⁶

Para contornar o problema do glifosato e de outros herbicidas também atuarem no cultivo principal das lavouras, com o passar do tempo foram realizados diversos estudos de melhoramentos genéticos de cultivares e criação de Organismos Geneticamente Modificados (OGMs), também conhecidos como transgênicos, que apresentassem resistência à esses agrotóxicos.^{57,58} A tecnologia de resistência ao glifosato mais conhecida é a Roundup Ready[®],⁵⁹ desenvolvida em 1980 pela Monsanto para soja e expandida ao longo dos anos para outras culturas.^{60,61} Entretanto, existem diversas polêmicas à respeito da segurança alimentar de alimentos transgênicos,⁶² o direito do consumidor de saber a procedência dos alimentos que ingere⁶³ e a cientificidade ou não do Princípio de Equivalência Substancial (PES), que afirma que os OGMs são quimicamente equivalentes aos organismos obtidos por meio de técnicas convencionais de melhoramento genético.⁶⁴

Apesar de todos os problemas supracitados, vale salientar que a produção agrícola é extremamente dependente do uso de agrotóxicos e defensivos agrícolas para atingir as demandas de alimentos atuais.⁶⁵ Dessa forma, é imprescindível que haja o manejo adequado dessas substâncias, respeitando as concentrações de aplicação impostas pelos fabricantes e principalmente visando a proteção adequada dos trabalhadores rurais com Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), que na maioria das vezes não são fornecidos ou, quando fornecidos, utilizados de maneira incorreta.⁶⁶⁻⁶⁹ Além disso, a busca por novas metodologias para a agricultura moderna consideradas mais sustentáveis deve ser uma das prioridades na área de pesquisas acadêmicas e industriais. Dentre essas tecnologias,^{70,71} produtos biológicos de composição 100% natural e/ou com uso de microrganismos benéficos têm sido usados no controle biológico de pragas e nutrição do solo.^{72,73} Como exemplo, é possível citar o fungicida e bactericida natural de amplo espectro Timorex Gold[®], desenvolvido pela empresa STK usando o extrato da planta *Melaleuca alternifolia*,⁷⁴ responsável por romper a membrana celular de fungos, interferir na virulência de patógenos bacterianos e inibir a germinação de esporos em alguns patógenos.⁷⁵ Também é possível citar as soluções biológicas desenvolvidas pela empresa Stoller,⁷⁰ asseguradas como orgânicas e sustentáveis com diversas certificações, como por exemplo o Rizotec[®], composto por clamidósporos do fungo *Pochonia chlamydosporia* e responsável pelo controle biológico de nematóides.⁷⁶ Entretanto, o uso dessas tecnologias tem se intensificado apenas nos últimos anos,

tornando necessária a busca por outros métodos também sustentáveis e que complementem os resultados obtidos por produtos biológicos.

2.3 Modificação do panorama e poluição ambiental

Outra grande preocupação da agricultura moderna são seus impactos causados no meio ambiente.^{77,78} Esses impactos vão desde a modificação do panorama ambiental, com grandes áreas sendo devastadas para instauração de lavouras, até a poluição de rios, lençóis freáticos³⁶ e a contaminação de peixes pelo descarte incorreto de agrotóxicos.⁷⁹⁻⁸¹ Além disso, o constante desmatamento e uso de defensivos agrícolas são reportados como responsáveis por causarem desequilíbrios na fauna e na flora de ecossistemas,³⁵ seja pela extinção de espécies de plantas e animais ou até mesmo pela criação de pragas resistentes às substâncias amplamente utilizadas no manejo das lavouras.⁸²

No Brasil, o Ministério da Agricultura e Pecuária utilizou dados da Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (NASA)[†] em 2017 para reportar que a área territorial ocupada pela produção agrícola era de 7,8% (65.913.738 hectares), enquanto que a área cuja vegetação nativa foi preservada era de 66%, demonstrando que o país procura preservar seu ecossistema.⁸³ De qualquer maneira, o monitoramento do desmatamento de reservas naturais e florestas para expansão da agricultura deve ter sua prioridade aumentada, principalmente em regiões como a da floresta Amazônica.^{84,85} A Figura 2.5 mostra a ocupação da área terrestre de acordo com a classe de uso da terra para todos os continentes e para o mundo no ano de 2010.⁸⁶ Nesta imagem, o termo "outros" se referem à todas as terras que não pertencem às classificações "Agricultura" e "Florestas".

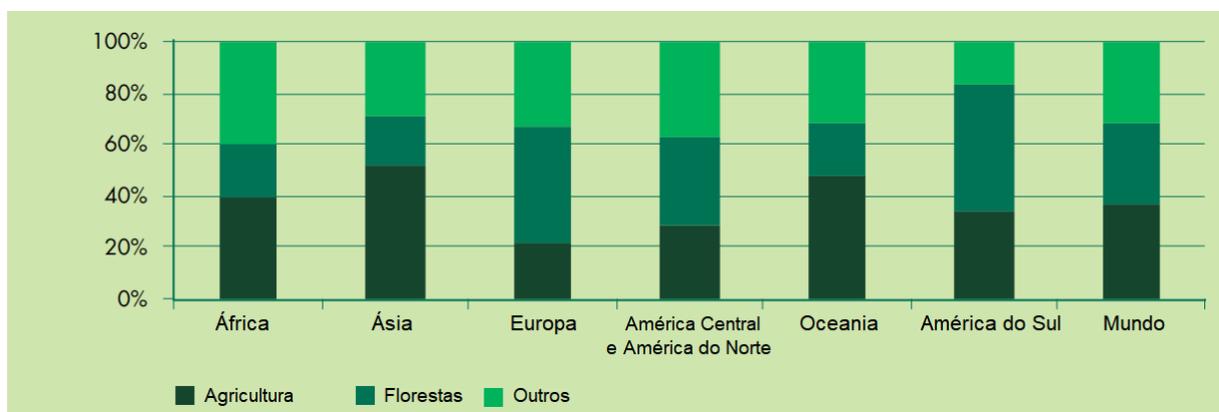


Figura 2.5 – Área terrestre por classe de uso da terra - 2010.

Fonte: Adaptada de FAO.⁸⁶

[†] Do inglês, *National Aeronautics and Space Administration*.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), órgão vinculado ao Ministério do Desenvolvimento Regional, a agropecuária utiliza 70% do consumo de água doce do país, sendo que aproximadamente metade dessa quantidade é desperdiçada.⁸⁷ Esse desperdício é causado principalmente por irrigações mal executadas e pela falta de controle dos produtores rurais da quantidade de água necessária para o manejo das lavouras e o processamento de produtos. Como os rios e lençóis freáticos utilizados para suprir a demanda de água nesses processos são dependentes da água proveniente de chuvas, os impactos no ecossistema no período de secas são extramente negativos.⁸⁸ Na Figura 2.6, é possível observar o aumento das áreas irrigadas (em milhões de hectares) nas regiões do Brasil entre 1960 e 2015, de acordo com dados da base técnica ATLAS Irrigação da Agência Nacional de Águas.⁸⁹

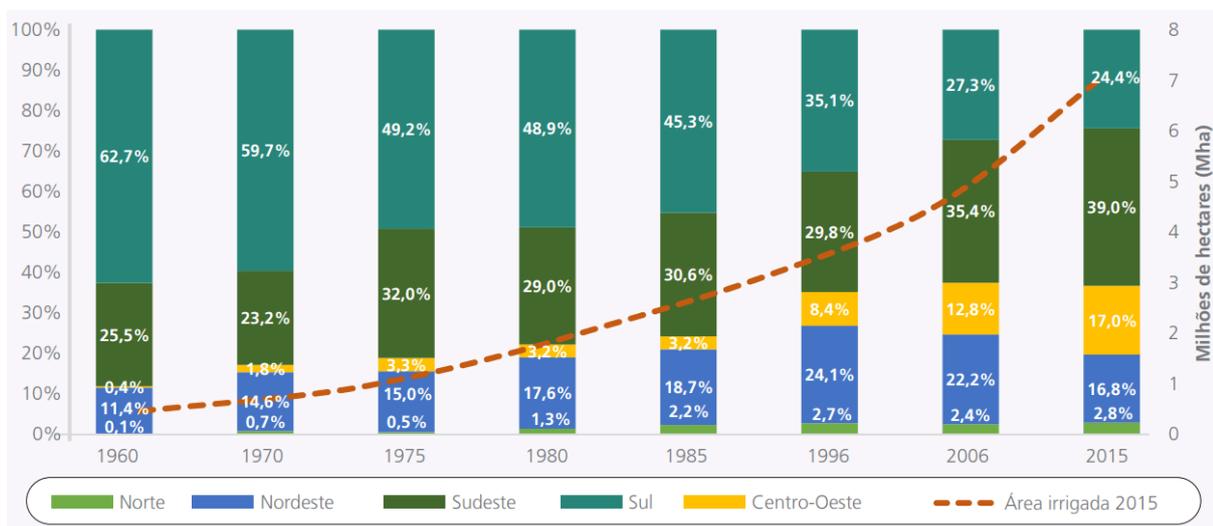


Figura 2.6 – Área irrigada total e participação das regiões - 1960-2015.

Fonte: ATLAS IRRIGAÇÃO.⁸⁹

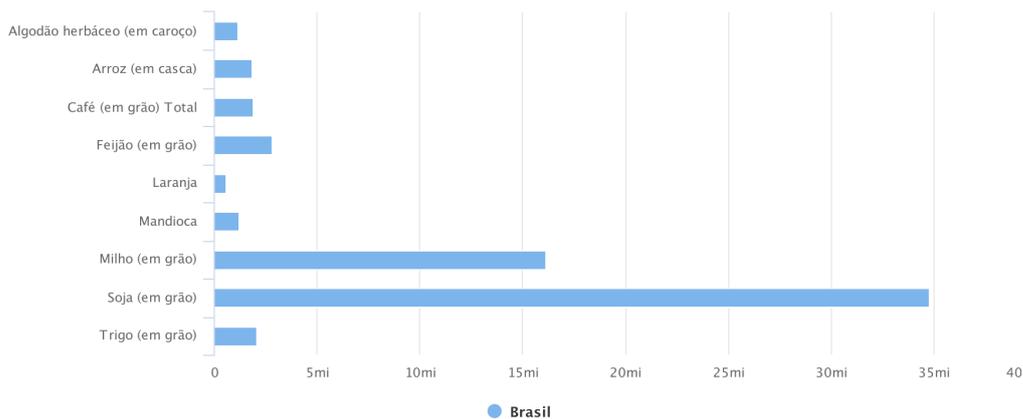
Dessa forma, é imprescindível que a agricultura do futuro tenha como um dos seus pilares fundamentais o uso racional da água, seja pela pesquisa e desenvolvimento de plantas mais resistentes ao estresse hídrico, sistemas de irrigação otimizados, sistemas de captação das águas pluviais e práticas de proteção do solo.⁹⁰ A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) tem participado no desenvolvimento de inúmeras soluções tecnológicas para o desperdício de água na agropecuária.⁹¹ Dentre elas, é possível citar a criação de sistemas de irrigação de baixo custo para agricultura familiar,⁹² produção de frutas com uso de água da chuva armazenada em cisternas,⁹³ barragens subterrâneas,⁹⁴ posicionamento de sensores de água do solo para aumento da eficiência do manejo da água de irrigação,⁹⁵ simuladores de chuva para educar os produtores com relação ao potencial erosivo,⁹⁶ entre diversas outras tecnologias.

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA AGRICULTURA

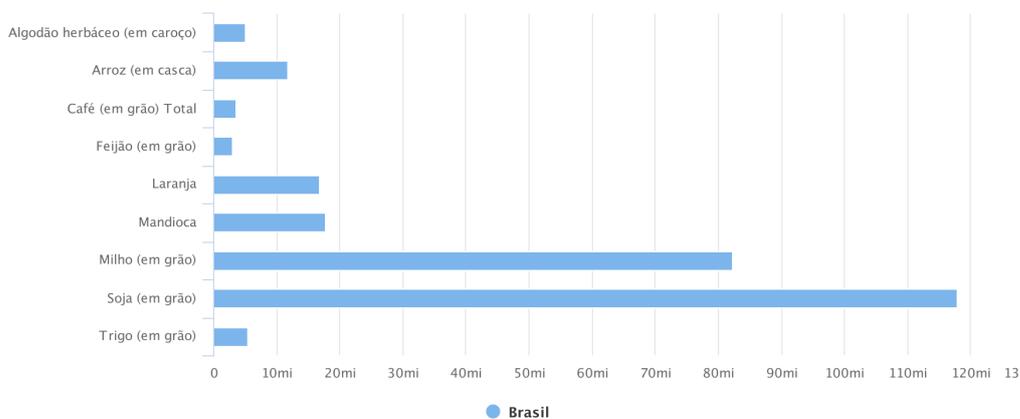
3.1 Agronegócio no Brasil

Nos últimos 40 anos, o Brasil sofreu uma grande transformação em sua produção agrícola, passando de uma condição de importador de alimentos para se tornar um dos maiores provedores.⁹⁷ Esses avanços foram possíveis devido à aumentos significativos na produtividade não só da agricultura, mas também da pecuária, em especial nos setores de produção de soja e criação bovina, responsáveis por movimentar grandes parcelas do Produto Interno Bruto (PIB).⁹⁸ De acordo com dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP) em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA),⁹⁹ o PIB do agronegócio brasileiro cresceu 3,81% em 2019, representando 21,4% do PIB brasileiro.

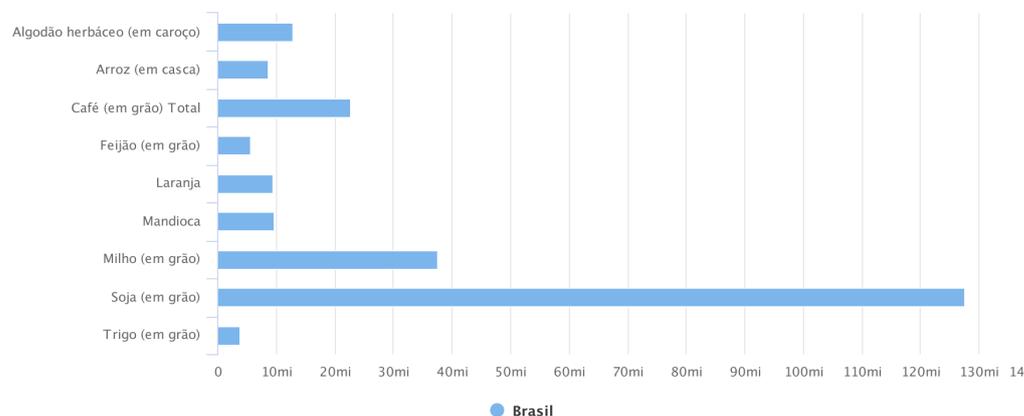
Outros dados importantes são os obtidos pela pesquisa realizada pelo IBGE através da Produção Agrícola Municipal (PAM), criada em 1983 pelo Ministério da Agricultura e responsável por levantar informações sobre área plantada, área destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e preço médio pago ao produtor no ano de referência de 64 produtos agrícolas, dividindo-se em culturas temporárias e culturas permanentes.² Os resultados mais recentes dessa pesquisa foram publicados em 2018 e exemplificam a importância da agricultura para o país através de gráficos de área colhida em hectares (Figura 3.1a), quantidade produzida em toneladas (Figura 3.1b) e valor da produção em reais (Figura 3.1c) para diversas culturas.¹⁰⁰ Na Figura 3.1a, é possível observar que a área colhida total para as culturas apresentadas totaliza um valor de 62,467 milhões de hectares, sendo essas lideradas pela soja em grãos com 34,771 milhões de hectares, seguida do milho em grãos com 16,121 milhões de hectares. Como esperado, o mesmo padrão se repete na Figura 3.1b para a quantidade produzida, com a soja em primeiro lugar com 117,887 milhões de toneladas produzidas e o milho em segundo lugar com 82,288 milhões de toneladas produzidas. Neste caso, a soma de todas as culturas resulta em um valor de 263,129 milhões de toneladas produzidas. Por fim, a Figura 3.1c mostra o valor da produção dessas culturas, no qual a soja contribuiu com 127,5 bilhões de reais, seguida do milho com 37,6 bilhões e do café com 22,6 bilhões. O total do valor da produção dessas culturas foi de aproximadamente 237,9 bilhões de toneladas no ano de 2018.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1 – Área colhida, quantidade produzida e valor da produção para diversas culturas no ano de 2018. (a) Área colhida (hectares). (b) Quantidade produzida (toneladas). (c) Valor da produção (mil reais).

Fonte: PAM.¹⁰⁰

Além da produção volumosa de alimentos, o agronegócio movimentava o mercado brasileiro no segmento industrial através das agroindústrias, como os setores responsáveis pela produção de celulose e papel, biocombustíveis, tecidos, açúcar, óleos vegetais, entre outros. No ano de 2019 a agroindústria cresceu cerca de 4,99%, valor consideravelmente mais alto do que no ano anterior (0,75%).¹⁰¹ Na safra 2019/2020, por exemplo, a produção de etanol apresentou

aumento de 7,21% quando comparada com a safra anterior devido à maior participação do etanol proveniente do milho, a produção de açúcar apresentou alta de 3,82% e a indústria de conservas de frutas, legumes e outros vegetais apresentou alta de 30,3% (Figura 3.2).¹⁰¹

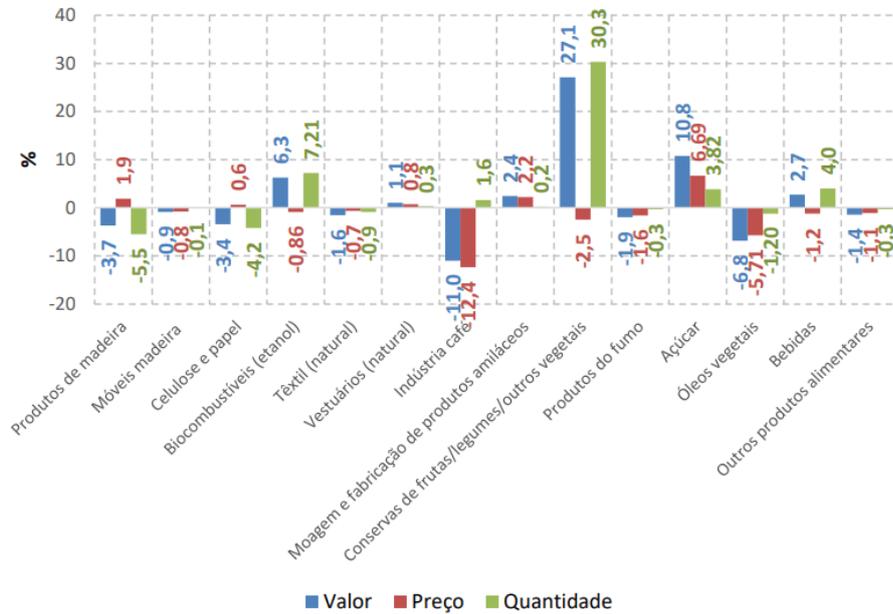


Figura 3.2 – Agroindústrias de base agrícola: variação anual do volume, preços reais e faturamento das indústrias agrícolas.

Fonte: CEPEA.¹⁰¹

Dentre as características que permitem que um país tenha a agricultura como um de seus principais fatores econômicos, destacam-se os fatores climáticos e a qualidade do solo. O Brasil é um país de clima diversificado, predominando os climas tropical e equatorial, com temperaturas ideais para o crescimento da maioria das culturas existentes ao redor do mundo. Os fatores meteorológicos, como a temperatura e umidade do ar, precipitação, radiação solar e fotoperíodo, são extremamente importantes e afetam diretamente ou indiretamente, dependendo do fator, as etapas de germinação, crescimento, desenvolvimento, obtenção de energia e produtividade das culturas.¹⁰² Com relação à qualidade do solo, é importante ressaltar que a vasta extensão territorial do Brasil apresenta solos de composições diferentes.¹⁰³ Para melhor organização dessas informações, a EMBRAPA produziu o documento Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) que organiza os 13 diferentes tipos de solos brasileiros em classes, de acordo com suas características químicas, físicas e morfológicas.¹⁰⁴ Dentre essas classes, é possível citar os solos Argilosos, Latossolos e Neossolos, que juntos se distribuem em cerca de 70% do território nacional.¹⁰³ Visando melhorar a fertilidade do solo e a nutrição das plantas, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento elaborou 36 Fichas Agroecológicas com instruções para o uso de diversos biofertilizantes e compostos orgânicos na adubação do solo.¹⁰⁵

3.2 Soja (*Glycine max*)

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é uma planta herbácea, da classe Rosidae, ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Papilionoidea, tribo Phaseoleae, gênero *Glycine* L., espécie *max*. Foi introduzida sem sucesso no Brasil em 1882 na Bahia e apenas em 1949 o país destacou-se pela primeira vez nas estatísticas mundiais com a produção de 25 mil toneladas de soja.¹⁰² Em sua composição, é possível encontrar cerca de 45% de proteínas, 25% de teor de óleo, 30% de carboidratos e uma quantidade significativa de aminoácidos.¹⁰⁶ Por essas razões, a soja passou a ser vista como uma leguminosa extramamente indicada para a alimentação humana e animal e para a produção de óleo de soja ao redor do mundo.¹⁰⁷ As plantas de soja apresentam caule híspido, raízes com eixo principal e diversas ramificações, flores de fecundação autógama, desenvolvimento de vagens e folhas trifolioladas, com exceção do primeiro par de folhas unifolioladas. O hábito de crescimento das plantas é um dos importantes fatores que diferenciam as diversas cultivares existentes, dividindo-se em indeterminado, semideterminado e determinado, sendo o último o mais comum nas cultivares brasileiras e identificado pelo início do florescimento e desenvolvimento de vagens e fim da ramificação das plantas.¹⁰² A estrutura de uma planta de soja pode ser vista na Figura 3.3.

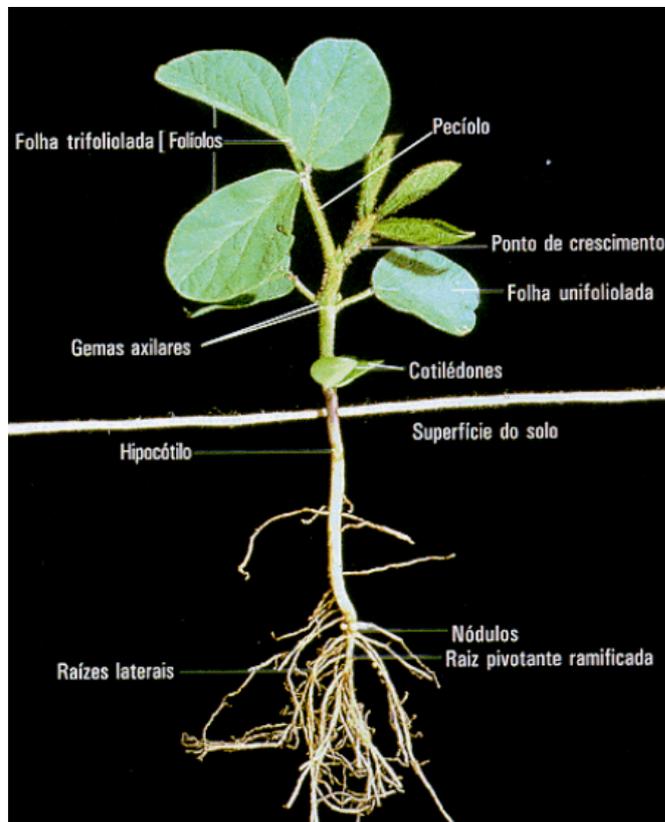


Figura 3.3 – Estrutura de uma planta de soja.

Fonte: RITCHIE.¹⁰⁸

O crescimento das plantas é dividido em duas fases: a fase vegetativa (V) e a reprodutiva (R). Os estádios vegetativos englobam a emergência (V_E), a abertura dos cotilédones (V_C) e a posterior formação dos nós vegetativos (V_n) (parte do caule onde a folha se desenvolve), onde n representa o número do último nó vegetativo formado.¹⁰⁹ Em uma planta no estágio vegetativo (V_2), por exemplo, os folíolos do primeiro nó (unifoliolado) ao terceiro nó (trifoliolado) estão desenrolados. A divisão dos estádios de desenvolvimento pode ser vista na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Estádios vegetativos e reprodutivos da soja.

| Estádios vegetativos | Estádios reprodutivos |
|--|---|
| V_E - Emergência dos cotilédones acima da superfície do solo | R_1 - Início do florescimento |
| V_C - Cotilédones completamente abertos | R_2 - Pleno florescimento |
| V_1 - Folhas unifolioladas completamente desenvolvidas | R_3 - Início da formação das vagens |
| V_2 - Primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida | R_4 - Plena formação das vagens |
| V_3 - Segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida | R_5 - Início do enchimento das sementes |
| * | R_6 - Pleno enchimento das vagens |
| * | R_7 - Início da maturação |
| V_n - Ante-enésima folha trifoliolada completamente desenvolvida | R_8 - Maturação plena |

Fonte: Adaptada de FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER.¹⁰⁹

A importância econômica da soja para o PIB agropecuário do Brasil pode ser observada nos dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA),¹¹⁰ demonstrando que esse setor continua destacando-se positivamente com previsão de crescimento de 6,4% no ano de 2020 e apresentando o maior peso (26%) no PIB agropecuário (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Previsões para a taxa de crescimento do PIB agropecuário (%) por segmento e por produto (2020).

| Produto | Previsão da taxa de crescimento (%) | Peso no PIB agropecuário (%) | Contribuição para o PIB (em p.p.) |
|---|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| PIB Agropecuário | 2,4 | 100,0 | 2,4 |
| Agricultura | 2,8 | 67,3 | 1,9 |
| Arroz em casca | 3,6 | 1,3 | 0,0 |
| Milho em grão | -3,5 | 6,1 | -0,2 |
| Trigo em grão e outros cereais | -6,5 | 0,8 | -0,1 |
| Cana-de-açúcar | 0,8 | 9,6 | 0,1 |
| Soja em grão | 6,4 | 26,0 | 1,7 |
| Outros produtos e serviços da lavoura | -1,7 | 11,9 | -0,2 |
| Mandioca | 0,7 | 1,6 | 0,0 |
| Fumo em folha | -7,9 | 1,2 | -0,1 |
| Algodão herbáceo e outras fibras | -2,1 | 2,7 | -0,1 |
| Laranja | 4,4 | 1,8 | 0,1 |
| Café em grão | 15,4 | 4,1 | 0,6 |
| Pecuária | 2,0 | 25,7 | 0,5 |
| Bovinos e outros animais vivos | 1,1 | 13,3 | 0,1 |
| Leite de vaca e de outros animais | 2,9 | 5,2 | 0,1 |
| Suínos vivos | 3,9 | 1,6 | 0,1 |
| Aves vivas | 0,6 | 3,0 | 0,0 |
| Ovos de galinha e de outras aves | 5,4 | 2,6 | 0,1 |
| Outros | -0,6 | 6,9 | 0,0 |
| Produtos da exploração florestal e da sicultura | -1,2 | 4,3 | -0,1 |
| Pesca e agricultura | 0,5 | 2,7 | 0,0 |

Fonte: Adaptada de IPEA.¹¹⁰

Além disso, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA)* estima que o Brasil irá ultrapassar os Estados Unidos na safra 2019/20 e irá ocupar a posição de maior produtor de soja do mundo pela primeira vez.¹¹¹ De acordo com dados da safra 2019/20, o

* Do inglês, *United States Department of Agriculture*.

Brasil produziu no mês de abril cerca de 124,50 milhões de toneladas de soja, apresentando um aumento de 6,41% quando comparado com o mesmo período na safra 2018/19, resultado da inserção de novas tecnologias no campo. Em segundo lugar na lista dos maiores produtores da leguminosa, os Estados Unidos produziu cerca de 96,84 milhões de toneladas de soja na safra 2019/20, com queda de aproximadamente 20% quando comparado com a safra 2018/19 (Tabela 3.3).¹¹¹

Tabela 3.3 – Produção de soja (em milhões de toneladas) das safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 (abril) dos maiores produtores de soja do mundo.

| Países | Safra 2017/18 | Safra 2018/19 | Safra 2019/20 (Abril) | Varição - 2019/20 e 2018/19 |
|----------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------------|
| Mundo | 342,09 | 358,65 | 338,08 | -5,74% |
| Brasil | 122,00 | 117,00 | 124,50 | 6,41% |
| Estados Unidos | 120,07 | 120,52 | 96,84 | -19,65% |
| Argentina | 37,80 | 55,30 | 52,00 | -5,97% |
| China | 15,28 | 15,97 | 18,10 | 13,34% |
| Paraguai | 10,48 | 8,85 | 9,90 | 11,86% |
| Outros | 36,46 | 41,01 | 36,74 | -10,41% |

Fonte: Adaptada de USDA.¹¹¹

Como é possível ver na Tabela 3.3, o Brasil destaca-se como um dos maiores produtores de soja do mundo. Entretanto, é possível observar que houve uma queda na produção (em toneladas) ao redor do mundo na safra 2019/20 quando comparada com a safra 2018/19, principalmente nos Estados Unidos, que até então ocupava o cargo de maior produtor mundial. De acordo com os dados divulgados pelo USDA,¹¹¹ a queda de 5,74% da produção mundial de soja pode ser justificada pela diminuição da área de plantio de 125,64 milhões de hectares para 121,87, em especial nos Estados Unidos cuja queda na área de plantio foi de 35,45 milhões de hectares para 30,36, com diminuição do rendimento da produção de 3,40 toneladas métricas por hectare para 3,19 e conseqüentemente da produção final de 120,52 milhões de toneladas para 96,84. Dada sua importância, é extremamente necessária a realização de pesquisas científicas e desenvolvimento de novas metodologias visando aumentar a produtividade da soja ao redor do mundo sem necessariamente expandir as áreas de produção, sejam essas tecnologias relacionadas à modificação e adaptação de novas cultivares, desenvolvimento de novas tecnologias não prejudiciais ao meio ambiente como, por exemplo, bioestimulantes para promoção de crescimento nas plantas, nutrição adequada do solo, aplicação de métodos físicos, entre outros.

MÉTODOS FÍSICOS COMO ALTERNATIVAS

A luz é uma radiação eletromagnética composta por um campo elétrico (\vec{E}) e um campo magnético (\vec{B}) que oscilam perpendicularmente entre si de acordo com uma função senoidal, com vetor de propagação (\vec{s}) perpendicular à direção de oscilação dos dois campos e velocidade $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ no vácuo.¹¹² O espectro da radiação eletromagnética (Tabela 4.1) é dividido em comprimentos de onda λ (nm), que por sua vez relacionam-se com as frequências ν (Hz) e com a velocidade da luz c (m/s) através da Equação 4.1:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4.1)$$

Além disso, a descoberta do efeito fotoelétrico permitiu o entendimento da discretização da energia, ou seja, que a radiação eletromagnética é composta por pacotes de energia múltiplos de uma quantidade elementar (posteriormente nomeada como fóton) que relacionam-se com as frequências de acordo com a Equação 4.2, onde E é a energia da radiação (J), h é a constante de Planck ($6,62618 \times 10^{-34} \text{ J/s}$) e ν a frequência da radiação (Hz), como visto anteriormente.¹¹²

$$E = h\nu \quad (4.2)$$

Tabela 4.1 – Espectro da radiação eletromagnética.

| Tipo de radiação | Comprimento de onda |
|------------------|---------------------|
| Raios gama | 0.01-0.1 nm |
| Raios X | < 30 nm |
| Ultravioleta | < 400 nm |
| Violeta | 415 nm |
| Azul | 465 nm |
| Vinho | 500 nm |
| Verde | 535 nm |
| Amarelo | 580 nm |
| Laranja | 615 nm |
| Vermelho | 680 nm |
| Infravermelho | 700-1000 nm |
| Micro-ondas | < 1 m |
| Ondas de rádio | > 1000 m |

Fonte: Adaptada de GONZÁLEZ.¹¹³

Radiações de baixo comprimento de onda como os raios X ($< 30 \text{ nm}$) estão relacionadas com altas frequências e conseqüentemente são mais energéticas, sendo adequadas para experimentos de difração na área de cristalografia de proteínas para o estudo da estrutura tridimensional de macromoléculas.¹¹⁴ A radiação UV-C ($100 - 280 \text{ nm}$) é amplamente utilizada em processos de descontaminação de equipamentos e amostras, e em diversos outros procedimentos para eliminar microrganismos indesejados.¹¹⁵ Radiações do espectro visível ($400 - 700 \text{ nm}$) são eficazes nos processos de geração de espécies reativas de oxigênio para fotoinativação de microrganismos após a irradiação de um fotossensibilizador na área de terapia fotodinâmica.¹¹⁶

4.1 Fotorreceptores

A luz solar é a principal fonte de energia das plantas, uma vez que essas são capazes de converter a energia luminosa em energia química através do processo conhecido como fotossíntese. Essa conversão só é possível devido à existência de pigmentos fotossintéticos localizados nos tilacóides dos cloroplastos, predominando em maiores concentrações a clorofila **a**, com picos de absorção nas regiões de 428 e 660 nm (azul e vermelho, respectivamente), seguida dos pigmentos acessórios clorofila **b** e carotenóides, com picos de absorção em 452 e $641,8 \text{ nm}$ e 454 e 474 nm , respectivamente.¹¹⁷ Além desses pigmentos, existem proteínas fotorreceptoras como a família de proteínas das fototropinas, ativadas por luz UV-A e azul e encarregadas de diversos processos visando a otimização da eficiência fotossintética. Isso acontece através do direcionamento do movimento dos cloroplastos dentro das células, posicionamento e expansão das folhas para aumentar a superfície irradiada pelo sol e controle da abertura dos poros estomáticos.¹¹⁸ Outra classe importante são os criptocromos, fotorreceptores pertencentes à classe das flavoproteínas que também absorvem luz UV-A e azul, mas atuam em processos como o do ritmo circadiano, ciclo biológico com período de 24 horas existente em quase todos os seres vivos.¹¹⁹

Os fitocromos são uma família de fotorreceptores constituídos por uma apoproteína ligada ao cromóforo fitocromobilina e estão diretamente envolvidos em etapas fundamentais da percepção de luz pelas plantas.¹²⁰ A forma inativa, chamada de P_r , é sintetizada no citosol e quando absorve luz de comprimento de onda 660 nm converte-se na forma ativa P_{fr} , translocada para o núcleo da célula.¹² Após a absorção de luz de comprimento de onda 730 nm , o fitocromo retorna à sua forma inativa. Uma vez que ambos os comprimentos de onda supracitados estão presentes na radiação solar, ambas as formas encontram-se em equilíbrio nas plantas ao longo do dia. De acordo com a literatura, os fitocromos estão relacionados com os processos de germinação, floração e percepção de fotoperíodo,¹²¹⁻¹²³ sendo extremamente importantes para o

desenvolvimento das plantas. A Figura 4.1 resume as etapas de desenvolvimento das plantas em que os fotorreceptores fototropinas, criptocromos e fitocromos estão envolvidos.

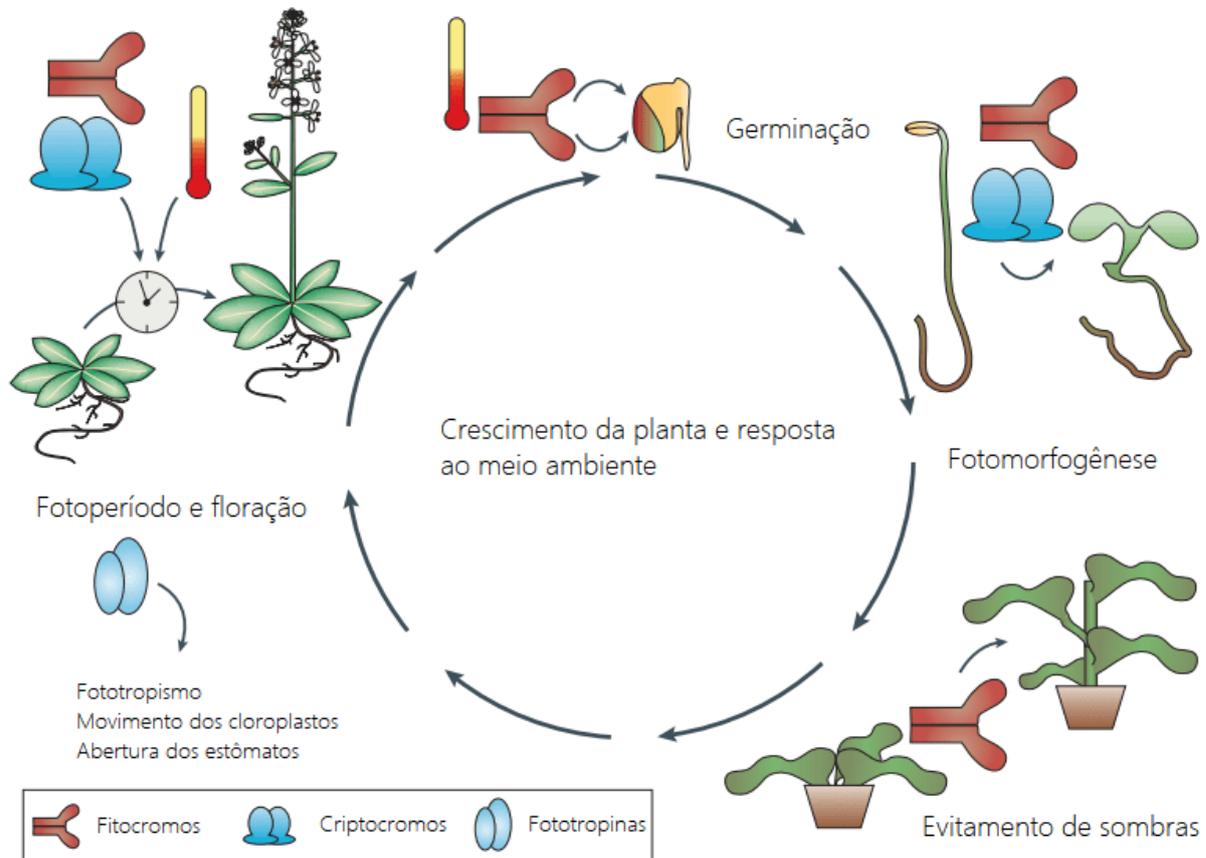


Figura 4.1 – Desenvolvimento de plantas regulado pela luz.

Fonte: Adaptada de JIAO; LAU; DENG.¹²²

O processo de germinação de sementes da espécie *Arabidopsis thaliana* é mostrado na parte superior da Figura 4.1. Quando em condições ambientais desfavoráveis, as sementes da maioria das culturas existentes permanecem em um estado conhecido como dormência, onde não há germinação. Sob condições adequadas como luz, temperatura e disponibilidade de nutrientes, as sementes iniciam o processo de germinação.¹²² Este processo é induzido pela incidência de luz vermelha em baixas fluências no fitocromo *phyB* com auxílio dos fitocromos *phyA* e *phyE*. Após a etapa de germinação, as plântulas podem apresentar dois tipos de desenvolvimento: o estiolamento, no qual as plântulas na ausência de luz apresentam hipocótilos compridos e cotilédones fechados e a fotomorfogênese, caracterizada pelo crescimento das plântulas sob um amplo espectro de luz (principalmente luz vermelha, infravermelha, azul e UV) e o desenvolvimento de hipocótilos curtos, cotilédones abertos e o desenvolvimento de cloroplastos.¹²² Na etapa de fotomorfogênese, participam os fitocromos *phyA* e *phyB* através da absorção de luz vermelha e os criptocromos *cry1* e *cry2* através da absorção de luz azul e UV-A. À medida em que plantas crescem muito próximas umas das outras, começa um processo de competição por luz e estas tendem a evitar sombras. Este processo reduz a razão de luz vermelha e infravermelha incidente e consequentemente causa mudanças nas proporções relativas de P_r e P_{fr} . Por fim, tem-se a

percepção de fotoperíodo (duração do dia) pelas plantas. A percepção do dia é fundamental para que as plantas ajustem seu desenvolvimento como, por exemplo, a floração de acordo com as mudanças sazonais, sendo os fitocromos e criptocromos os contribuintes essenciais para sincronização do relógio circadiano. Além disso, também é possível observar que outros processos de desenvolvimento como o fototropismo (crescimento em direção à luz), movimento dos cloroplastos e abertura dos estômatos são regulados pela luz, principalmente através das fototropinas.¹²²

4.2 Bioestimulação de sementes com luz

De acordo com Hernandez *et al.*, o princípio básico do mecanismo de bioestimulação de sementes e plantas deve-se ao sinergismo entre o feixe monocromático polarizado do *laser* e os fotorreceptores que, quando ativados, desencadeiam inúmeras reações biológicas. Como variáveis importantes, os artigos reportam três parâmetros de irradiação¹²⁴ considerados essenciais para a área bioestimulação de sementes: dose de luz DL (J/cm^2), tempo de irradiação t (s) e irradiância das fontes de luz utilizadas I (mW/cm^2). Os três parâmetros relacionam-se de acordo com a seguinte equação:

$$DL (J/cm^2) = \frac{I (mW/cm^2) t (s)}{1000} \quad (4.3)$$

Na Equação 4.3, o valor 1000 no divisor é utilizado como um fator de conversão automático de mW para W .

Como pioneiros na utilização de *lasers* na agricultura, Wilde, Parr e McPeak demonstraram que o tratamento de sementes de algumas espécies com *laser* de Rubi (694,3 nm) acelerou os processos de germinação e crescimento das plantas, e que o estudo da técnica poderia aumentar o rendimento das lavouras e reduzir o uso de pesticidas. Apesar de inúmeros *lasers* de comprimento de onda diferentes terem sido utilizados na agricultura, os mais frequentemente usados são aqueles correspondentes à cor vermelha, uma vez que a absorção de luz pelo fitocromo ocorre nessa faixa do espectro visível.

AlSalhi *et al.* trataram sementes de trigo da espécie *Triticumaestivum L.* com *laser* de He-Ne (632,8 nm) e observaram aumentos no comprimento da raiz e da parte aérea, nos pesos das massas frescas e secas e/ou nos conteúdos dos pigmentos fotossintéticos clorofila **a**, clorofila **b** e carotenóides, dependendo do tempo de exposição das sementes à radiação. Também com o *laser* de He-Ne (95 mW/cm^2), Osman *et al.* trataram sementes de erva-doce (*Feoniculum vulgare*) e coentro (*Coriandrum sativum*) com diferentes doses de luz e observaram valores significativamente maiores de altura para ambas as culturas após 20 minutos de exposição quando

comparados com o controle (sem tratamento com luz). Asghar *et al.* trataram sementes de soja com um *laser* de He-Ne de irradiância 1 mW/cm^2 por três e cinco minutos, resultando nas doses de luz $0,18 \text{ J/cm}^2$ e $0,30 \text{ J/cm}^2$, respectivamente. Como resultados, observaram valores significativamente maiores para o conteúdo total de clorofila, conteúdo de açúcares solúveis e concentração de ácido ascórbico para a dose de luz $0,18 \text{ J/cm}^2$ quando comparados com aqueles obtidos para o controle, e valores significativamente maiores para as concentrações das enzimas protease, amilase e superóxido dismutase para a dose de luz $0,30 \text{ J/cm}^2$, sendo a superóxido dismutase uma enzima essencial para a defesa antioxidante das células.¹²⁹ Além disso, também observaram porcentagens maiores nos conteúdos de nitrogênio, proteínas e compostos fenólicos para ambos os tratamentos com *laser* de He-Ne. Após inocular sementes de soja com a bactéria fixadora de nitrogênio *Bradyrhizobium japonicum* e irradiar essas sementes também com *laser* de He-Ne, Klimek-Kopyra *et al.* observaram aumentos nas taxas de germinação e eliminação de três espécies de fungos presentes nas sementes quando o tratamento ocorreu apenas com o *laser*.

Em seu trabalho, Hernandez *et al.* trataram sementes de milho (*Zea mays*) com *laser* de GaAlAs (660 nm) variando a irradiância do equipamento ($3,2$; $5,55$ e 20 mW/cm^2) e os tempos de irradiação (30 , 60 , 120 , 180 , 300 e 600 s) e estudaram o fenômeno de emergência, ou seja, quando as plântulas emergem da superfície da terra após a etapa de germinação. Os melhores resultados obtidos e que apresentaram diferença significativa quando comparados com o controle foram para os tratamentos com tempos de 30 e 60 s , com as irradiâncias $3,2$ e 20 mW/cm^2 , respectivamente. Para o segundo caso, o tratamento de sementes de milho por 60 s com irradiância 20 mW/cm^2 aumentou a taxa de emergência de plântulas em 43% , a porcentagem de germinação em 48% e o peso da massa seca das plântulas em 63% .

Dziwulska-Hunek, Szymanek e Stadnik trataram sementes de milho doce de três cultivares com luz de comprimento de onda $650\text{-}670 \text{ nm}$ e irradiância $11\text{-}13 \text{ mW/cm}^2$ em até três repetições de $0,1 \text{ s}$ de irradiação. Quando comparados com o controle, duas das cultivares utilizadas apresentaram 25% de aumento no rendimento da produção (em toneladas/ha) após o tratamento com luz em duas repetições de $0,1 \text{ s}$. Além disso, os pesquisadores reportaram aumentos de até $14,3\%$ nos comprimentos das espigas de milho (em *cm*) de uma das cultivares cujas sementes foram tratadas com apenas uma repetição de $0,1 \text{ s}$ de luz vermelha.

Dinani *et al.* trataram sementes da planta medicinal *Kelussia Odoratissima* com um *laser* de diodo de comprimento de onda 650 nm por 15 minutos e plantaram as sementes após adubação com o fertilizante NPK ($100:20:150$), o hormônio de crescimento giberilina e 30% de vermicomposto. Ao fim dos sete meses do experimento, os autores observaram índices de crescimento mais altos para as plantas cujas sementes foram tratadas com *laser* quando comparadas com aquelas plantadas sob o mesmo regime de adubação, mas sem o tratamento com *laser*. Dentre esses índices, foram reportados maiores pesos das massas frescas e secas, tanto das partes aéreas quanto das raízes, assim como para o comprimento de ambas as partes.

Outro indício importante das consequências da interação de luz vermelha ($650\text{-}660 \text{ nm}$) com as plantas foi o publicado por Dhakal *et al.*, que demonstram o aumento da resistência de plântulas de soja contra o apodrecimento causado pela bactéria *Pseudomonas putida*. Em

seu artigo, Dhakal *et al.* removeram as pontas das raízes de plântulas de soja e as infectaram com solução bacteriana de *Pseudomonas putida*. Em seguida, colocaram as plântulas infectadas para crescerem sob a incidência de luz LED de comprimentos de onda diferentes (440, 660 e 730 nm, controle feito no escuro) e observaram que após cinco dias de incubação, apenas as plântulas crescidas sob luz de comprimento de onda 660 nm adquiriram algum tipo de resistência à doença bacteriana e voltaram a desenvolver raízes. Para validar os resultados obtidos, os autores realizaram testes bioquímicos e observaram que houve um acúmulo de ácido salicílico nas plântulas tratadas com luz vermelha, acompanhado de uma regulação positiva do gene *ICS* e do gene relacionado à patogênese *PR-1*, indicando que a resistência foi adquirida pela ação do ácido salicílico na via *de novo synthesis*, sistema de defesa das plantas compreendido nos mecanismos de Resistência Sistêmica Adquirida (SAR)*. Dessa forma, o tratamento com luz de comprimento de onda 660 nm não só de sementes visando a bioestimulação, mas também de plântulas para maiores ativações dos sistemas de defesa contra patógenos,¹³⁴ surge como uma área promissora no controle sustentável de pragas, abrindo caminhos para novos projetos de pesquisa no futuro.

* Do inglês, *Systemic Acquired Resistance*.

METODOLOGIA

Durante o desenvolvimento do projeto, foram construídos dois equipamentos de irradiação de sementes para os experimentos, sendo um com fonte de luz LED (Seção 5.1) e um com fonte de luz *laser* (Seção 5.2). Além disso, foi construída uma estufa *indoor* automatizada (Seção 5.3) para o crescimento das plantas cujas sementes foram tratadas com luz durante os experimentos. A iluminação da bancada de cultivo da estufa foi feita artificialmente com lâmpadas para crescimento de plantas (Subseção 5.3.1) e a automatização da sala com o sistema embarcado *Raspberry Pi 3* (Subseção 5.3.2). O desenvolvimento de uma interface em *Node-RED* (Subseção 5.3.3) permitiu o controle de outros sistemas, como o do módulo *Raspicam* instalado na bancada de cultivo para obtenção de imagens (Subseção 5.3.4), o sistema de irrigação para os vasos da bancada de cultivo (Subseção 5.3.6) e os equipamentos de irradiação mencionados anteriormente. Além disso, a temperatura, a umidade e a pressão da estufa foram monitoradas com um sensor instalado na bancada de cultivo (Subseção 5.3.5). Os parâmetros de irradiação e a cultivar de soja utilizada nos experimentos foram detalhados na Seção (5.4).

Foram realizadas três modalidades de experimento: experimento de germinação em rolo germitest (Seção 5.5), experimento de velocidade de emergência (Seção 5.6) e experimento de cultivo na estufa (Seção 5.7). Nos experimentos de germinação em rolo germitest, os parâmetros taxa de germinação (Subseção 5.5.1) e massa fresca e massa seca de plântulas (Subseção 5.5.2) foram aferidos. No experimento de velocidade de emergência, os parâmetros porcentagem de emergência, índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo médio de emergência (TME) foram aferidos. No experimento de cultivo na estufa, os parâmetros altura das plantas (Subseção 5.7.1), teor de clorofila das folhas (Subseção 5.7.2) e massa fresca e massa seca da parte aérea e raiz das plantas (Subseção 5.7.3) foram aferidos.

5.1 Fonte de luz LED: *biotable* (660 nm)

O surgimento da tecnologia do diodo emissor de luz (LED)* revolucionou os setores de iluminação e permitiu um grande avanço em pesquisas acadêmicas, uma vez que a luz proveniente desses dispositivos dispõe de alta qualidade a um baixo custo energético, tornando-os adequados

* Do inglês, *Light Emitting Diode*.

para a construção de aparatos científicos emissores de luz em diversos comprimentos de onda. A *biotable* é um equipamento desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Óptica e Fotônica (CEPOF) para pesquisas em Terapia Fotodinâmica (PDT)[†] (Figura 5.1). Consiste em uma placa eletrônica contendo 24 LEDs de alta potência (5 W) e comprimento de onda 660 nm ordenados em quatro fileiras de 6 LEDs cada (associados em série) que definem um retângulo cujas dimensões (127,5 x 16,6 mm) são iguais às das placas de 24 poços utilizadas como porta-amostras na PDT, sendo aqui utilizadas como porta-amostras de sementes nos processos de irradiação realizados nos experimentos.

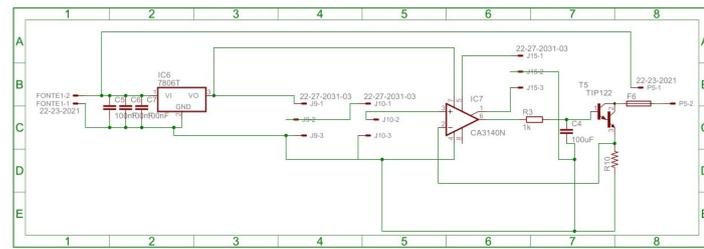


Figura 5.1 – Equipamento *biotable* desenvolvido pelo CEPOF para pesquisas na área de PDT.

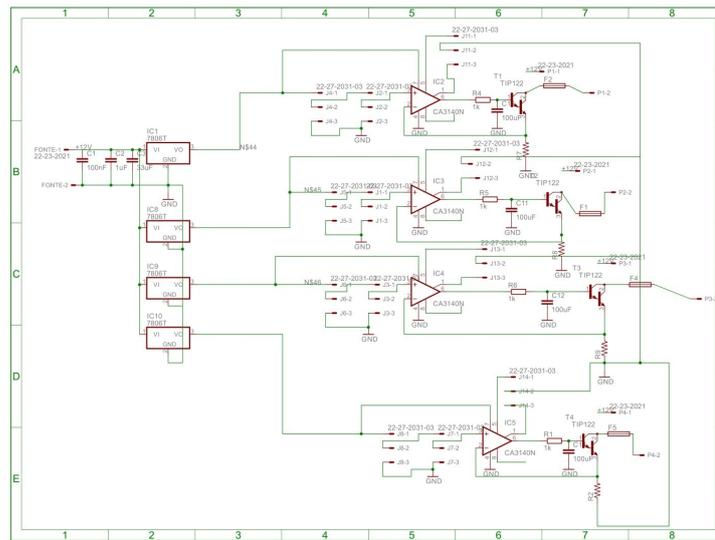
Fonte: Elaborada pelo autor.

O equipamento também possui em sua estrutura um dispositivo eletrônico chamado *peltier* (40 x 40 mm), um dissipador de calor feito de alumínio e um *cooler* do tipo ventilador. O *peltier* possui duas faces, uma quente e uma fria. A face fria fica em contato com a placa de LEDs e é responsável pela refrigeração necessária para evitar o superaquecimento provocado pelos LEDs de alta potência. A face quente fica em contato com o dissipador, assim como o *cooler*, contribuindo para a dissipação do calor gerado pelo equipamento. Para a realização do projeto, a estrutura e o esquemático para elaboração das fontes de corrente do equipamento foram gentilmente cedidos pelo Laboratório de Inovações Tecnológicas (LAT) e a produção delas foi feita no Laboratório de Instrumentação Eletrônica para Óptica (LIEPO). O esquemático das fontes da *biotable* desenvolvido pelo LAT foi feito utilizando o software CAD Eagle[®] 6.4 e divide-se em duas partes: a primeira é responsável por fornecer corrente elétrica para o *peltier* (Figura 5.2a), enquanto a segunda é responsável por fornecer corrente elétrica para as fileiras de LEDs, com potenciômetros que permitem o ajuste das correntes visando manter a mesma irradiância em todas as fileiras (Figura 5.2b).

[†] Do inglês, *Photodynamic Therapy*.



(a)



(b)

Figura 5.2 – Esquemáticos das fontes de corrente da *biotable*. (a) Fonte de alimentação do *peltier*. (b) Fonte de alimentação dos LEDs de alta potência.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, foi projetado o *layout* da placa de circuito impresso (PCB)[‡] (Figura 5.3) no *software* CAD Eagle[®] agrupando os dois esquemáticos apresentados nas Figuras 5.2a e 5.2b e posterior confecção da PCB em placas de fenolite e soldagem dos componentes eletrônicos. Para alimentação das fontes de corrente, foram utilizadas duas fontes de energia (5 V, 1,5 A) comerciais.

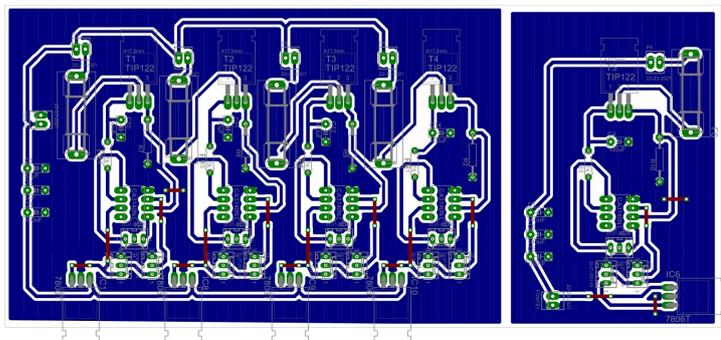


Figura 5.3 – *Layout* da PCB das fontes de corrente da *biotable*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

[‡] Do inglês, *Printed Circuit Board*.

A fonte do equipamento foi conectada a *biotable* (Figura 5.4) e o espectro da radiação emitida (Figura 5.5) foi medido no *software Spectra Suite*[®] com um espectrômetro da marca Ocean Optics[®] conectado a uma fibra óptica. Assim como esperado, o espectro apresenta uma banda de intensidade com pico centrado em 660 nm.



Figura 5.4 – Equipamento *biotable* com placa de 24 poços e fonte de energia construída.

Fonte: Elaborada pelo autor.

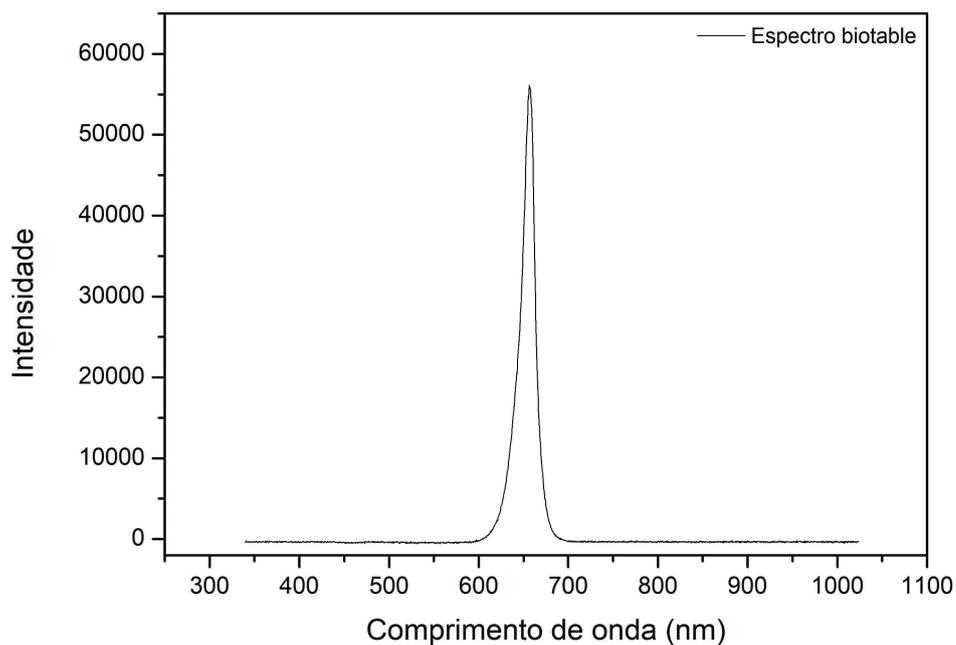


Figura 5.5 – Espectro da radiação emitida pela *biotable* com pico de intensidade centrado em 660 nm.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A irradiância dos 24 LEDs foi medida três vezes logo acima destes com um *power meter* da marca Coherent[®] calibrado em 660 nm. O valor final da irradiância do equipamento assim como o erro associado, foram dados como a média e o desvio padrão, respectivamente, de todas as medidas realizadas, resultando na irradiância $I = (17 \pm 1) \text{ mW/cm}^2$.

5.2 Fonte de luz *laser* (660 nm)

Com a evolução das tecnologias de amplificação de luz por emissão estimulada de radiação (LASER)[§], o *laser* de diodo tornou-se um dispositivo eletrônico muito utilizado nas áreas acadêmica e industrial. Suas aplicações englobam desde processos mais simples, como em *mouses* e impressoras, até complexos sistemas de comunicação com fibra óptica.¹³⁵ Para o desenvolvimento da fonte de luz *laser* utilizada no processo de irradiação de sementes, foi desenhado um suporte para o tratamento das sementes utilizando o Solid Works[®] para posterior impressão das peças utilizando uma impressora 3D da marca Cliever[®] (Figura 5.6).

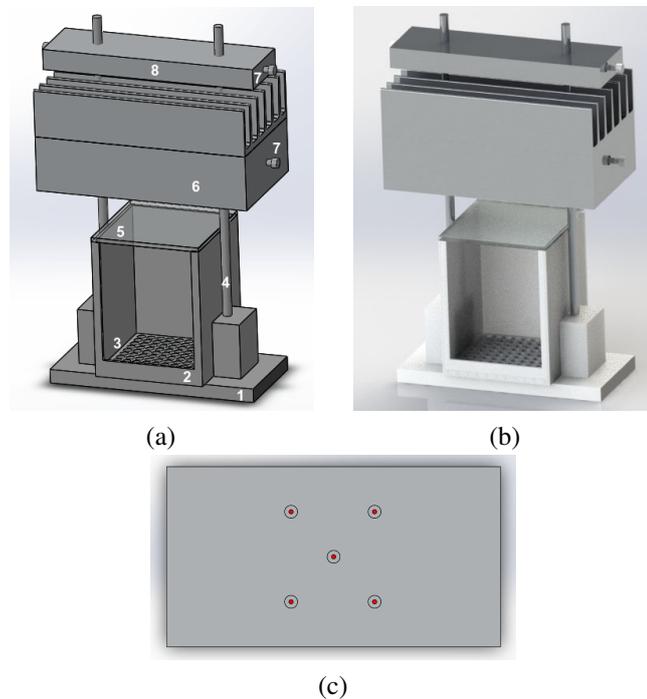


Figura 5.6 – Estrutura do equipamento desenvolvido para tratamento de sementes com *lasers*. (a) Ilustração do projeto no Solid Works[®]: 1) Base de PLA com suporte para hastes de alumínio; 2) Caixa de PLA para posicionamento das sementes; 3) Porta-amostra de sementes; 4) Hastes de alumínio responsáveis pela sustentação do equipamento; 5) Difusor de acrílico; 6) Conjunto dissipador e *lasers* 660 nm; 7) Parafusos de contenção para manter dissipador e peça suporte presos nas hastes; 8) Peça suporte da estrutura. (b) Versão renderizada. (c) Face inferior do dissipador ilustrando a posição geométrica dos cinco *lasers* de 660 nm.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A peça (1) é uma base feita de PLA com suporte para duas hastes de alumínio que foram colocadas nas extremidades para sustentação da estrutura (Figura 5.6a). A peça (2), também de PLA, é uma caixa com 100 furos de 6,5 mm de diâmetro na parte inferior que atua como porta-amostras para as sementes e com a face superior aberta para o posicionamento de um material difusor feito de acrílico para homogeneizar a luz proveniente dos *lasers*. Em uma

[§] Do inglês, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

distância $d = (31,50 \pm 0,02)$ mm acima do difusor, as hastes foram utilizadas para fixar um dissipador de calor móvel também de alumínio confeccionado pela Oficina Mecânica do instituto, contendo em sua face inferior cinco *lasers* de diodo (660 nm) dispostos geometricamente de maneira a formar um quadrado, com um dos *lasers* posicionado no centro (Figura 5.6c). Além do dissipador, foram utilizadas uma peça retangular de alumínio no topo da estrutura como suporte para manter a estabilidade do equipamento e parafusos de contenção para evitar o deslizamento dos conjuntos dissipador/hastes e suporte/hastes.

Para a elaboração da fonte de corrente do *laser*, o esquemático foi projetado utilizando-se o CAD Eagle® (Figura 5.7). O circuito associa todos os *lasers* de diodo em paralelo, com corrente ajustada para 220 mA e utilizando reguladores de tensão na saída de cada *laser*. Em seguida, foi projetado o *layout* da PCB no mesmo *software* para posterior confecção da PCB em placas de fenolite e soldagem dos componentes eletrônicos (Figura 5.8).

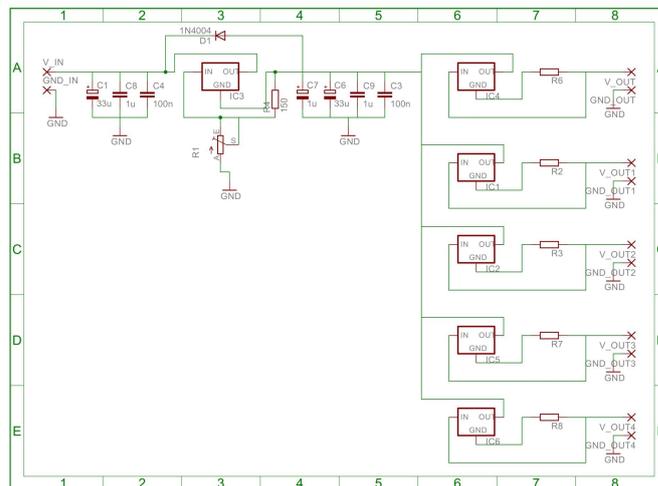


Figura 5.7 – Esquemático da fonte de corrente do conjunto de *lasers* desenvolvido em laboratório.

Fonte: Elaborada pelo autor.

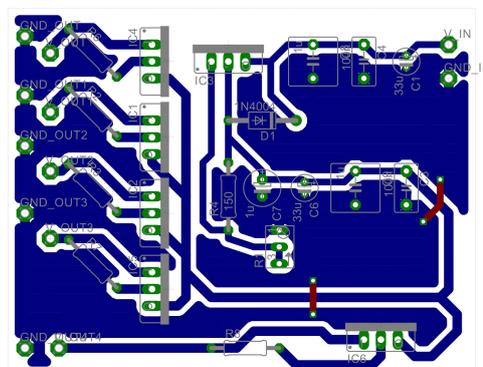


Figura 5.8 – *Layout* da PCB da fonte de corrente dos *lasers*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A fonte do equipamento foi conectada ao conjunto de *lasers* (Figura 5.9) e o espectro da radiação emitida pelo equipamento (Figura 5.10) também foi medido com o espectrômetro da Ocean Optics[®] conectado a uma fibra óptica, apresentando um pico intenso e bem definido em 660 nm, conforme esperado.



Figura 5.9 – Equipamento desenvolvido contendo cinco *lasers* de diodo de comprimento de onda 660 nm conectado à fonte de energia desenvolvida. (a) Estrutura do equipamento com 100 sementes de soja no porta-amostras. (b) Equipamento ligado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

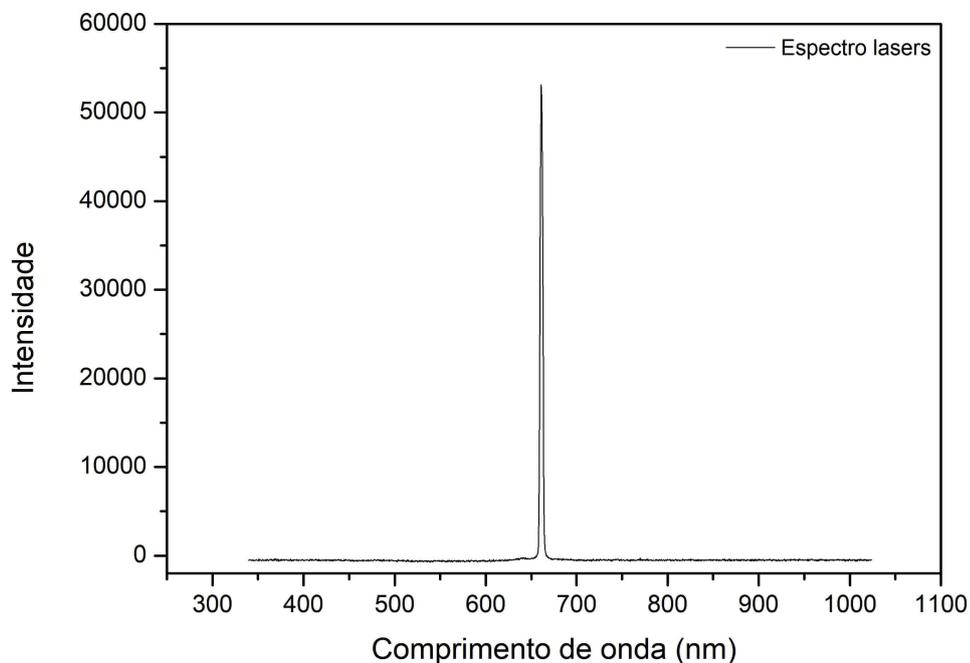


Figura 5.10 – Espectro da radiação emitida pelos *lasers* com pico de intensidade bem definido e centrado em 660 nm.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o *power meter* calibrado em 660 nm, o fotodetector foi alinhado com as posições individuais dos *lasers* e foram realizadas três medidas de irradiância para cada *laser* em uma

mesma distância d entre o fotodetector e a fonte de luz. Em seguida, repetiu-se o procedimento variando o valor de d em incrementos de 10 mm. Calculou-se a média e o desvio padrão dos 15 valores medidos em cada d , sendo três medidas em uma mesma distância para cada um dos cinco lasers, e os dados obtidos foram utilizados para plotar um gráfico de irradiância por distância das fontes de luz usando o software OriginLab[®] (Figura 5.11). As barras de erro do gráfico representam o desvio padrão das 15 medidas realizadas em um mesmo valor de d . Para pequenas distâncias (50, 60 e 70 mm), foi observada uma grande discrepância entre os valores de irradiância aferidos para os cinco lasers, resultando em um desvio padrão maior para essas medidas e consequentemente um aumento nas barras de erro. Por essa razão, optou-se por escolher uma distância $d = (130,20 \pm 0,02)$ mm para o tratamento das sementes, uma vez observado no gráfico que a luz proveniente dos lasers é mais homogênea em distâncias maiores do que 100 mm. A decisão pelo método da construção de um gráfico de irradiância por distância das fontes de luz justifica-se pelo fato de o fotodetector possuir $(12,30 \pm 0,02)$ mm de altura, impedindo o nivelamento correto deste com a altura correspondente à face superior das sementes. Dessa maneira, utilizou-se um *fitting* de decaimento exponencial do programa que se ajustou aos dados com $R^2 = 0,95954$ para estimar o valor de irradiância das fontes de luz laser na face superior das sementes, em $d = (130,20 \pm 0,02)$ mm, sendo o valor de irradiância final dado por $I = (3,5 \pm 0,2)$ mW/cm². A incerteza associada ao valor da irradiância foi calculada manualmente usando os valores de desvio padrão da tabela de *fitting* gerada pelo OriginLab[®], seguindo as regras de propagação de erros. Além disso, é importante salientar que o equipamento desenvolvido não ilumina uniformemente o grão, uma vez que a irradiação é feita apenas na face superior da semente.

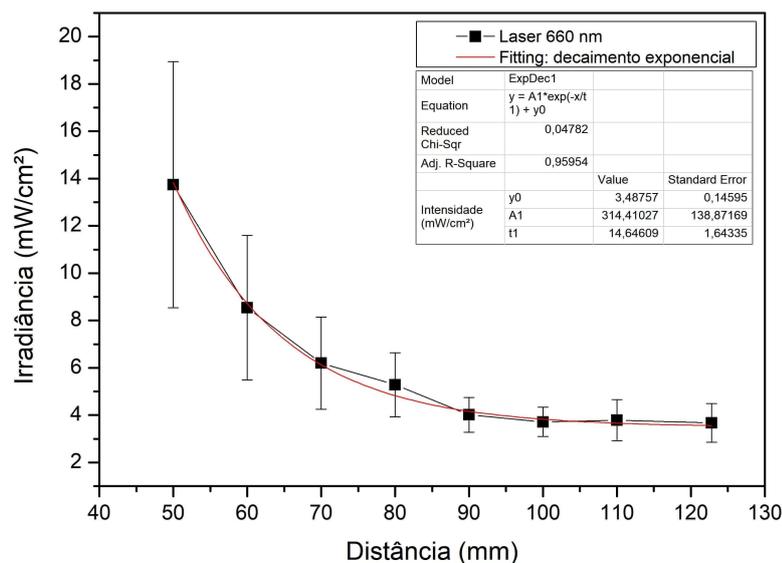


Figura 5.11 – Gráfico da irradiância por distância das fontes de luz laser usado para estimar a irradiância das fontes de luz em $d = (130,20 \pm 0,02)$ mm. Barras de erros representam o desvio padrão de 15 medidas, sendo três medidas em uma mesma distância para cada um dos cinco lasers. *Fitting* de decaimento exponencial se ajustou aos dados com $R^2 = 0,95954$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 Estufa *indoor* automatizada

Foi construída uma estufa *indoor* com iluminação artificial e automatização com *Raspberry Pi 3* para cultivo das plantas durante os experimentos. Diversos ajustes foram feitos ao longo do tempo conforme a necessidade e evolução do projeto. A estufa localiza-se em um novo laboratório criado no Instituto de Física de São Carlos (IFSC) vinculado ao Laboratório de Inovações Optrônicas para Oftalmologia e Agricultura (LIO2A) e pode ser vista na Figura 5.12. As bancadas para cultivo, realização de experimentos e armazenamento de materiais foram projetadas no Solid Works® e posteriormente construídas pela Oficina Mecânica.

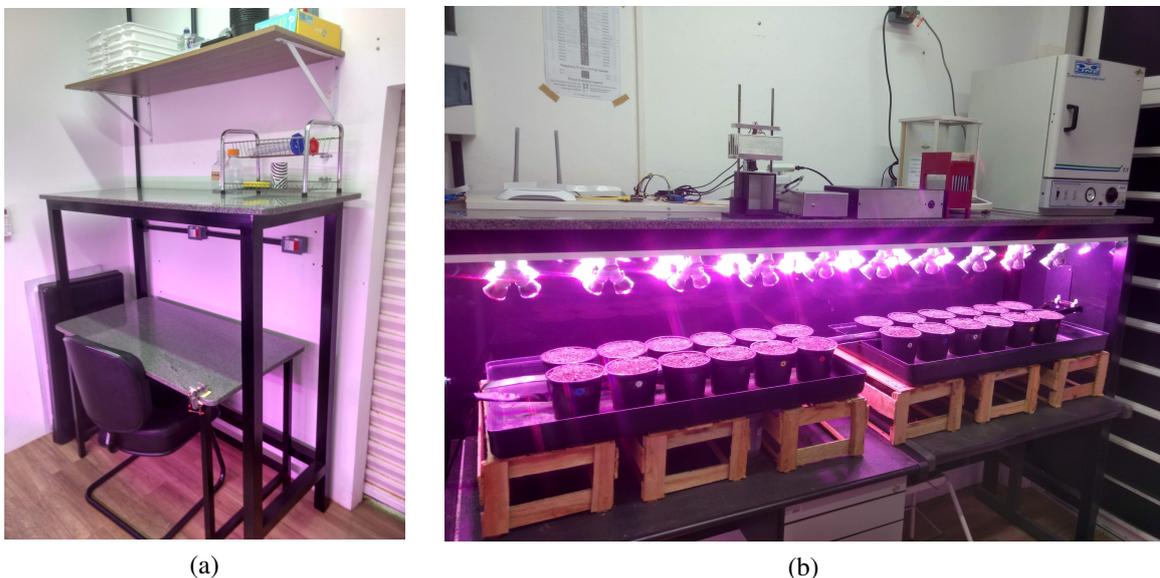


Figura 5.12 – Laboratório estufa *indoor* construído para o cultivo de plantas de soja com iluminação artificial. (a) Bancadas para realização dos experimentos e armazenamento dos materiais de consumo. (b) Bancada com os equipamentos de irradiação desenvolvidos, *Raspberry Pi 3*, balança analítica e estufa de secagem e bancada de cultivo com iluminação artificial.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os tópicos descrevendo os sistemas de iluminação (Subseção 5.3.1), a automação com *Raspberry Pi 3* (Subseção 5.3.2), a interface em *Node-RED* (Subseção 5.3.3), o módulo câmera da *Raspberry* (Subseção 5.3.4), o monitoramento da temperatura, umidade e pressão atmosférica (Subseção 5.3.5) e o sistema de irrigação (Subseção 5.3.6) serão descritos nas Subseções à seguir.

5.3.1 Iluminação

A iluminação da bancada de cultivo foi feita utilizando dois plafons de LEDs brancos (120 x 7,3 x 3,2 cm) e 40 lâmpadas comercializadas com o nome de *Full Spectrum* (28 W) para o crescimento de plantas. Para o posicionamento dos bocais das lâmpadas, uma peça de madeira nas dimensões 230 x 55 x 1,5 cm foi projetada no Solid Works® e confeccionada em uma marcenaria na cidade de São Carlos. Os dois plafons de LEDs brancos foram fixados no centro da peça com suportes de alumínio presentes em suas estruturas. Inicialmente, a peça foi projetada para apenas 20 lâmpadas *Full Spectrum*. Entretanto, foram inseridos 20 soquetes adaptadores para duplicação da quantidade de lâmpadas e seis caixotes de madeira para elevação das bandejas de cultivo, uma vez que a intensidade luminosa da configuração inicial não foi suficiente para o crescimento saudável de plantas de soja. A bancada, após o aumento do número de lâmpadas para 40, pode ser vista na (Figura 5.13). O fotoperíodo de 12 horas claro/12 horas escuro foi feito conectando as tomadas das lâmpadas em um *timer* analógico.



Figura 5.13 – Bancada de cultivo de plantas de soja construída com iluminação artificial.

Fonte: Elaborada pelo autor.

As lâmpadas *Full Spectrum* são compostas por 15 LEDs vermelhos (620 – 635 nm), sete LEDs azuis (445 – 460 nm), dois LEDs brancos quentes (3000 – 3500 K), dois LEDs brancos frios (6000 – 6500 K), um LED infravermelho (730 nm) e um LED UV-A (390 nm). Os espectros individuais dessas lâmpadas e dos plafons de LEDs brancos, assim como de ambas as lâmpadas ligadas juntas, foram medidos com o mesmo espectrômetro utilizado para medir os espectros das fontes de luz apresentadas nas Seções 5.1 e 5.2 e os resultados podem ser vistos nas Figuras 5.14a, 5.14b e 5.14c, respectivamente.

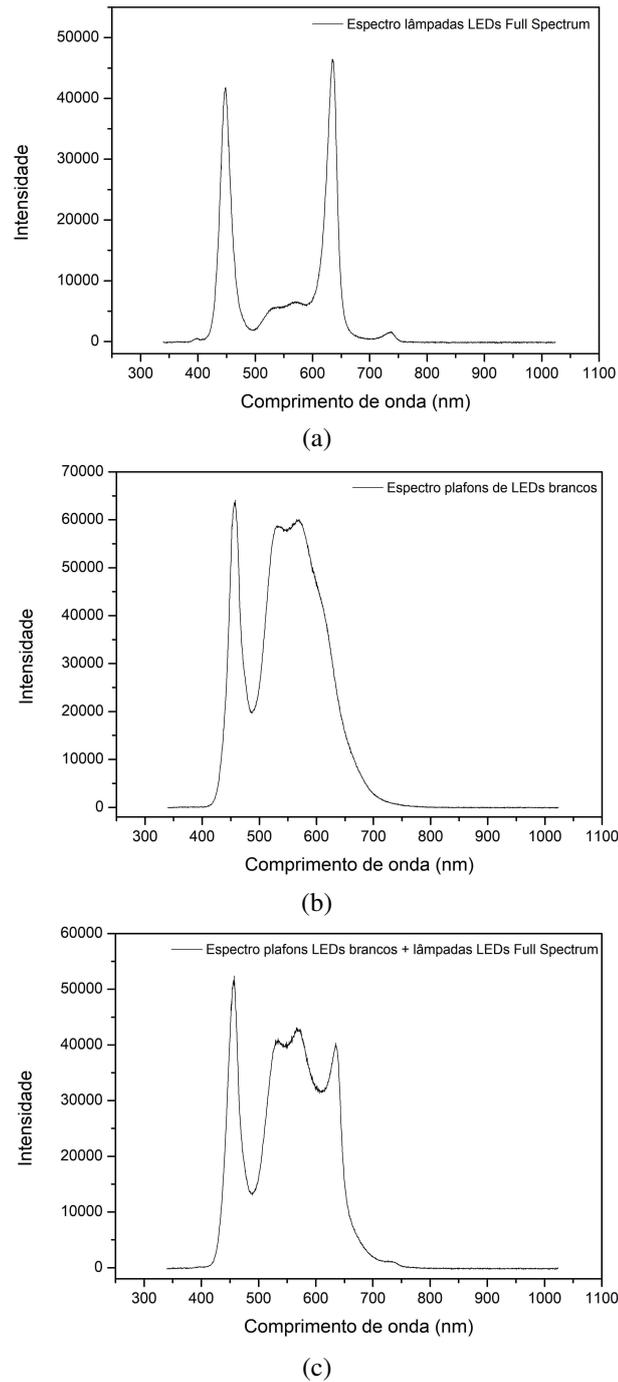


Figura 5.14 – Espectros da radiação emitida pelas lâmpadas utilizadas na bancada de cultivo. (a) Espectro da radiação emitida pelas lâmpadas *Full Spectrum*, com picos acentuados nas vizinhanças de 448 nm (azul) e 636 nm (vermelho), picos menores nas vizinhanças de 532 nm (verde) e 570 nm (verde amarelado) e dois picos pequenos nas vizinhanças de 398 nm (UV-A) e 736 nm (vermelho distante). (b) Espectro da radiação emitida pelos plafons de LEDs brancos, com picos acentuados nas vizinhanças de 457 nm (azul), 532 nm (verde) e 565 nm (verde amarelado). (c) Espectro da radiação emitida pelas lâmpadas *Full Spectrum* e dos plafons de LEDs brancos juntos, com picos acentuados nas vizinhanças de 457 nm (azul), 532 nm (verde), 565 nm (verde amarelado) e 634 nm (vermelho). Os picos UV-A (398 nm) e vermelho distante (736 nm) não apareceram no espectro uma vez que suas intensidades eram bem menores do que as dos outros comprimentos de onda.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A intensidade luminosa do conjunto de lâmpadas utilizado na iluminação da estufa foi medida em três posições da face superior de 24 vasos distribuídos na bancada de cultivo utilizando um luxímetro da marca Minipa[®]. Foi feita a média e o desvio padrão dos 72 valores obtidos, resultando em uma irradiância de $I = (14303 \pm 991) \text{ lux}$. Uma vez que o desvio padrão da intensidade luminosa da bancada de cultivo foi elevado, foi adotado o posicionamento aleatório dos tratamentos ao longo da bancada nos experimentos de cultivo em vasos com substrato para que a iluminação da bancada não se tornasse uma nova variável nos experimentos.

5.3.2 Raspberry Pi 3

O computador embarcado utilizado para automação do projeto foi a *Raspberry Pi 3* modelo B+ produzido pela *Raspberry Pi Foundation*.¹³⁶ Dentre algumas de suas principais características, destacam-se o processador quad-core 1,4 GHz 64-bit, conexões *Wi-Fi* e *bluetooth* integradas, quatro portas USB 2,0, resolução HDMI *Full-Size*, 40 pinos GPIO para a comunicação de entrada e saída de sinais digitais e sistema operacional Linux.¹³⁷ Além disso, foi acoplado um módulo relé (5 V, quatro canais) à *Raspberry Pi 3* (Figura 5.15) para o controle do sistema de irrigação (Subseção 5.3.6) e dos equipamentos *biotable* e *laser* através da interface em *Node-RED* (Subseção 5.3.3), como será melhor descrito nas Subseções à seguir.

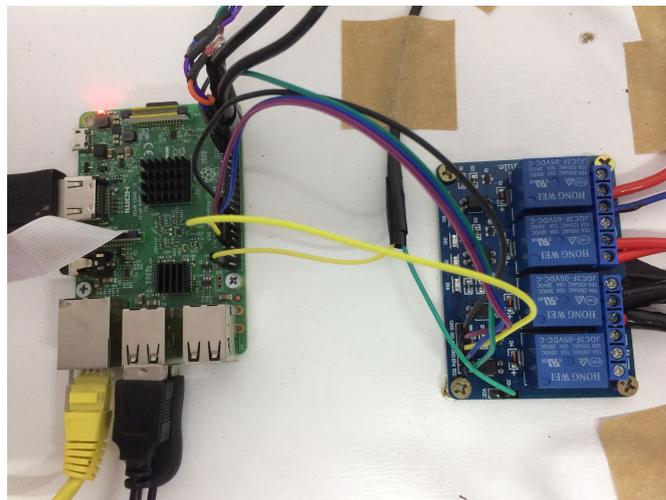


Figura 5.15 – Computador embarcado *Raspberry Pi 3* utilizado para automação da estufa *indoor*. À esquerda, o embarcado *Raspberry Pi 3*. À direita, módulo relé com quatro canais usado para conectar os equipamentos de irradiação e o sistema de irrigação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.3 Interface em Node-RED

Para o controle dos equipamentos e da sala, o módulo relé foi conectado à *Raspberry Pi 3* e foi criada uma interface em *Node-RED* acessada via computação em rede virtual (VNC)[¶]. O *Node-RED* é uma ferramenta de programação responsável por prover a ligação entre códigos em *JavaScript* e dispositivos externos como por exemplo, lâmpadas e a própria *Raspberry Pi 3*, através dos chamados nós de programação que geram um fluxo de informações em tempo real através de comandos pré-programados ou pela interação com o usuário.¹³⁸ Na área de programação (Figura 5.16), foram desenvolvidos os códigos dos nós de programação para cálculo das doses de luz dos equipamentos de irradiação utilizando a Equação 4.3 e as irradiâncias medidas nas Seções 5.1 e 5.2, assim como os códigos para captura de imagens e ativação do sistema de irrigação, como serão melhor descritos nas próximas Subseções.

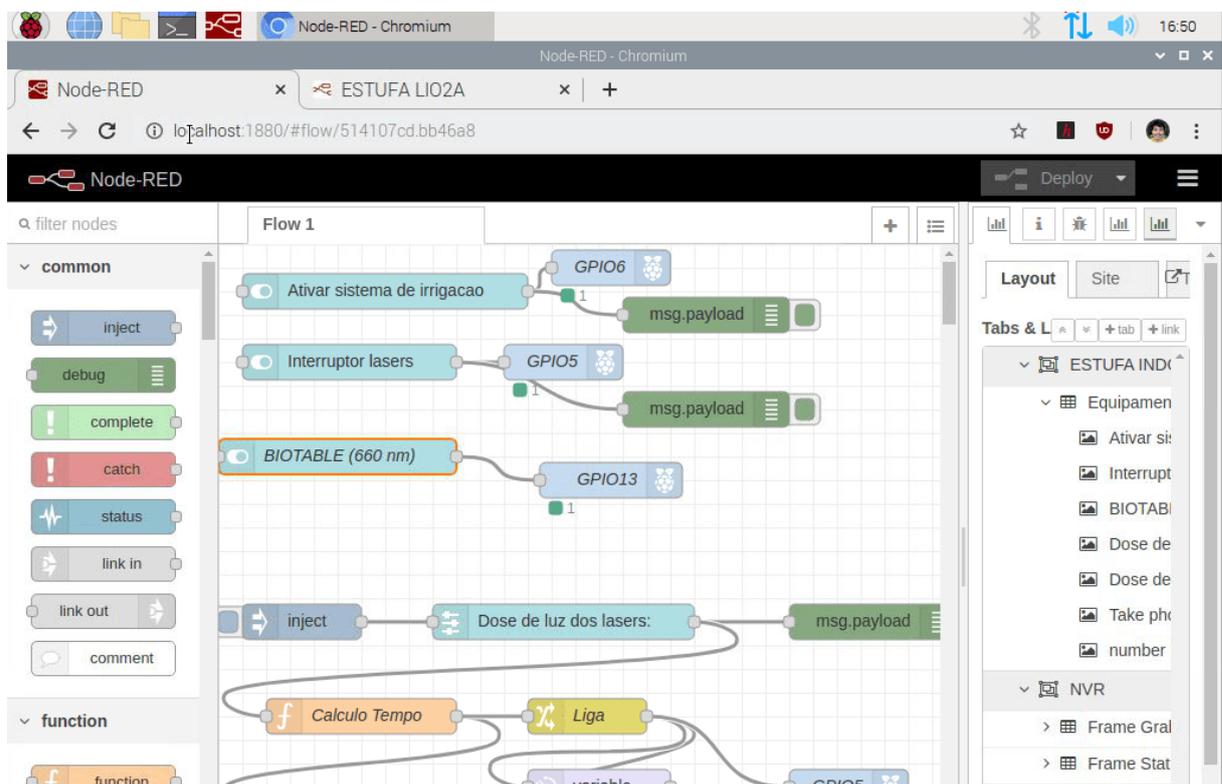


Figura 5.16 – Área de programação do *Node-RED*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, foi criada uma interface de fácil manuseio para o usuário, contendo interruptores de ativação tanto dos equipamentos de irradiação quanto do sistema de irrigação, um botão para obtenção de uma imagem da bancada de cultivo em tempo real e dois controles deslizantes para o usuário ajustar a dose de luz desejada e o equipamento ligar, tratar as sementes e desligar após o período de tempo calculado (Figura 5.16).

¶ Do inglês, *Virtual Networking Computing*.

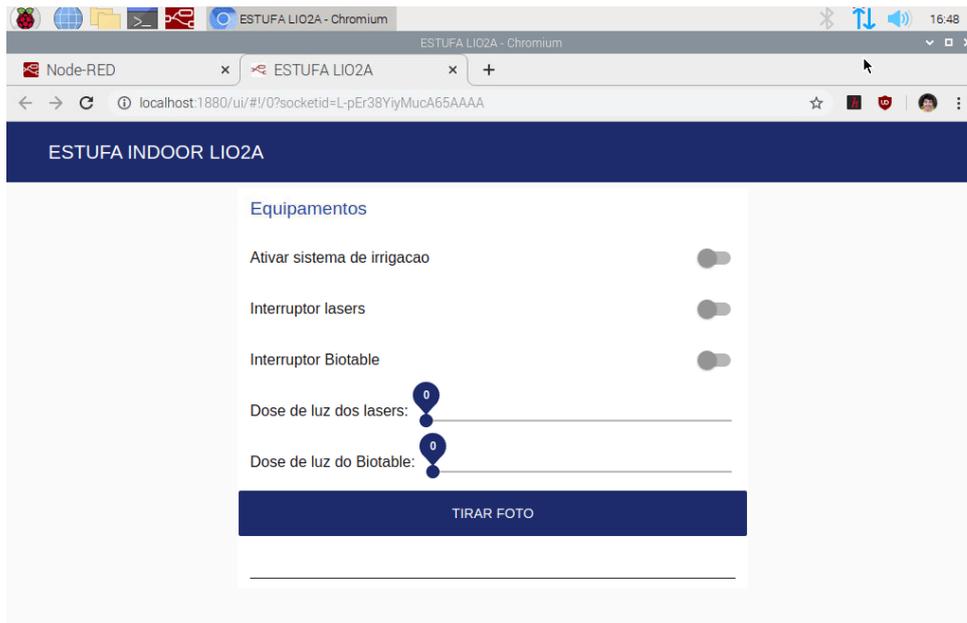


Figura 5.17 – Interface criada em *Node-RED* para controle dos equipamentos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.4 Módulo câmera Raspberry Pi 3

Para monitoramento do crescimento das plantas e a criação de *Time Lapses*, foi utilizado a *Raspberry Pi Camera Module (Raspicam)* modelo V2, apresentando em sua estrutura um sensor de 8 megapixels e 3280 x 2464 pixels de resolução.¹³⁹ O módulo câmera foi adaptado em uma peça suporte desenhada no Solid Works® e impressa em PLA acoplada à parte de móvel de um tripé de câmera. Em seguida, o conjunto foi instalado na face superior esquerda da bancada de cultivo (Figura 5.18) com objetivo de capturar fotos da maior quantidade de plantas possível.

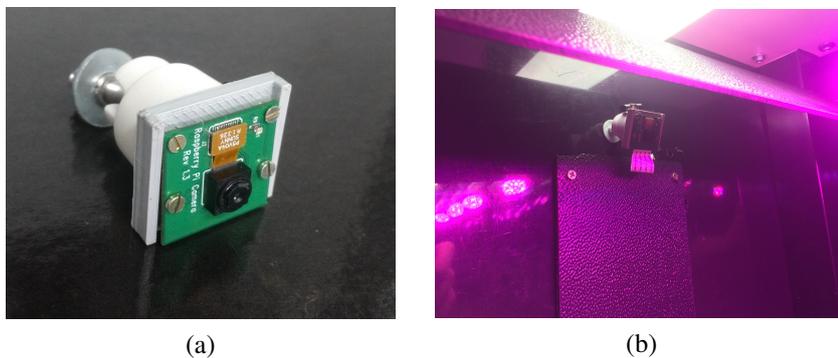


Figura 5.18 – Instalação do módulo *Raspicam* na bancada de cultivo. (a) Conjunto contendo a *Raspicam*, peça suporte impressa em PLA e parte móvel de um tripé de câmera. (b) Conjunto instalado na face superior esquerda da bancada de cultivo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A programação feita pelo *Node-RED* foi responsável por fotografar diariamente a bancada de cultivo às 7h30 da manhã e o botão tirar foto permite o usuário monitorar a bancada através de imagens. Uma imagem capturada pela câmera pode ser vista na Figura 5.19.



Figura 5.19 – Imagem obtida pela *Raspicam* exibindo a bancada de cultivo da estufa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.5 Monitoramento da temperatura, umidade e pressão atmosférica

O monitoramento da temperatura, umidade e pressão foi feito utilizando um sensor BME280 colocado na parede central da bancada de cultivo (Figura 5.20) e conectado nas portas GPIO de sinais digitais e alimentação (3,3 V) da *Raspberry Pi 3*. O sensor BME280 possibilita a medição de temperaturas entre -40 e 85 °C com precisão de ± 1 °C, umidade entre 0 e 100% com precisão de $\pm 3\%$ e pressão atmosférica entre 300 e 1100 hPa com precisão de ± 1 hPa.¹⁴⁰

A temperatura da sala foi ajustada para 25 °C com um ar condicionado de 9000 BTUs configurado no modo automático, responsável por resfriar ou esquentar a sala, dependendo da temperatura atual, com objetivo de manter a temperatura constante. O monitoramento foi feito através da plataforma *ThingSpeak*¹⁴¹ utilizando um código em *Python 3* responsável por fazer a conexão entre o sensor BME280, a *Raspberry Pi 3* e a plataforma online. O código em *Python* realiza a coleta de dados de temperatura, umidade e pressão atmosférica à cada 15 minutos e disponibiliza gráficos dessas variáveis por tempo (Figuras 5.21a, 5.21b e 5.21c) no site da plataforma através de um ID de identificação, permitindo que qualquer usuário monitore esses parâmetros.¹⁴²

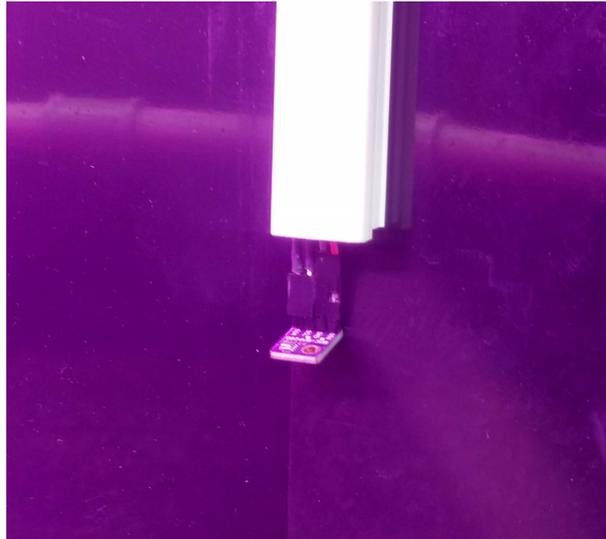


Figura 5.20 – Sensor BME280 responsável por coletar dados de temperatura, umidade e pressão atmosférica da bancada de cultivo à cada 15 minutos.

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 5.21 – Gráficos da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), umidade (%) e pressão atmosférica (hPa) da bancada de cultivo disponibilizados online na plataforma *ThingSpeak*. (a) Temperatura. (b) Umidade. (c) Pressão atmosférica.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.6 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação foi desenvolvido utilizando uma válvula solenóide de latão (220 V, 1/2", pressão máxima 10 MPa) acoplada a uma torneira presente na área externa do laboratório (Figura 5.22a). A válvula solenóide é um dispositivo que permite/barrar a passagem de água através do recebimento de um sinal elétrico. Nesse caso, a válvula foi conectada à *Raspberry Pi 3* nas portas GPIOs através do módulo relé e o envio de sinais elétricos foi controlado pela interface criada em *Node-RED*. Quando acionado o comando, a água proveniente da torneira passa pela válvula solenóide e percorre a sala através de mangueiras pneumáticas até chegar em uma mangueira de gotejamento instalada na bancada de cultivo (Figura 5.22b).

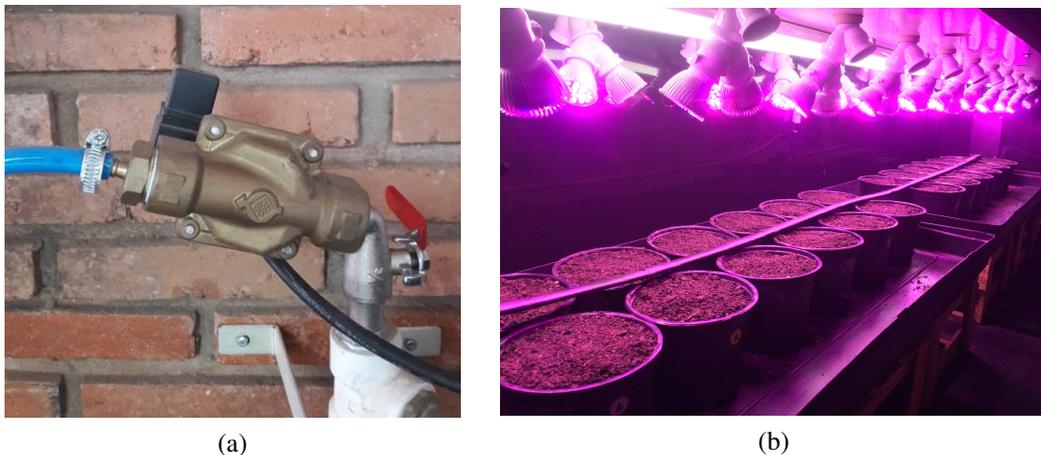


Figura 5.22 – Sistema de irrigação. (a) Válvula solenóide utilizada no sistema de irrigação acoplada a torneira da área externa do laboratório. (b) Sistema de irrigação utilizado na estufa *indoor* com mangueira de gotejamento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 Parâmetros de irradiação e cultivar de soja

Assim como descrito nas Seções 5.1 e 5.2 deste capítulo, as irradiâncias dos equipamentos *biotable* e *lasers* utilizados no projeto são $(17 \pm 1) \text{ mW/cm}^2$ e $(3,5 \pm 0,2) \text{ mW/cm}^2$, respectivamente. Para comparar o efeito da coerência do *laser*, a irradiância da *biotable* foi ajustada para $(3,5 \pm 0,3) \text{ mW/cm}^2$ igualando as irradiâncias dos equipamentos. A cultivar de soja utilizada no projeto foi a BRS 537 cedida pela Embrapa Genética e Melhoramento de Londrina (PR).

5.5 Experimentos de germinação em rolo germitest

Os experimentos foram realizados utilizando papéis de germinação germitest da marca LabSementes, nas dimensões 28 x 76 cm e pH neutro. A metodologia e a amostragem experimental foram feitas de acordo com o manual Regras para Análise de Sementes (RAS)¹⁴³ disponibilizado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento em 2009, utilizando o método de germinação entre papel com quatro repetições de 100 sementes para cada tratamento realizado. As sementes foram tratadas com os equipamentos *biotable* ou *laser* em diferentes doses de luz, dependendo do experimento realizado, e foram posicionadas sobre duas folhas de papel germitest com o auxílio de um tabuleiro plantador de soja (50 furos, peneira 6,5 mm) da marca LabSementes[®] imediatamente após a irradiação. Em seguida, uma terceira folha foi posicionada sobre as sementes tratadas, adicionou-se uma quantidade de água destilada correspondente a 2,5 vezes o peso do papel seco e o conjunto foi confeccionado na forma de um rolo, preso em suas extremidades por elásticos (Figura 5.23). Os rolos de papel foram acondicionados em sacos plásticos vedados para evitar a perda de umidade e armazenados em uma estufa incubadora BOD por sete dias a 25 °C, umidade 60% e fotoperíodo 12 horas claro/12 horas escuro. Ao final dos sete dias, os rolos foram abertos e as análises foram realizadas de acordo com os objetivos do experimento, como será melhor descrito nas Subseções 5.5.1 e 5.5.2.



Figura 5.23 – Experimento de germinação em rolo germitest. (a) Método para posicionamento de sementes de soja em folhas de papel germitest. (b) Rolo de papel germitest confeccionado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5.1 Taxa de germinação

Nesta modalidade de experimento, foram avaliadas as taxas de germinação de plântulas normais, plântulas anormais e sementes mortas dos tratamentos realizados com luz de comprimento de onda 660 *nm*, assim como para o tratamento controle (sem tratamento com luz). De acordo com o manual da RAS,¹⁴³ plântulas são consideradas normais quando apresentam todas as suas estruturas essenciais bem desenvolvidas, completas, proporcionais, sadias ou até mesmo com pequenos defeitos, contanto que demonstrem um desenvolvimento satisfatório. Plântulas anormais são aquelas que não mostram potencial para continuar seu desenvolvimento e dar origem à plantas normais, seja por deterioramento ou deformidades. Por fim, são consideradas sementes mortas aquelas que não germinaram ao fim do período de incubação, apresentando caráter amolecido e/ou atacadas por microrganismos. Foi realizado um teste inicial de germinação em rolo germitest para obtenção de imagens que serviram como guia durante o processo de classificação de plântulas normais, anormais e sementes mortas nos demais experimentos, assim como mostra a Figura 5.24.



Figura 5.24 – Plântulas de soja utilizadas como guia para classificação nos experimentos de germinação. 1) Plântulas normais. 2) Plântulas anormais. 3) Sementes mortas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5.2 Massa fresca e massa seca de plântulas

Após a abertura dos rolos germitest e a contagem/classificação das plântulas em normais, anormais e sementes mortas, foram selecionadas 25 plântulas normais aleatoriamente de uma mesma repetição e a massa fresca dessas plântulas foi pesada em uma balança analítica

com precisão de 0,0001 g. O procedimento foi realizado para todas as repetições de todos os tratamentos e em seguida todos os valores foram divididos por 25 para obter o valor da massa fresca de uma plântula. Desta forma, cada tratamento possuiu quatro valores de massa fresca, correspondentes às quatro repetições, permitindo a posterior realização da estatística. Após a pesagem da massa fresca, as repetições foram armazenadas em sacos de papel dentro de uma estufa de secagem por três dias à temperatura de 60 °C para remoção do conteúdo de água. O objetivo desta análise foi observar se o tratamento das sementes com luz causa promoção de crescimento nos estágios iniciais de desenvolvimento das plântulas através de variações nos valores aferidos para as massas frescas e secas.

5.6 Experimentos de velocidade de emergência

O experimento de velocidade de emergência foi realizado utilizando o método de germinação em bandejas com substrato na bancada de cultivo da estufa e amostragem experimental de quatro repetições de 35 sementes por tratamento. As sementes foram tratadas com diferentes doses de luz, dependendo do experimento realizado, e semeadas com profundidade de semeadura de 3 cm imediatamente após a irradiação. Diferente dos experimentos de germinação em rolo germitest, as bandejas foram incubadas durante sete dias na bancada de cultivo da estufa *indoor* a temperatura 30 °C, umidade 60% e fotoperíodo 12 horas claro/12 horas escuro. Ao longo do período de incubação, a velocidade de emergência foi avaliada contando-se diariamente as plântulas cujos cotilédones haviam emergido da superfície do solo e não mais tocavam o mesmo. Além disso, as fórmulas para o cálculo do índice de velocidade de germinação (IVG) e tempo médio de germinação (TMG) foram adaptadas de Carvalho e Carvalho para o estudo da emergência das plântulas, dadas pelas Equações 5.1 e 5.2, respectivamente:

$$IVE = \sum_i^t \left(\frac{n_i}{t_i} \right) \quad (5.1)$$

Na Equação 5.1, n_i é o número de plântulas que emergiram do solo no tempo i e t_i o tempo em dias após o início do experimento.

$$TME = \frac{(\sum_i^t n_i t_i)}{(\sum_i^t n_i)} \quad (5.2)$$

Na Equação 5.2, n_i é o número de plântulas que emergiram por dia i e t_i o tempo em dias após o início do experimento. A Figura 5.25 ilustra o *setup* experimental do experimento de velocidade de emergência na bancada de cultivo.



Figura 5.25 – Experimento de velocidade de emergência na bancada de cultivo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.7 Experimentos de cultivo na estufa

Os experimentos de crescimento de plantas de soja foram feitos na estufa *indoor* construída durante o projeto utilizando vasos de mudas (1 L) preenchidos com substrato orgânico da marca BioPlant[®] até a borda superior (Figura 5.26). As sementes foram tratadas com diferentes doses de luz e plantadas nos vasos com profundidade de semeadura de 3 cm imediatamente após a irradiação. A amostragem experimental para cada tratamento foi de quatro vasos contendo cinco sementes de soja cada, uma vez que nem todas as sementes germinam ao fim do processo. Após o período de germinação e emergência das plântulas sobre o substrato, foi deixada apenas uma plântula por vaso para evitar a competição por nutrientes do solo entre plântulas de um mesmo vaso. Os tratamentos foram dispostos aleatoriamente ao longo da bancada de cultivo seguindo o delineamento inteiramente casualizado (DIC) e cada experimento durou 30 dias. Os procedimentos de análise realizados serão descritos nas Subseções a seguir: na Subseção 5.7.1, a altura das plantas foi aferida; na Subseção 5.7.2, o teor de clorofila das folhas foi aferido e na Subseção 5.7.3, a massa fresca e massa seca das plantas foram aferidas.



Figura 5.26 – Experimento de cultivo na estufa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.7.1 *Altura das plantas*

A altura das plantas foi medida em intervalos de sete dias durante todo o decorrer dos experimentos utilizando uma régua milimetrada. Desta forma, foram obtidos valores de altura de todas as repetições das plantas durante os 28 primeiros dias de crescimento. O objetivo dessa análise foi observar se o tratamento das sementes com luz causou promoção de crescimento nas plantas de soja através da construção de gráficos de altura (*cm*) por tempo (*dias*) para os diferentes tratamentos.

5.7.2 *Teor de clorofila*

O teor de clorofila das folhas foi quantificado em todas as folhas de todos os nós vegetativos após o fim do período de 30 dias do experimento de cultivo na estufa utilizando um medidor de clorofila SPAD-502 Plus. O funcionamento do equipamento baseia-se na diferença de densidade óptica a dois comprimentos de onda¹⁴⁵ e permite medições rápidas dos níveis de clorofila através do fechamento da cabeça de medição sobre a folha, não danificando sua estrutura. O sistema de iluminação presente na cabeça de medição é composto por um LED vermelho (650 *nm*) e um LED infravermelho (940 *nm*) responsáveis por emitir luz sequencialmente pela janela de emissão. Inicialmente, é feita uma calibração do equipamento fechando a cabeça de medição sem amostra. Em seguida, posiciona-se a folha no porta-amostras e a radiação emitida pelos LEDs passa pela folha. A **luz transmitida** atinge o receptor, composto por um fotodiodo

de silício responsável por converter luz em sinais elétricos. Por fim, a razão das intensidades das luzes transmitidas é calculada e é feito um processamento junto com os dados obtidos na calibração para gerar o valor SPAD-502, correspondente ao teor de clorofila presente na folha usada como amostra.¹⁴⁶ Os dados obtidos foram utilizados para a construção de gráficos de teor de clorofila (unidades *SPAD*) por nós vegetativos (V_C , V_1 , V_2 ...) das plantas de cada tratamento.

5.7.3 Massa fresca e massa seca de plantas

A massa fresca das plantas foi pesada ao fim do experimento utilizando uma balança analítica com precisão de 0,0001 g. Para isso, as plantas foram retiradas dos vasos e as partes aéreas foram separadas das raízes com uma tesoura. Em seguida, as raízes das plantas foram lavadas três vezes com água corrente para remoção completa do substrato. Com o auxílio de papéis toalha, as raízes foram secas três vezes para absorver do excesso de água. Por fim, as partes aéreas e as raízes das plantas foram pesadas utilizando um béquer como porta-amostras, tarando a balança com o béquer posicionado em sua face superior antes de cada medida. As amostras pesadas foram armazenadas individualmente em sacos de papel devidamente identificados em uma estufa de secagem por três dias a temperatura de 60 °C para remoção do conteúdo de água. Após três dias de secagem, os sacos de papel contendo as amostras foram retirados da estufa de secagem e a massa seca das partes aéreas e das raízes foi aferida utilizando o mesmo procedimento utilizado para a pesagem da massa fresca. O objetivo dessa análise foi observar se o tratamento das sementes com luz causa promoção de crescimento nos estágios posteriores do desenvolvimento das plantas através de variações nos valores aferidos para as massas fresca e seca, tanto da raiz quanto da parte aérea.

5.8 Estatística dos dados

A estatística dos dados de todos os experimentos foi realizada utilizando o *software* SASM-AGRI desenvolvido pelo Departamento de Agronomia da Universidade de Londrina. O delineamento experimental foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e para separação de médias foi utilizado o teste de Tukey a 5% de significância ($p\text{-value} \leq 0.05$). A Análise de Variância é uma ferramenta estatística que tem como objetivo verificar se há diferenças entre distribuições de uma medida entre três ou mais grupos. Supondo que três tratamentos (controle e duas doses de luz) realizados

em um experimento apresentem a mesma variabilidade e a mesma média de desempenho, as distribuições destes tratamentos tendem a se sobrepor, evidenciando assim que não existe diferença entre as medidas aferidas para cada um dos grupos. Uma vez que a variabilidade interna entre grupos sejam iguais e as médias de desempenho sejam diferentes, as distribuições se distanciam à medida em que as médias de desempenho se diferenciam.¹⁴⁷

Para que a ANOVA possa ser realizada, é necessário que os dados sigam as seguintes regras:

1. Cada elemento amostral deve ser independente;
2. Os grupos comparados devem apresentar homogeneidade de variância;
3. A distribuição dos dados deve ser normal.

O Teste de Tukey para comparações múltiplas é um teste estatístico que compara os dados par a par. Consiste basicamente em comparar todos os possíveis pares de média baseando-se na Diferença Mínima Significativa (DMS). A DMS é calculada utilizando o tamanho amostral dos grupos, a distribuição da amplitude estudentizada e o quadrado médio dos resíduos obtido da ANOVA. Em resumo, uma vez que o p-value resultante da ANOVA seja menor ou igual que o nível de significância imposto pelo usuário (por exemplo, $p\text{-value} \leq 0.05$), os dados apresentam diferenças significativas entre os grupos e essas diferenças podem ser evidenciadas através da aplicação do Teste de Tukey (letras diferentes para tratamentos estatisticamente diferentes).¹⁴⁸

RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pela bioestimulação de sementes de soja com fontes de luz LED e *laser*. Para melhor organização dos resultados, os experimentos foram divididos em três Seções de acordo com a modalidade do experimento, sendo estas: **experimentos de germinação em rolo germitest**, **experimento de velocidade de emergência** e **experimentos de cultivo na estufa**. As tabelas com os valores aferidos serão apresentadas junto com a discussão, seguidas dos gráficos e imagens das amostras.

6.1 Experimentos de germinação em rolo germitest

No primeiro experimento de germinação em rolo germitest, foram testadas as seguintes doses de luz com o *laser*: 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 e 3,2 J/cm^2 , e o controle foi realizado com sementes não tratadas com luz. Foi observado que a irradiação de sementes de soja com luz *laser* de comprimento de onda 660 nm causou aumentos nas taxas de germinação e na massa de plântulas, demonstrando indícios de promoção de crescimento nos estágios iniciais de desenvolvimento. A Tabela 6.1 resume os resultados obtidos no experimento.

Tabela 6.1 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser*. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Tratamento | Taxa de germinação (%) | Massa fresca (g) | Massa seca (g) |
|--------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| Controle | 91,0 ± 2,2 bc | 0,2865 ± 0,0209 b | 0,0171 ± 0,0020 c |
| 0,2 J/cm^2 | 89,5 ± 1,0 c | 0,2122 ± 0,0095 c | 0,0132 ± 0,0011 d |
| 0,4 J/cm^2 | 94,8 ± 1,7 ab | 0,3016 ± 0,0148 b | 0,0183 ± 0,0012 c |
| 0,8 J/cm^2 | 91,0 ± 0,8 bc | 0,2100 ± 0,0063 c | 0,0130 ± 0,0003 d |
| 1,6 J/cm^2 | 96,5 ± 1,3 a | 0,3775 ± 0,0149 a | 0,0271 ± 0,0014 b |
| 3,2 J/cm^2 | 92,0 ± 3,6 ab | 0,3852 ± 0,0266 a | 0,0314 ± 0,0017 a |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As doses 0,4 e 1,6 J/cm^2 apresentaram as maiores taxas de germinação (Figura 6.1a), com aumentos de 3,8 e 5,5% quando comparadas com o controle (sem tratamento com luz).

Apesar de os aumentos observados serem pequenos, foi possível observar que a incidência de luz para o tratamento de sementes pode promover aumentos nas taxas de germinação, o que é economicamente interessante pensando na escala de produção de soja brasileira. No caso das massas das plântulas, as doses 1,6 e 3,2 J/cm^2 aumentaram a massa fresca em 32 e 34%, respectivamente (Figura 6.1b). Para o caso da massa seca, os aumentos causados pelas mesmas doses foram de 58 e 84%, respectivamente, demonstrando que o tratamento com luz causou promoção de crescimento nos estágios iniciais de desenvolvimento das plântulas de soja (Figura 6.1c). O aumento da massa seca de plântulas também foi observado por Hernandez *et al.* quando trataram sementes de milho (*Zea mays* L.) com *laser* de GaAlAs (660 nm) na dose de luz 1,2 J/cm^2 e observaram aumentos de 63% quando comparado com o controle.

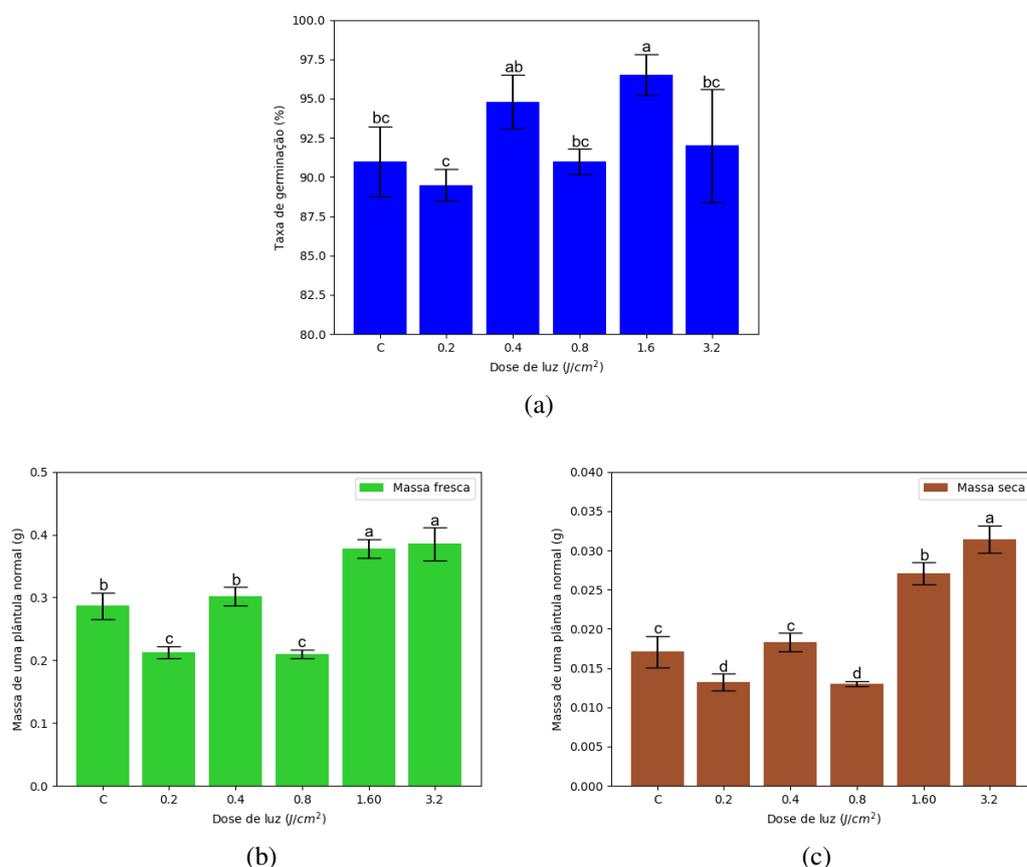


Figura 6.1 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser* após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6.2, é possível observar exemplos representativos das plântulas normais obtidas no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser* após sete dias na BOD. As plântulas obtidas após o tratamento das sementes com as doses de luz 1,6 J/cm^2 (Figura 6.2e) e 3,2 J/cm^2 (Figura 6.2f) apresentaram maior crescimento do hipocótilo e da raiz primária quando comparadas com o controle (Figura 6.2a), além de apresentarem maior desenvolvimento

de raízes secundárias, evidenciando que estas doses de luz promoveram o crescimento inicial das plântulas.

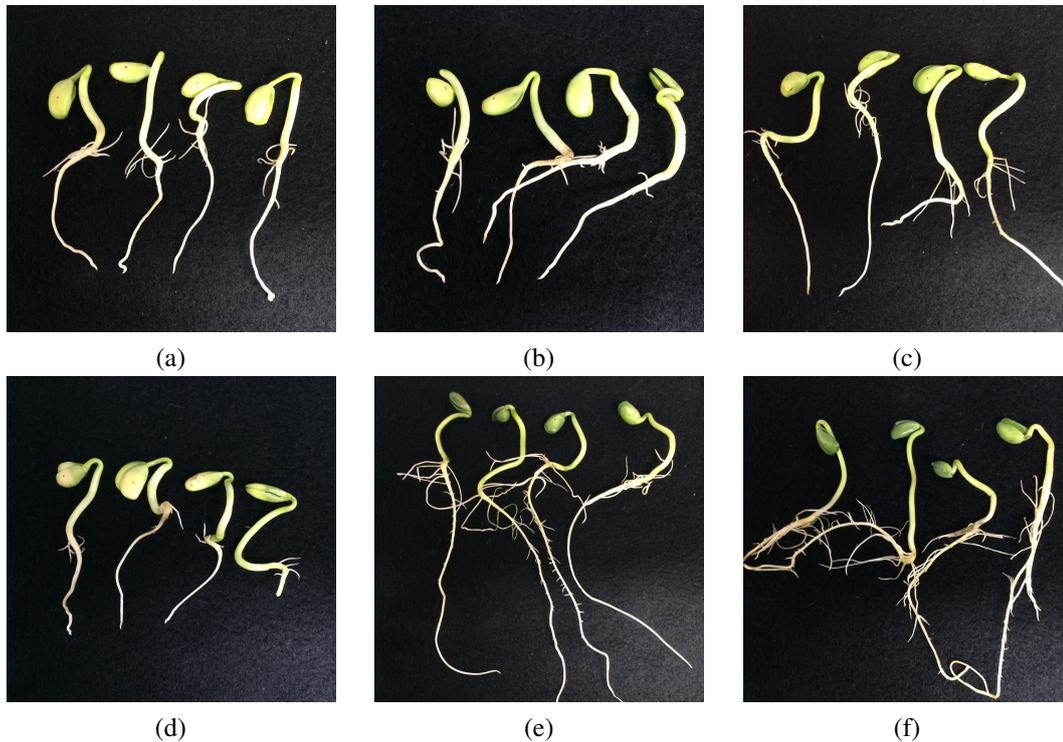


Figura 6.2 – Plântulas normais obtidas no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser*. (a) Controle. (b) $0,2 J/cm^2$. (c) $0,4 J/cm^2$. (d) $0,8 J/cm^2$. (e) $1,6 J/cm^2$. (f) $3,2 J/cm^2$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, o experimento foi realizado com as mesmas doses de luz com a *biotable* (fonte de luz LED). Foi observado que a irradiação de sementes de soja com luz LED de comprimento de onda $660 nm$ não causou aumentos nas taxas de germinação, mas sim na massa de plântulas, demonstrando indícios de promoção de crescimento nos estágios iniciais de desenvolvimento. A Tabela 6.2 resume os resultados obtidos no experimento.

Tabela 6.2 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com a *biotable*. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Tratamento | Taxa de germinação (%) | Massa fresca (g) | Massa seca (g) |
|--------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Controle | $92,5 \pm 2,6$ a | $0,2668 \pm 0,0042$ c | $0,0168 \pm 0,0009$ c |
| $0,2 J/cm^2$ | $94,0 \pm 3,4$ a | $0,3730 \pm 0,0105$ a | $0,0304 \pm 0,0032$ a |
| $0,4 J/cm^2$ | $92,3 \pm 2,8$ a | $0,3545 \pm 0,0065$ ab | $0,0249 \pm 0,0002$ b |
| $0,8 J/cm^2$ | $94,3 \pm 2,1$ a | $0,3677 \pm 0,0174$ ab | $0,0304 \pm 0,0016$ a |
| $1,6 J/cm^2$ | $93,0 \pm 2,2$ a | $0,3426 \pm 0,0161$ ab | $0,0238 \pm 0,0012$ b |
| $3,2 J/cm^2$ | $93,5 \pm 1,7$ a | $0,3391 \pm 0,0237$ b | $0,0234 \pm 0,0029$ b |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar de as doses de luz 0,2 e 0,8 J/cm^2 apresentarem as maiores taxas de germinação (Figura 6.3a), não houve diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de significância, sugerindo que a luz LED influenciou a excitação do fitocromo de uma maneira diferente do que a do *laser* na etapa de germinação. No caso das massas das plântulas, estas doses aumentaram a massa fresca em 40 e 38%, respectivamente (Figura 6.3b). Para o caso da massa seca, os aumentos causados pelas mesmas doses foram de 81% para ambas as condições, demonstrando que o tratamento com luz LED também causou promoção de crescimento nos estágios iniciais de desenvolvimento das plântulas de soja (Figura 6.3c) O aumento da biomassa de plântulas gerada pela bioestimulação de sementes com a fonte de luz LED reafirma os resultados obtidos por Kuznetsova *et al.* que também utilizaram fontes de luz incoerentes, no caso lâmpadas incandescentes com filtros que permitiam a transmissão de 660 nm e observaram aumentos na biomassa e produtividade de *Solanum laciniatum*.

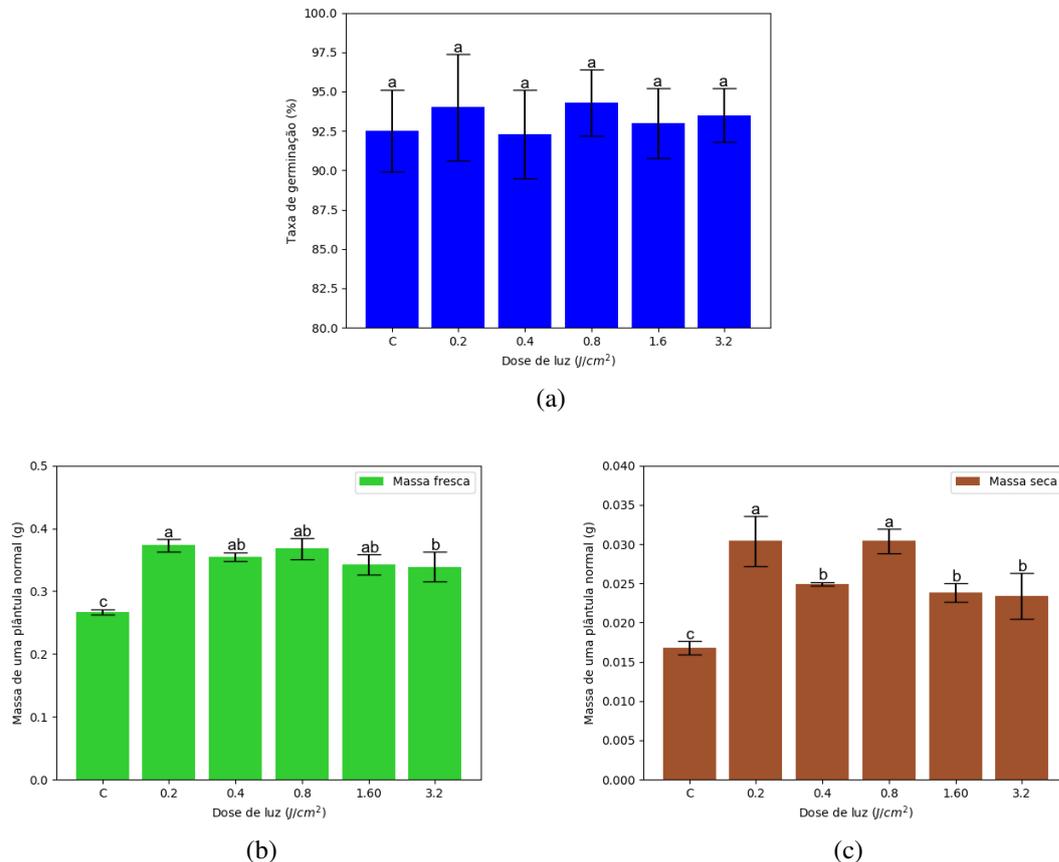


Figura 6.3 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com a *biotable* após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6.4, é possível observar exemplos representativos das plântulas normais obtidas no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com a *biotable* após sete dias na BOD. As plântulas obtidas após o tratamento das sementes com as doses de luz 0,2 J/cm^2

(Figura 6.4b) e $0,8 J/cm^2$ (Figura 6.4d) apresentaram maior crescimento do hipocótilo, da raiz primária e maior desenvolvimento de raízes secundárias quando comparadas com o controle (Figura 6.4a).

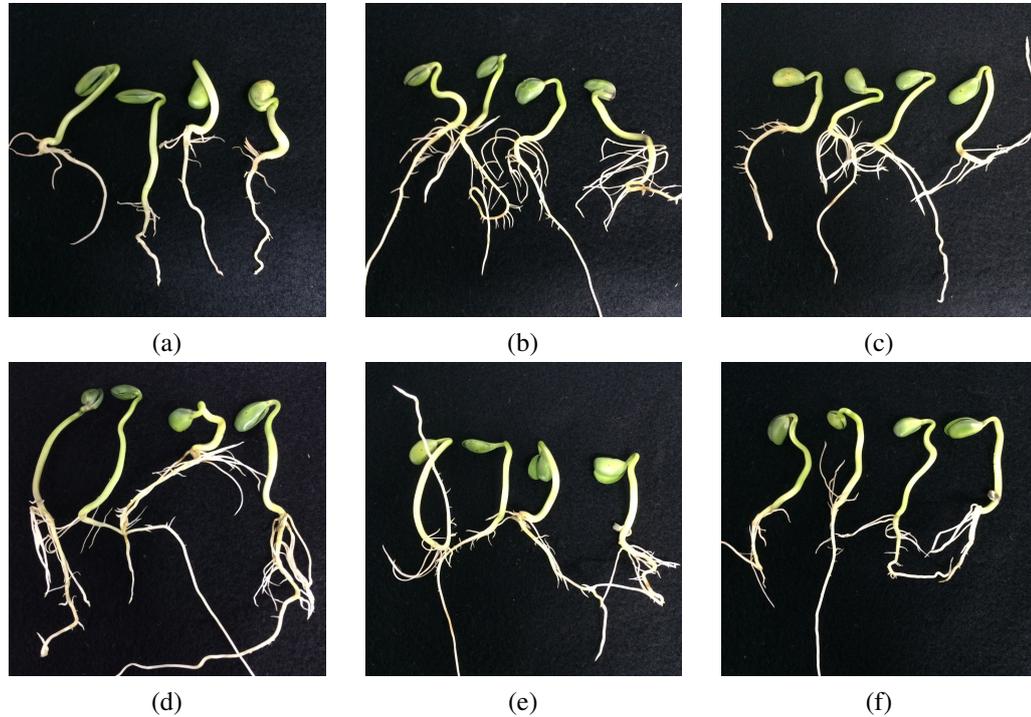


Figura 6.4 – Plântulas normais obtidas no primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o *biotable*. (a) Controle. (b) $0,2 J/cm^2$. (c) $0,4 J/cm^2$. (d) $0,8 J/cm^2$. (e) $1,6 J/cm^2$. (f) $3,2 J/cm^2$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o experimento com a *biotable* não apresentou resultados significativos para a germinação, optou-se por não fazer uma otimização de doses de luz com o equipamento e realizar os próximos experimentos com o *laser* explorando doses de luz ao redor da dose $1,6 J/cm^2$, uma vez que esta apresentou os melhores resultados para a germinação (aumento de 5,5%) e resultados promissores para a massa fresca e massa seca de plântulas (aumentos de 32 e 58%). Desta forma, foi realizado com o *laser* nas doses: 1,0; 1,3; 1,6; 1,9 e $2,1 J/cm^2$ (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no segundo experimento de germinação em rolo germitest com o *laser*. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Tratamento | Taxa de germinação (%) | Massa fresca (g) | Massa seca (g) |
|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Controle | $87,5 \pm 2,6$ b | $0,2905 \pm 0,0505$ c | $0,0241 \pm 0,0031$ b |
| $1,0 J/cm^2$ | $87,5 \pm 1,9$ b | $0,3001 \pm 0,0132$ c | $0,0265 \pm 0,0006$ ab |
| $1,3 J/cm^2$ | $87,8 \pm 3,2$ b | $0,3133 \pm 0,0110$ bc | $0,0273 \pm 0,0008$ ab |
| $1,6 J/cm^2$ | $90,5 \pm 1,7$ ab | $0,3660 \pm 0,0145$ a | $0,0263 \pm 0,0015$ ab |
| $1,9 J/cm^2$ | $91,8 \pm 1,5$ ab | $0,3557 \pm 0,0068$ ab | $0,0284 \pm 0,0014$ a |
| $2,1 J/cm^2$ | $93,0 \pm 1,4$ a | $0,3849 \pm 0,0192$ a | $0,0301 \pm 0,0024$ a |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira observação realizada neste experimento foi de que as taxas de germinação de plântulas normais para todas as condições foram menores, uma vez que as sementes tendem a perder gradualmente seu potencial de germinação com o tempo. As doses de luz 1,9 e 2,1 J/cm^2 apresentaram as maiores taxas de germinação comparadas com o controle, com aumentos de 4,3 e 5,5%, respectivamente (Figura 6.5a). Para o caso das massas, as mesmas doses de luz provocaram aumentos de 22 e 32% na massa fresca das plântulas (Figura 6.5b) e 18 e 25% na massa seca (Figura 6.5c).

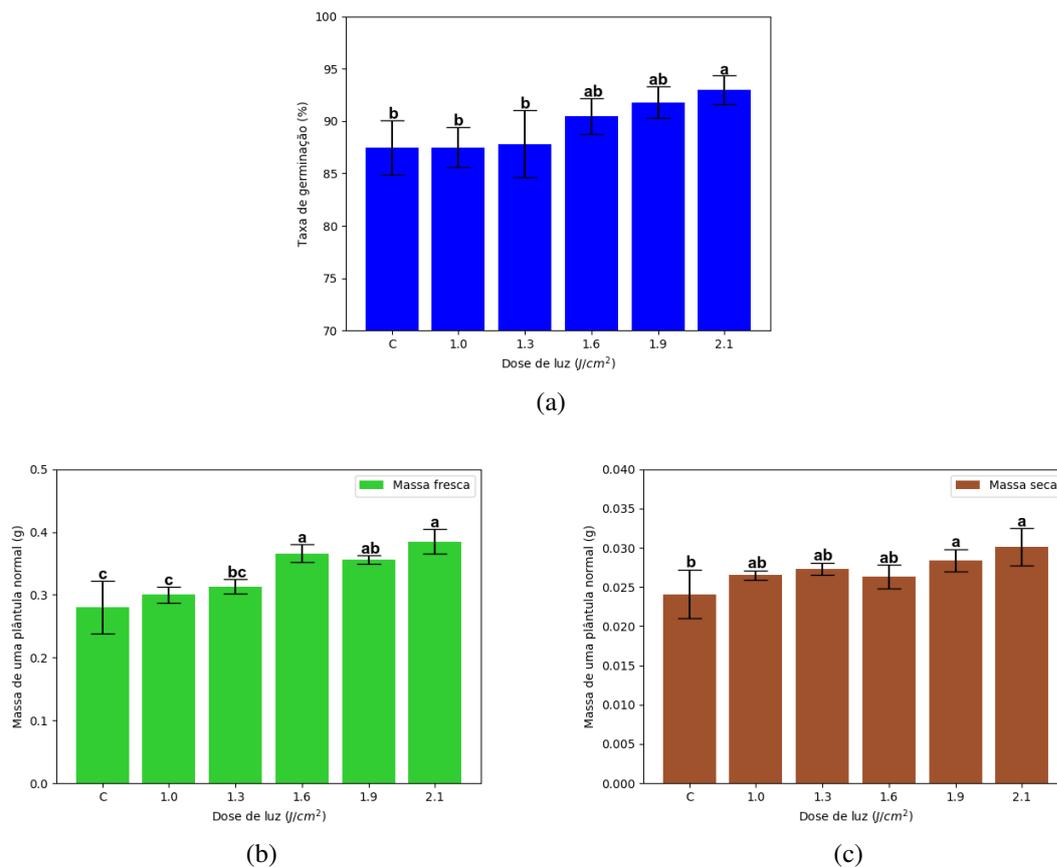


Figura 6.5 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no segundo experimento de germinação em rolo germitest com o *laser* após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6.6, é possível observar exemplos representativos das plântulas normais obtidas no segundo experimento de germinação em rolo germitest com o *laser* após sete dias na BOD. As plântulas obtidas após o tratamento das sementes com as doses de luz 1,9 (Figura 6.6e) e 2,1 J/cm^2 (Figura 6.6f) apresentaram maior crescimento do hipocótilo, da raiz primária e maior desenvolvimento de raízes secundárias quando comparadas com o controle (Figura 6.6a). A dose de luz 2,1 J/cm^2 neste segundo experimento gerou os mesmos resultados para a taxa de germinação e massa fresca que a dose 1,6 J/cm^2 no primeiro experimento (aumentos de 5,5 e 32%, respectivamente, diferença de aproximadamente 20 dias entre a realização dos

experimentos), sugerindo que existe a possibilidade de que com o envelhecimento das sementes, doses de luz mais altas devem ser utilizadas para gerar os mesmos resultados obtidos em tempos diferentes.

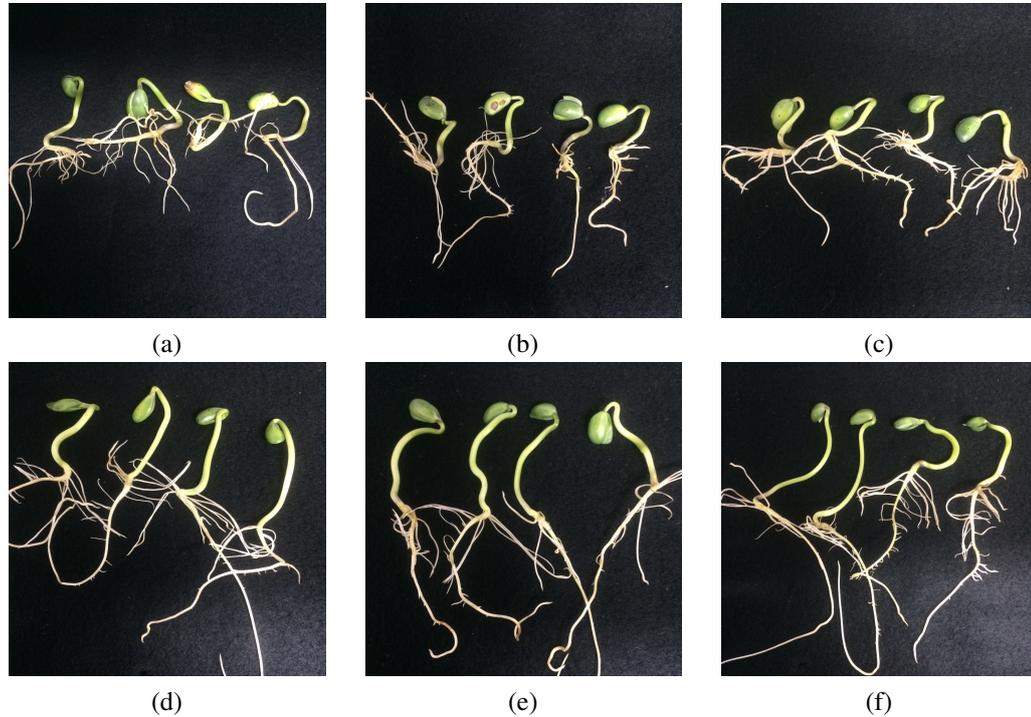


Figura 6.6 – Plântulas normais obtidas no segundo experimento de germinação em rolo germitest com o *laser*. (a) Controle. (b) $1,0 J/cm^2$. (c) $1,3 J/cm^2$. (d) $1,6 J/cm^2$. (e) $1,9 J/cm^2$. (f) $2,1 J/cm^2$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez que no experimento anterior foi necessária uma dose de luz mais alta ($2,1 J/cm^2$) para gerar os mesmos resultados obtidos com a dose $1,6 J/cm^2$, foi realizado um experimento com duas doses de luz mais elevadas do que as previamente testadas para observar se a bioestimulação das sementes seria positiva. Dessa forma, as doses de luz 5 e $10 J/cm^2$ foram utilizadas para irradiar as sementes e prosseguir com o experimento de germinação em rolo germitest. A Tabela 6.4 resume os resultados obtidos.

Tabela 6.4 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no terceiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser*. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Tratamento | Taxa de germinação (%) | Massa fresca (g) | Massa seca (g) |
|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Controle | $87,0 \pm 2,2$ a | $0,3514 \pm 0,0151$ a | $0,0293 \pm 0,0024$ a |
| $5 J/cm^2$ | $84,3 \pm 2,5$ a | $0,3240 \pm 0,0206$ a | $0,0264 \pm 0,0006$ ab |
| $10 J/cm^2$ | $86,3 \pm 3,5$ a | $0,3470 \pm 0,0168$ a | $0,0256 \pm 0,0013$ b |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As doses de luz 5 e $10 J/cm^2$ não apresentaram resultados significativos no teste de Tukey a 5% de significância quando comparadas com o controle nos parâmetros taxa de germinação e

massa fresca. Foi observado que a média dos valores aferidos foi menor em ambos os parâmetros e que o valor alto para o desvio padrão das amostras contribuiu para que a ANOVA seguida da separação pelo teste de Tukey interpretasse que todos os tratamentos são iguais. Em sua revisão bibliográfica sobre bioestimulação de sementes, Hernandez *et al.* separam os efeitos do processo de irradiação em positivos, neutros e negativos, de maneira com que a obtenção de cada um destes depende de diversos fatores, sendo um deles o genótipo/características fisiológicas da semente e o outro a dose luz utilizada para irradiar as sementes, sendo esta um fator que deve ser otimizado. No caso, pode-se considerar que o efeito da bioestimulação neste experimento foi neutro para as taxas de germinação (Figura 6.7a) e massa fresca (Figura 6.7b) de plântulas normais, e negativo para a massa seca (Figura 6.7c) com decréscimos de 9,8% e 12,6% para as doses 5 e 10 J/cm^2 , respectivamente, reafirmando que doses mais baixas que o limite superior de 5 J/cm^2 devem ser utilizadas para a cultivar estudada. A Figura 6.8 ilustra exemplos representativos das plântulas normais obtidas nos tratamentos realizados no experimento, sendo possível observar que as plântulas aparentam características semelhantes, sem indícios claros de bioestimulação.

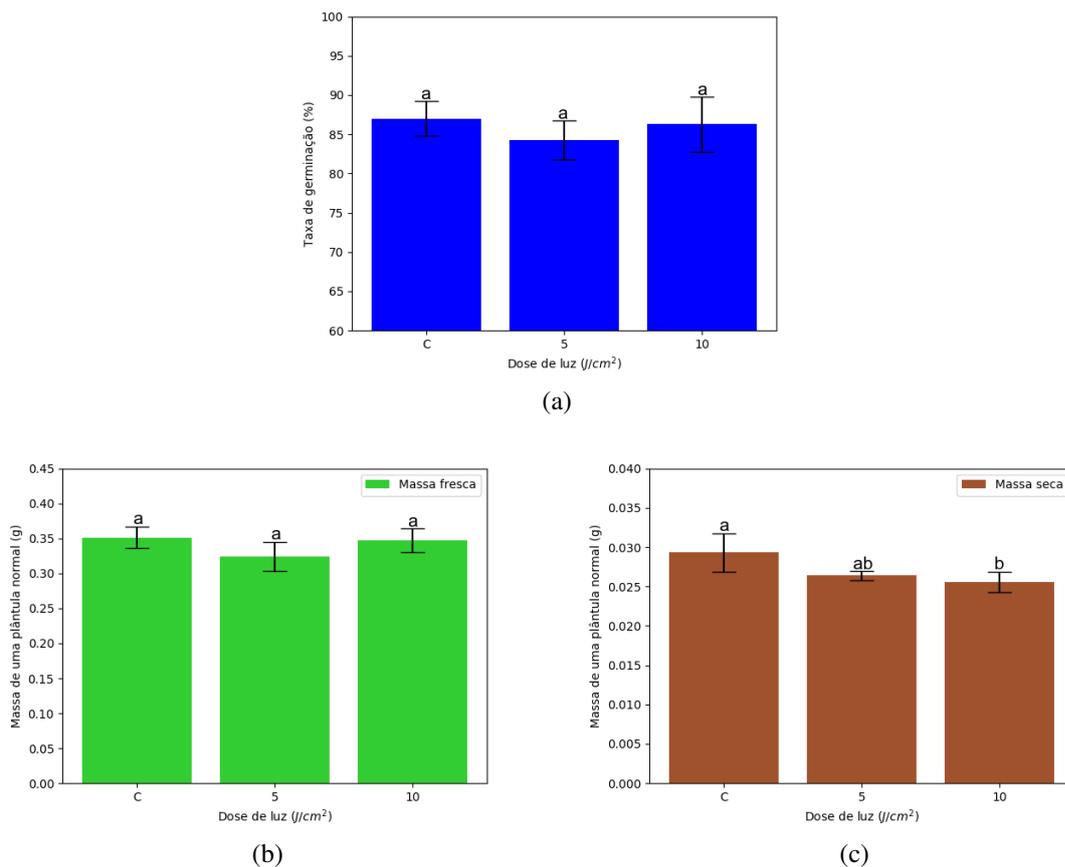


Figura 6.7 – Taxa de germinação (%), massa fresca (g) e massa seca (g) de plântulas normais no terceiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser* após sete dias de incubamento na BOD. (a) Taxa de germinação. (b) Massa fresca. (c) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

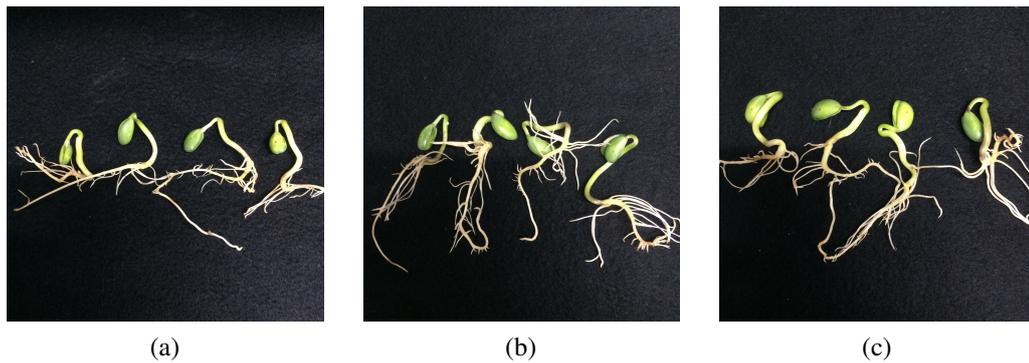


Figura 6.8 – Plântulas normais obtidas no terceiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser*. (a) Controle. (b) $5 J/cm^2$. (c) $10 J/cm^2$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2 Experimento de velocidade de emergência

No experimento de velocidade de emergência, foram testadas as doses de luz com o *laser* que apresentaram resultados significativos no primeiro experimento de germinação, no caso $1,6$ e $3,2 J/cm^2$, além do controle. A escolha de manter os próximos experimentos apenas com o *laser* deve-se ao fato de que os resultados obtidos nos experimentos anteriores para o parâmetro taxa de germinação com esse equipamento terem sido considerados como prioridade. A Tabela 6.5 resume os resultados obtidos no experimento. Foi observado que as sementes tratadas com a dose de luz $1,6 J/cm^2$ apresentaram aumento de 28% do índice de velocidade de emergência de plântulas (IVE), assim como a redução do tempo médio de emergência (TME) de 5,24 dias (controle) para 4,71 dias. As plântulas começaram a emergir do solo no quarto dia de experimento (Figura 6.9a) e os valores aferidos para emergência foram maiores para os tratamentos com luz do que com o controle. Entretanto, a porcentagem de plântulas emergidas ao fim do experimento (sete dias) não apresentou diferença significativa no teste de Tukey. A dose de luz $3,2 J/cm^2$ também causou aumentos no IVE (Figura 6.9b) e diminuição do TME (Figura 6.9c). Hernandez *et al.* trataram sementes de milho com *laser* de (660 nm) na dose $1,2 J/cm^2$ e observaram aumentos de 43% no parâmetro IVE, evidenciando que o tratamento de sementes com luz causa aumentos na velocidade de emergência de plântulas.

Tabela 6.5 – Emergência aos sete dias (%), índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo médio de emergência (TME) de plântulas no experimento de velocidade de emergência em bandejas na estufa. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Tratamento | Emergência aos sete dias (%) | Índice de velocidade de emergência | Tempo médio de emergência (dias) |
|--------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Controle | $83,6 \pm 1,4$ a | $14,0 \pm 0,6$ b | $5,24 \pm 0,07$ a |
| $1,6 J/cm^2$ | $86,4 \pm 5,4$ a | $18,0 \pm 1,3$ a | $4,71 \pm 0,13$ c |
| $3,2 J/cm^2$ | $83,6 \pm 10,3$ a | $15,8 \pm 3,0$ ab | $4,98 \pm 0,13$ b |

Fonte: Elaborada pelo autor.

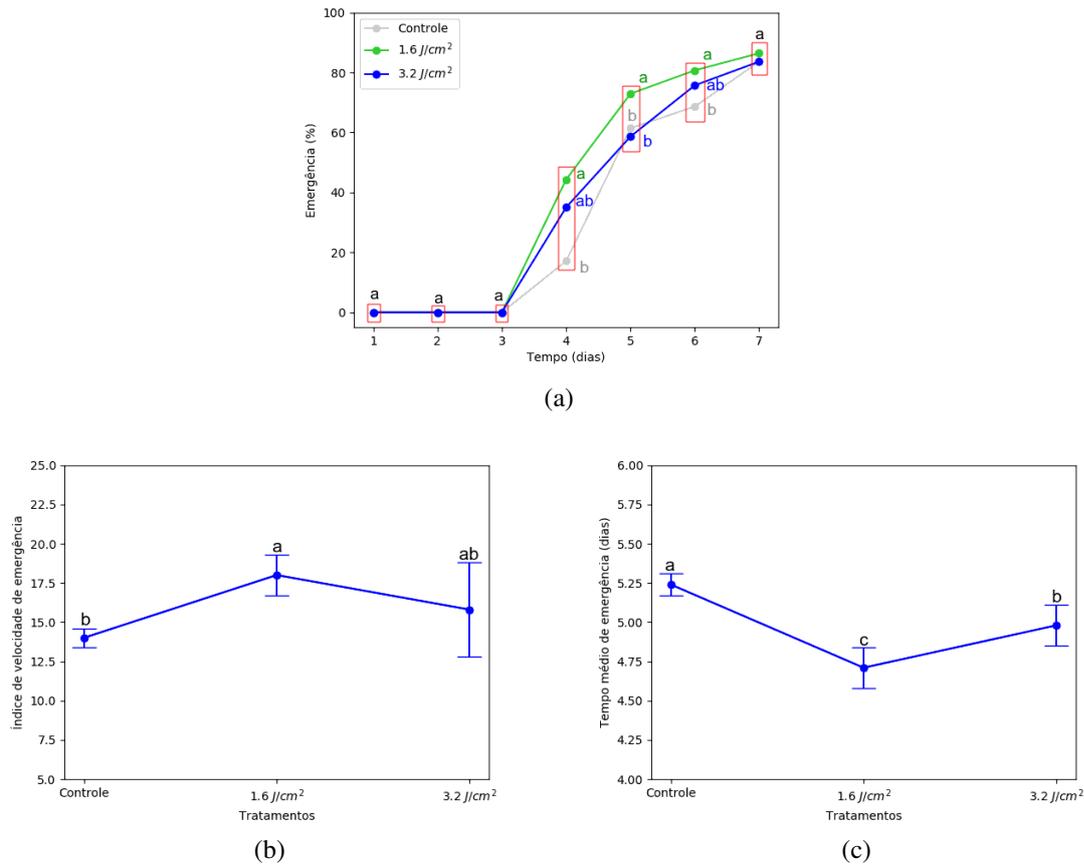


Figura 6.9 – Emergência (%), índice de velocidade de emergência e tempo médio de emergência (dias) de plântulas no experimento de velocidade de emergência em bandejas na estufa. (a) Emergência. (b) Índice de velocidade de emergência. (c) Tempo médio de emergência. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 6.10 ilustra exemplos representativos das plântulas obtidas nos tratamentos realizados no experimento de velocidade de emergência em bandejas na estufa após sete dias de cultivo e o *Time Lapse* do crescimento das plântulas pode ser visto acessando o [link](#).



Figura 6.10 – Plântulas obtidas no experimento de velocidade de emergência em bandejas na estufa após sete dias de cultivo. (a) Controle. (b) 1,6 J/cm². (c) 3,2 J/cm².

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3 Experimentos de cultivo na estufa

Neste primeiro experimento de cultivo na estufa, os tratamentos foram: controle (sem irradiação de luz), 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 e 3,2 J/cm^2 com o *laser* e a amostragem experimental foi de quatro vasos para cada tratamento. A Tabela 6.6 resume os resultados obtidos no experimento.

Tabela 6.6 – Altura aos 28 dias (cm), teor de clorofila (unidades SPAD), massa fresca (g) e massa seca (g) de plantas de soja no primeiro experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Tratamento | Altura (cm) | Teor de clorofila (SPAD) | Massa fresca (g) | | Massa seca (g) | |
|--------------|--------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 28 Dias | V5 | Parte aérea | Raiz | Parte aérea | Raiz |
| Controle | 24,6 ± 2,5 a | 24,8 ± 3,5 a | 7,6538 ± 0,8184 a | 2,7223 ± 0,5360 a | 1,4450 ± 0,1797 a | 0,3858 ± 0,0248 a |
| 0,2 J/cm^2 | 21,9 ± 1,0 a | 20,9 ± 2,0 a | 6,4293 ± 1,2461 a | 3,1746 ± 0,6936 a | 1,2399 ± 0,2619 a | 0,3489 ± 0,0601 a |
| 0,4 J/cm^2 | 22,8 ± 5,7 a | 27,8 ± 7,4 a | 7,8777 ± 2,1285 a | 3,4820 ± 0,9060 a | 1,4060 ± 0,4362 a | 0,3586 ± 0,0840 a |
| 0,8 J/cm^2 | 26,0 ± 3,2 a | 27,3 ± 2,9 a | 8,5505 ± 0,8370 a | 4,1997 ± 1,1059 a | 1,5898 ± 0,2082 a | 0,4328 ± 0,1033 a |
| 1,6 J/cm^2 | 25,0 ± 1,7 a | 27,6 ± 3,1 a | 9,2800 ± 2,2033 a | 3,3549 ± 1,5009 a | 1,5943 ± 0,3679 a | 0,3789 ± 0,1335 a |
| 3,2 J/cm^2 | 23,1 ± 2,7 a | 30,1 ± 2,5 a | 8,4796 ± 1,1938 a | 3,6891 ± 0,4768 a | 1,4944 ± 0,1967 a | 0,4035 ± 0,0516 a |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após 28 dias de crescimento na estufa, os tratamentos que apresentaram plantas cujo valor médio de altura foram maiores eram 0,8 e 1,6 J/cm^2 (Figura 6.11a). No estágio vegetativo V₅ (30 dias), o valor médio para o teor de clorofila das plantas do tratamento 3,2 J/cm^2 superou em 17% o teor de clorofila médio das plantas controle (Figura 6.11b).

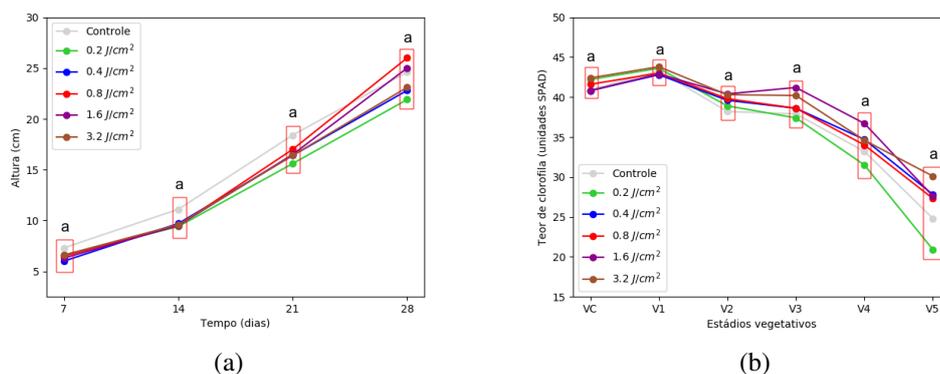


Figura 6.11 – Altura ao longo de 28 dias (cm) e teor de clorofila (unidades SPAD) nos seis primeiros estádios vegetativos de plantas de soja no primeiro experimento de cultivo na estufa com *laser* após 30 dias de crescimento. (a) Altura. (b) Teor de clorofila. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a análise das massas, duas doses de luz apresentaram valores promissores, uma para a parte aérea e outra para raiz. A dose de luz 1,6 J/cm^2 aumentou 21% a massa fresca da parte aérea e 9,4% a massa seca, enquanto a dose 0,8 J/cm^2 aumentou 54% a massa fresca das raízes e 9% a massa seca das plantas (Figuras 6.12a e 6.12b).

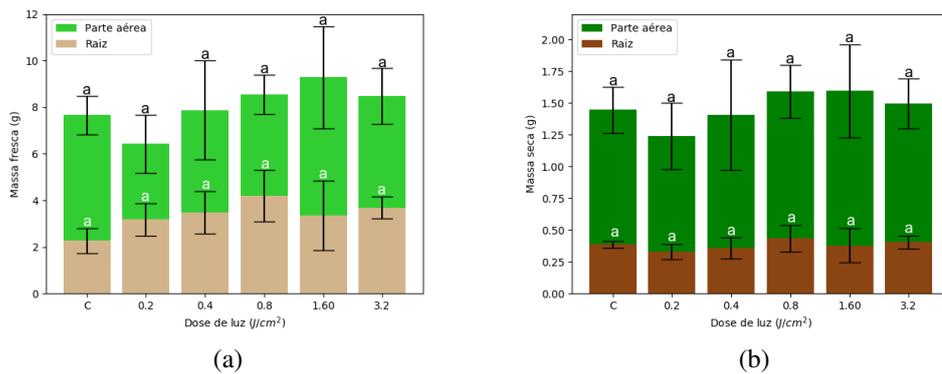


Figura 6.12 – Massa fresca (g) e massa seca (g) da parte aérea e raiz de plantas de soja no primeiro experimento de cultivo na estufa com *laser* após 30 dias de crescimento. (a) Massa fresca. (b) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra de mesma cor nas colunas não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6.13, é possível observar as plantas cujos valores aferidos para altura mais se aproximam do valor médio das quatro repetições no experimento de cultivo na estufa após 30 dias de crescimento. Com as imagens obtidas todos os dias às 7h30 pelo módulo *Raspicam*, foi construído um *Time Lapse* do crescimento das plantas com 30 imagens correspondente aos 30 dias de crescimento das plantas na estufa que pode ser visto acessando o [link](#).

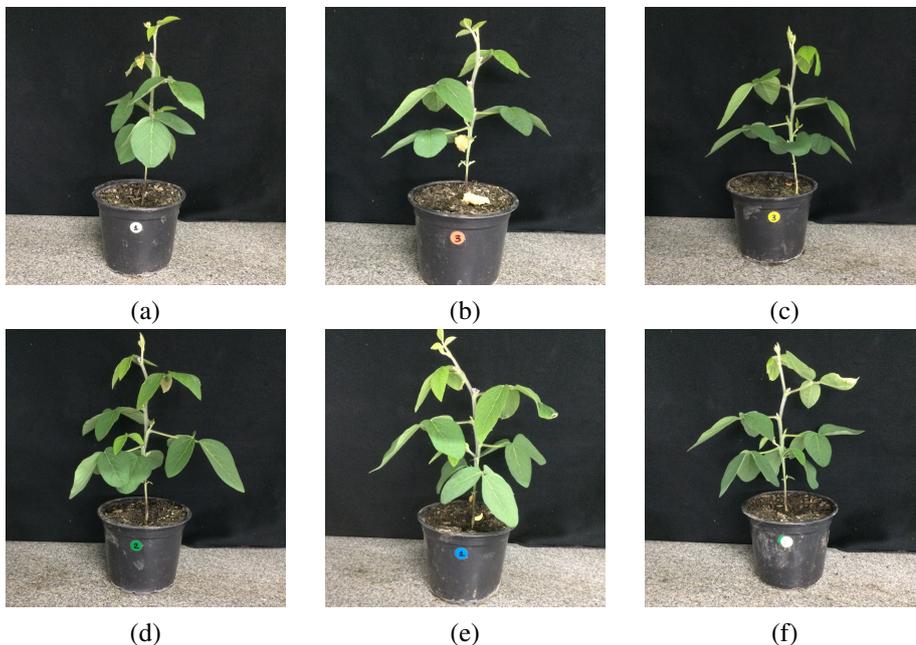


Figura 6.13 – Plantas de soja do primeiro experimento de cultivo na estufa cujos valores aferidos para altura são mais próximos da média das quatro repetições para cada tratamento. (a) Controle. (b) 0,2 J/cm². (c) 0,4 J/cm². (d) 0,8 J/cm². (e) 1,6 J/cm². (f) 3,2 J/cm².

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar de alguns dos parâmetros medidos serem consideravelmente maiores para plantas cujas sementes foram tratadas inicialmente com determinadas doses de luz quando comparadas

com o controle, não foi possível afirmar com este experimento que houve algum tipo de promoção de crescimento nas plantas em estágios avançados de desenvolvimento, uma vez que o desvio padrão das quatro repetições de cada tratamento foi elevado e dessa forma não resultou em diferenças significativas no teste de Tukey a 5% de significância. Desta forma, o experimento foi repetido apenas com o controle e os tratamentos $0,8 J/cm^2$ e $1,6 J/cm^2$ e o número de repetições por tratamento foi ampliado para oito vasos, totalizando os 24 vasos que podem ser acomodados na bancada de cultivo. À cada sete dias durante o período de 30 dias, a altura de todas as plantas foi aferida e os resultados podem ser visualizados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Altura (cm) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Altura (cm) | | | | |
|--------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|
| Tratamento | 7 dias | 14 dias | 21 dias | 28 dias |
| Controle | $5,8 \pm 0,6$ b | $12,4 \pm 0,8$ b | $22,6 \pm 0,9$ a | $39,6 \pm 1,8$ a |
| $0,8 J/cm^2$ | $7,7 \pm 1,0$ a | $14,1 \pm 1,2$ a | $23,9 \pm 2,5$ a | $40,8 \pm 2,2$ a |
| $1,6 J/cm^2$ | $6,2 \pm 1,1$ b | $12,8 \pm 1,2$ ab | $22,6 \pm 1,7$ a | $39,8 \pm 1,0$ a |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como observado na Figura 6.14, as plantas geradas das sementes tratadas com as doses de luz $0,8 J/cm^2$ e $1,6 J/cm^2$ apresentaram maiores valores de altura quando comparadas com o controle. Entretanto, o aumento desse parâmetro foi significativo apenas nos primeiros 14 dias de experimento, com a dose $0,8 J/cm^2$ gerando as maiores plantas. Nas duas medidas seguintes, em 21 e 28 dias, os tratamentos não diferiram do controle.

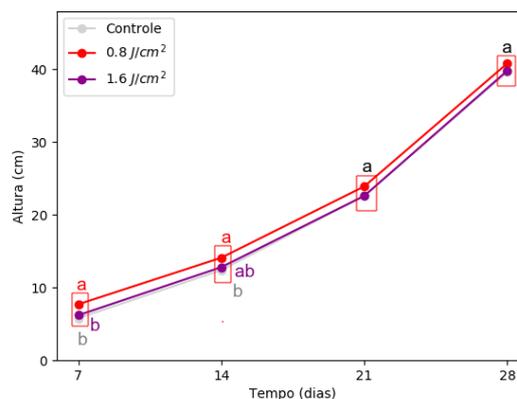


Figura 6.14 – Altura ao longo de 28 dias (cm) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa com *laser* após 30 dias de crescimento. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

De maneira contrária ao primeiro experimento de cultivo na estufa, as plantas nesse segundo experimento cresceram e encostaram nas lâmpadas, queimando algumas folhas. Dessa forma, a altura das bandejas de cultivo foi diminuída para aumentar o espaço disponível para

o crescimento das plantas. Entretanto, a ação gerou diminuição da intensidade luminosa e resultou no fenômeno conhecido como estiolamento, processo no qual as plantas crescem mais rapidamente para cima na procura de luz, justificando a maior altura das plantas quando comparadas com primeiro experimento. O teor de clorofila de todos os estádios vegetativos foi medido ao fim de 30 dias de experimento e os dados aferidos podem ser vistos na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Teor de clorofila (unidades SPAD) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Teor de clorofila (unidades SPAD) | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Tratamento | VC | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 |
| Controle | 39,3 ± 5,0 a | 36,2 ± 6,4 a | 40,1 ± 1,6 a | 41,3 ± 2,8 a | 39,7 ± 3,1 a | 36,1 ± 1,8 b | 33,9 ± 1,2 a |
| 0,8 J/cm ² | 36,6 ± 4,9 a | 40,9 ± 4,1 a | 42,4 ± 3,9 a | 44,3 ± 3,5 a | 41,5 ± 3,9 a | 38,9 ± 3,4 ab | 34,3 ± 4,4 a |
| 1,6 J/cm ² | 38,9 ± 4,4 a | 39,7 ± 3,7 a | 41,0 ± 2,6 a | 42,4 ± 3,5 a | 41,8 ± 4,8 a | 40,4 ± 3,7 a | 34,2 ± 2,0 a |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como é possível observar na Figura 6.15, apenas as folhas do nó vegetativo V₅ apresentaram valores significativamente maiores para o teor de clorofila quando comparadas com o controle. Para esse caso, a dose de luz 1,6 J/cm² aumentou em 11,9% o teor de clorofila das folhas. No gráfico, cada retângulo vermelho com a letra *a* no topo significa que a estatística foi feita individualmente para os valores de teor de clorofila correspondentes ao mesmo valor do eixo x (no caso, o nó vegetativo correspondente). Dessa forma, os tratamentos não diferiram no teor de clorofila aferido em todos os outros nós vegetativos.

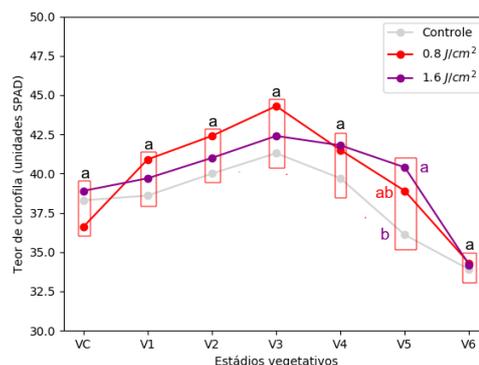


Figura 6.15 – Teor de clorofila (em unidades SPAD) de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa com laser após 30 dias de crescimento. Médias seguidas pela mesma letra nos valores do eixo x (dentro de um mesmo retângulo vermelho) não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao fim de 30 dias de experimento, a massa fresca da parte aérea e da raiz das plantas foram aferidas e armazenadas em uma estufa de secagem para obtenção da massa seca. Os resultados podem ser observados na Tabela 6.9. Com o aumento das repetições de quatro para oito nesse segundo experimento, foi possível observar que de fato as doses de luz que

apresentaram indícios de aumento das massas no primeiro experimento causaram aumentos significativos desses parâmetros nesse segundo experimento.

Tabela 6.9 – Massa fresca (g) e massa seca (g) da parte aérea e raiz de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa após 30 dias. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

| Tratamento | Massa fresca (g) | | Massa seca (g) | |
|-----------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | Parte aérea | Raiz | Parte aérea | Raiz |
| Controle | 12,2045 ± 1,5903 b | 3,8410 ± 1,1628 b | 1,8993 ± 0,2886 b | 0,3392 ± 0,0965 a |
| 0,8 J/cm ² | 14,5518 ± 2,0375 a | 4,5953 ± 0,2998 a | 2,6288 ± 0,4797 a | 0,3734 ± 0,0847 a |
| 1,6 J/cm ² | 12,6709 ± 1,1474 ab | 4,4137 ± 0,9839 ab | 2,0168 ± 0,1187 b | 0,3184 ± 0,0940 a |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6.16, é possível observar os gráficos de massa fresca e massa seca da parte aérea e das raízes. As plantas cujas sementes foram tratadas com a dose de luz 0,8 J/cm² apresentaram aumento da massa fresca da parte aérea e da raiz de 19,2% e 19,6%, respectivamente, quando comparadas com as plantas controle (Figura 6.16a). Para a dose de luz 1,6 J/cm², os respectivos aumentos foram de 3,82% e 14,9%. Ambas as doses de luz apresentaram diferença significativa no Teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância. Para o caso da massa seca (Figura 6.16b), a dose de luz 0,8 J/cm² aumentou 38,4% a massa da parte aérea e 10% a massa da raiz comparado com o controle. Os aumentos para a dose de luz 1,6 J/cm² foram de 6,2% e 6,1% para a parte aérea e raiz, respectivamente.

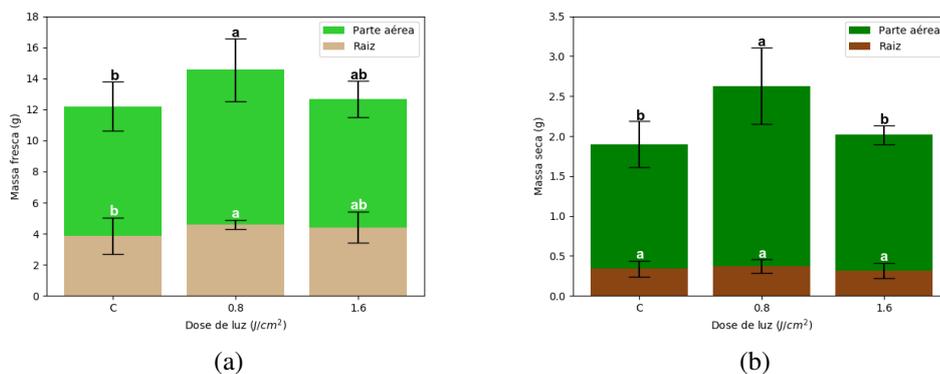


Figura 6.16 – Massa fresca (g) e massa seca (g) da parte aérea e raiz de plantas de soja no segundo experimento de cultivo na estufa com *laser* após 30 dias de crescimento. (a) Massa fresca. (b) Massa seca. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferiram entre si no teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seu artigo, Sacala *et al.* reportam aumentos de 5,7% na massa seca de raízes de beterraba da cultivar Tiziana cujas sementes foram tratadas com a dose de luz 1,75 J/cm², valor próximo da dose de luz 1,6 J/cm² utilizada no experimento e responsável por aumentar a massa das raízes em 6,1%. Apesar dos aumentos observados, a média dos valores aferidos para a massa seca das oito repetições de cada tratamento não diferiu estatisticamente para as

raízes (Figura 6.16b), demonstrando que todos os tratamentos foram iguais. Além disso, os aumentos nas massas das raízes causados pelos tratamentos com luz foram muito maiores (e estatisticamente significantes) para as análises de massa fresca quando comparados com as análises de massa seca, sugerindo que de alguma forma as plantas desses tratamentos absorveram mais água e conseqüentemente apresentaram maiores valores de massa fresca quando comparadas com as raízes das plantas controle.

Na Figura (6.17) é possível observar as plantas cujos valores aferidos para altura mais se aproximam do valor médio das oito repetições no segundo experimento de cultivo na estufa após 30 dias de crescimento e o fenômeno de estiolamento responsável por fazer com que as plantas crescessem em busca de luz e apresentassem alturas maiores do que as observadas no primeiro experimento de cultivo (Figura 6.13). O *Time Lapse* do crescimento das plantas pode ser visto acessando o [link](#). Como esperado, o aumento do número de repetições de quatro vasos (primeiro experimento) para oito vasos (segundo experimento) gerou resultados estatisticamente significantes para quase todos os parâmetros aferidos. Por tratar-se de amostras biológicas, quanto maior o número de repetições por tratamento, mais confiável e estatisticamente significante são os resultados obtidos. Dessa forma, recomenda-se que em experimentos com plantas seja adotado um mínimo de oito repetições, com recomendação ideal de dez vasos ou mais.

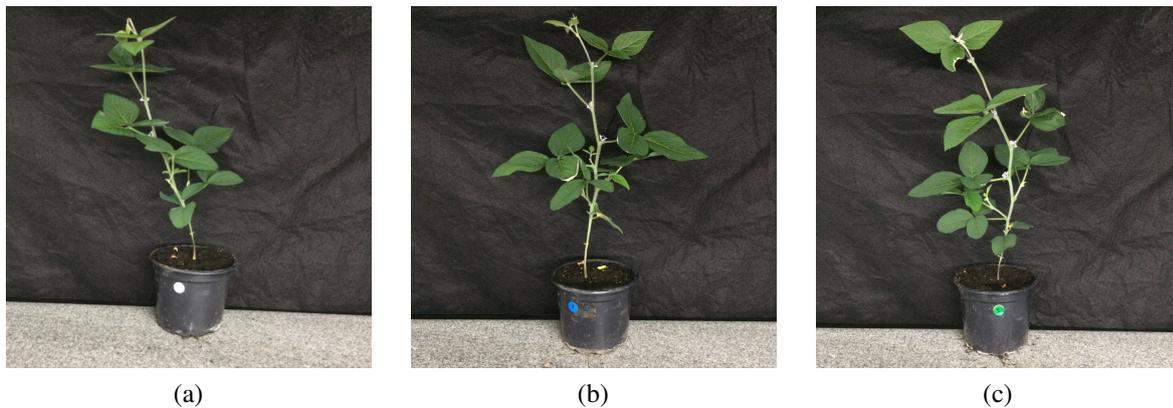


Figura 6.17 – Plantas de soja do segundo experimento de cultivo na estufa cujos valores aferidos para altura são mais próximos da média das oito repetições para cada tratamento. (a) Controle. (b) $0,8 J/cm^2$. (c) $1,6 J/cm^2$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em resumo, foram realizadas três modalidades de experimento. Na modalidade experimento de germinação em rolo germitest, foram estudadas as taxas de germinação e a promoção de crescimento inicial de plântulas de soja cujas sementes foram tratadas com luz, sendo que a dose $1,6 J/cm^2$ com o *laser* apresentou os resultados mais promissores para os parâmetros aferidos. Os diferentes resultados obtidos nos experimentos de germinação para as mesmas doses de luz com o *laser* e com a *biotable* sugerem que a coerência da luz proveniente do *laser* influencia o processo de bioestimulação das sementes. O efeito exato da coerência do *laser* no processo de germinação não foi elucidado, entretanto a característica de uma luz coerente é o fato de esta apresentar mesma fase e direção de propagação, gerando menor espalhamento

da luz dentro da semente, assim como é possível observar na Figura 6.18. Uma vez que a luz proveniente de LEDs não possui coerência e, portanto, não possui mesma fase e direção de propagação, o efeito de espalhamento da luz dentro da semente é maior.

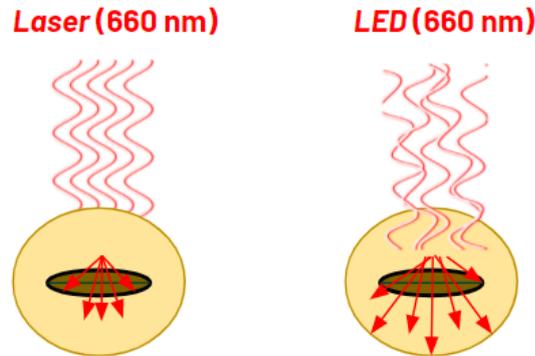


Figura 6.18 – Diferença do comportamento da incidência de luz proveniente de um *laser* (à esquerda) e de um LED (à direita) na superfície de uma semente de soja.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na modalidade experimento de velocidade de emergência, foram estudados o índice de velocidade de emergência, o tempo médio de emergência e a porcentagem total de plântulas emergidas ao fim de sete dias e, novamente, a dose de luz $1,6 J/cm^2$ apresentou melhores resultados para dois dos parâmetros aferidos (IVE e TME).

Na modalidade de experimento cultivo na estufa, foi estudado se as plantas de soja cujas sementes foram tratadas com luz apresentaram aumento no teor de clorofila e promoção de crescimento tardio, sendo este último realizado pelas medidas de altura, massa fresca e massa seca das estruturas parte aérea e raiz das plantas. Para esse último caso, a dose de luz $0,8 J/cm^2$ apresentou os resultados mais promissores de promoção de crescimento das estruturas das plantas, seguida da dose de luz $1,6 J/cm^2$. Como estudos futuros, seria interessante estudar se a irradiação de sementes com luz de comprimento de onda $660 nm$ afeta a qualidade dos grãos de soja, mais especificamente em termos de proteínas e teor de óleo, o que exigiria que as plantas cujas sementes foram irradiadas passassem por todo o ciclo produtivo da cultura.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, os efeitos da bioestimulação de sementes de soja com fontes de luz de comprimento de onda 660 nm foram estudados através de três modalidades diferentes de experimento. Além disso, foi proposto o desenvolvimento dos equipamentos de irradiação e suas respectivas fontes de corrente e a construção de uma estufa *indoor* com iluminação artificial e automação pelo sistema embarcado *Raspberry Pi 3* que tornou-se um novo laboratório vinculado ao *LIO²A* e ao CEPOF.

A estufa construída foi eficiente para o crescimento de plantas de soja durante o decorrer do projeto, demonstrando que é possível a realização de pesquisas e cultivos em pequenos espaços com iluminação artificial e temperatura controlada. Entretanto, a ampliação do espaço disponível na bancada de cultivo para o crescimento das plantas e o aumento da quantidade de lâmpadas *Full Spectrum* (e conseqüentemente da intensidade luminosa) são modificações necessárias para, respectivamente, expandir o tempo de cultivo para mais do que 30 dias e evitar que as plantas passem pelo fenômeno de estiolamento. Além disso, a *Raspberry Pi 3* controlou todos os processos automatizados com eficácia, demonstrando que este sistema embarcado é adequado para automação de pequenas salas e projetos de pesquisa.

Através dos experimentos de germinação em rolos germitest verificou-se que o tratamento de sementes de soja com luz *laser* de comprimento de onda 660 nm causou efeitos de bioestimulação nos estágios iniciais de desenvolvimento das plântulas e estes dividem-se em positivos, neutros ou negativos. Após uma busca preliminar entre algumas doses de luz, a dose $1,6\text{ J/cm}^2$ com o *laser* apresentou os melhores resultados para a taxa de germinação (aumento de 5,5%), massa fresca (aumento de 32%) e massa seca (aumento de 84%) de plântulas normais quando comparados com as plântulas geradas pela condição controle (sem irradiação de luz). Com a fonte de luz LED (*biotable*), o efeito da bioestimulação após os tratamentos com as mesmas doses de luz usadas com o *laser* restringiu-se ao aumento das massas das plântulas nas doses de luz $0,2\text{ J/cm}^2$ e $0,8\text{ J/cm}^2$, sugerindo que a coerência da luz proveniente do *laser* influenciou no processo de bioestimulação e, em especial, nas taxas de germinação.

A tentativa de otimização de doses de luz com o *laser* ao redor da dose $1,6\text{ J/cm}^2$ após 20 dias da realização do primeiro experimento de germinação demonstrou que, com o envelhecimento das sementes, doses de luz mais altas ($2,1\text{ J/cm}^2$) devem ser utilizadas para obter os mesmos incrementos nos parâmetros citados anteriormente. Doses de luz consideravelmente maiores com o *laser* (5 J/cm^2 e 10 J/cm^2) causaram efeitos negativos de bioestimulação.

O experimento de velocidade de emergência demonstrou que o tratamento de sementes com luz *laser* causou aumento no índice de velocidade de emergência (IVE) e no tempo médio de emergência (TME). Nesse caso, a dose de luz $1,6 J/cm^2$ aumentou em 28% a velocidade com que as plântulas emergem do solo e reduziu o tempo médio de emergência de 5,24 dias (controle) para 4,71 dias. A dose de luz $3,2 J/cm^2$ também afetou os parâmetros citados anteriormente mas de maneira mais sutil, com aumento de 12,8% no IVE e redução do TME de 5,24 dias para 4,98 dias. Entretanto, as doses de luz utilizadas não influenciaram na porcentagem total de plântulas emergidas do solo ao fim de sete dias.

O primeiro experimento de cultivo na estufa explorou as mesmas condições do primeiro experimento de germinação em rolo germitest com o *laser*. Entretanto, não houve diferença significativa para os parâmetros: altura, teor de clorofila dos nós vegetativos, massa fresca e massa seca tanto da parte aérea quanto das raízes das plantas e isso pode ser explicado pelo alto desvio padrão das medidas gerado pelo baixo número de repetições de cada tratamento (quatro vasos). A alternativa escolhida para contornar este problema foi repetir o experimento com as doses de luz mais promissoras ($0,8 J/cm^2$ e $1,6 J/cm^2$) e aumentar a quantidade de repetições de cada tratamento para oito vasos.

Através deste segundo experimento de cultivo, verificou-se que o tratamento das sementes com as doses de luz *laser* citadas anteriormente causou aumentos significativos nos valores aferidos para altura das plantas apenas nos 14 primeiros dias e que o crescimento das plantas controle igualou-se ao das plantas dos tratamentos com luz após 28 dias. Com relação ao teor de clorofila, apenas as folhas do nó vegetativo V_5 das plantas dos tratamentos com luz apresentaram maior teor de clorofila, enquanto não houve aumentos neste parâmetro para todos os outros nós.

Apesar de as plantas geradas pelo tratamento com a dose de luz $1,6 J/cm^2$ apresentarem aumentos significativos na massa fresca da parte aérea e da raiz e na massa seca da parte aérea, os efeitos mais notáveis de bioestimulação foram observados para as plantas do tratamento com a dose de luz $0,8 J/cm^2$, uma vez que estas apresentaram, em média, aumentos de 19,2% para a massa fresca da parte aérea, 19,6% para a massa fresca das raízes e 38,4% para a massa seca da parte aérea.

O próximo passo no desenvolvimento deste projeto é estudar os efeitos da bioestimulação de sementes com sementes de outras espécies de cultivo temporário como, por exemplo, milho, feijão, trigo, entre outras. Além disso, é interessante estudar a possibilidade de variação destes efeitos com cultivares diferentes de soja para compreender se o processo de otimização de doses de luz deve ser empregado em novas cultivares. Com relação aos efeitos da coerência do *laser*, novos ensaios devem ser realizados com foco na comparação das duas fontes de luz para entender o processo de bioestimulação em cada caso. Uma vez que o fator causador das diferenças observadas seja elucidado e os resultados sejam positivos, é provável que a adaptação dos equipamentos de irradiação para o tratamento de sementes em larga escala para posterior utilização em campo seja feita utilizando fontes de luz LED, uma vez que essas são economicamente mais acessíveis do que os *lasers*.

REFERÊNCIAS

- 1 DAVIS, K. F. *et al.* Meeting future food demand with current agricultural resources. *Global Environmental Change*, Elsevier, v. 39, p. 125–132, 2016.
- 2 BODIRSKY, B. L. *et al.* Global food demand scenarios for the 21st century. *Plos One*, Public Library of Science, v. 10, n. 11, p. e0139201, 2015.
- 3 SACALA, E. *et al.* Effect of laser-and hydropriming of seeds on some physiological parameters in sugar beet. *Journal of Elementology*, v. 21, n. 2, p. 527–538, 2016.
- 4 WU, J.; GAO, X.; ZHANG, S. Effect of laser pretreatment on germination and membrane lipid peroxidation of chinese pine seeds under drought stress. *Frontiers of Biology in China*, Springer, v. 2, n. 3, p. 314–317, 2007.
- 5 VASILEVSKI, G. Perspectives of the application of biophysical methods in sustainable agriculture. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, Citeseer, v. 29, n. 3, p. 179–186, 2003.
- 6 MOSNEAGA, A.; LOZOVANU, P.; NEDEFF, V. Investigation of biostimulation effects on germination and seedling growth of some crop plant species. *Cellulose Chemistry and Technology*, v. 52, n. 7–8, p. 551–558, 2018.
- 7 PODLEŚNY, J.; PODLEŚNA, A. Morphological changes and yield of selected species of leguminous plants under the influence of seed treatment with laser light. *International Agrophysics*, Bohdan Dobrzański Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, v. 18, n. 3, p. 253–260, 2004.
- 8 OUF, S.; ABDEL-HADY, N. Influence of he- ne laser irradiation of soybean seeds on seed mycoflora, growth, nodulation, and resistance to fusarium solani. *Folia Microbiologica*, Springer, v. 44, n. 4, p. 388–396, 1999.
- 9 HERNANDEZ, A. *et al.* Laser in agriculture. *International Agrophysics*, v. 24, n. 4, p. 407–422, 2010.
- 10 SOMMER, A. P.; FRANKE, R.-P. Plants grow better if seeds see green. *Naturwissenschaften*, Springer, v. 93, n. 7, p. 334, 2006.
- 11 HERNANDEZ, A. *et al.* Laser irradiation effects on maize seed field performance. *Seed Science and Technology*, International Seed Testing Association, v. 34, n. 1, p. 193–197, 2006.
- 12 LI, J. *et al.* Phytochrome signaling mechanisms. *The Arabidopsis book*, American Society of Plant Biologists, v. 9, e0148, 2011.
- 13 MICHTCHENKO, A.; HERNÁNDEZ, M. Photobiostimulation of germination and early growth of wheat seeds (triticum aestivum l) by a 980 nm semiconductor laser. *Revista Cubana de Física*, v. 27, n. 2B, p. 271–274, 2010.
- 14 LATORRACA, M. Q. *et al.* Effects of the soybean flour diet on insulin secretion and action. In: PREEDY, V.; WATSON, R.; PATEL, V. *Flour and breads and their fortification in health and disease prevention*. [s.l.]: Elsevier, 2019. p. 423–434.

- 15 BADOLE, S.; BODHANKAR, S. Glycine max (soybean) treatment for diabetes. In: WATSON, R.; PREEDY, V. *Bioactive food as dietary interventions for diabetes: bioactive foods in chronic disease states*. New York: Academic Press, 2012. p. 77.
- 16 KILEY-WORTHINGTON, M. Problems of modern agriculture. *Food Policy*, Elsevier, v. 5, n. 3, p. 208–215, 1980.
- 17 FAO. *World hunger is still not going down after three years and obesity is still growing*. Disponível em: <http://www.fao.org/news/story/en/item/1200484/icode/>. Acesso em: 06 abril 2020.
- 18 FAO. *Transforming food systems for affordable healthy diets*. Disponível em: <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/en/>. Acesso em: 06 abril 2020.
- 19 FAO. *The state of food security and nutrition in the world*. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca5162en/ca5162en.pdf#page=44>. Acesso em: 06 abril 2020.
- 20 FAO. *Associando-se para alcançar a segurança alimentar e nutricional e promover o desenvolvimento rural sustentável*. Disponível em: <http://www.fao.org/3/AX274PT/ax274pt.pdf>. Acesso em: 18 abril 2020.
- 21 FAO. *FAO no Brasil*. Disponível em: <http://www.fao.org/brasil/programas-e-projetos/pt/>. Acesso em: 18 abril 2020.
- 22 UNDP. *Human development report 2016*. Disponível em: http://hdr.undp.org/sites/default/files/2016_human_development_report.pdf. Acesso em: 18 abril 2020.
- 23 GEORGES, R. *A distância que nos une: um retrato das desigualdades brasileiras*. Disponível em: <https://www.oxfam.org.br/um-retrato-das-desigualdades-brasileiras/a-distancia-que-nos-une/>. Acesso em: 04 janeiro 2021.
- 24 IBGE. *Extrema pobreza atinge 13,5 milhões de pessoas e chega ao maior nível em 7 anos*. Disponível em: <https://cutt.ly/zjfzdO8>. Acesso em: 18 abril 2020.
- 25 SOUZA, P. M. d. *et al.* Diferenças regionais de tecnologia na agricultura familiar no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, SciELO Brasil, v. 57, n. 4, p. 594–617, 2019.
- 26 AGUIAR, A. F. *et al.* Sistema de registro do agrotóxico no Brasil. *Revista Alomorfia*, v. 3, n. 1, p. 49–60, 2019.
- 27 SANTOS, C. M. N. dos *et al.* Acre e rondônia: comparativo de casos de intoxicações por agrotóxicos, produção agrícola e perfil sociodemográfico. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 37, n. 1, 2020.
- 28 VASCONCELLOS, P. R. O. *et al.* Condições da exposição a agrotóxicos de portadores da doença de parkinson acompanhados no ambulatório de neurologia de um hospital universitário e a percepção da relação da exposição com o adoecimento. *Saúde em Debate*, SciELO Public Health, v. 43, p. 1084–1094, 2020.
- 29 CASSOL, K. *et al.* Efeitos dos agrotóxicos na saúde auditiva de trabalhadores rurais. *Distúrbios da Comunicação*, v. 32, n. 1, p. 152–164, 2020.
- 30 GARCIA, S. D.; LARA, T. I. d. C. de. O impacto do uso dos agrotóxicos na saúde pública: revisão de literatura. *Saúde e Desenvolvimento Humano*, v. 8, n. 1, p. 85, 2020.

- 31 PEREIRA, J. d. N. *et al.* *Assistência de enfermagem realizada a agricultores em uso de agrotóxico*. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2019.
- 32 CRUZ, M. C. S. da *et al.* As externalidades negativas a partir do uso de agrotóxicos/negative externalities from the use of agricultures. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 4, p. 13835–16844, 2020.
- 33 BALLESTE, V. M.; MANTELLI, J. Presença de resíduos de agrotóxicos nos alimentos: um enfoque no pimentão e pepino. *Geografia em Atos (Online)*, v. 2, n. 17, p. 44–63, 2020.
- 34 MILANI, M.; OLIVEIRA, D. S. de; MORALES, E. M. Resíduos de agrotóxicos em alimentos no Brasil. *Interciência & Sociedade*, v. 5, n. 1, 2020.
- 35 BURDON, F. J. *et al.* Agriculture versus wastewater pollution as drivers of macroinvertebrate community structure in streams. *Science of the Total Environment*, Elsevier, v. 659, p. 1256–1265, 2019.
- 36 EVANS, A. E. *et al.* Agricultural water pollution: key knowledge gaps and research needs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Elsevier, v. 36, p. 20–27, 2019.
- 37 GREEN, A. Agricultural waste and pollution. In: GREEN, A. *Waste: a handbook for management*. New York: Academic Press, 2019. p. 532–551.
- 38 KUMAR, V.; KUMAR, P.; SINGH, J. An introduction to contaminants in agriculture and environment. In: GREEN, A. *Contaminants in agriculture and environment: health risks and remediation*. New York: Agro Environ Media, 2019. v.1, p. 1–8.
- 39 SAMPAIO, E.; ARAÚJO, M. d. S. B.; SAMPAIO, Y. S. Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no nordeste do Brasil. *Revista de Geografia*, Recife, v. 22, n. 1, p. 90–112, 2005.
- 40 BRASIL. *Casa Civil. Lei n. 7.802 de 11 de julho de 1989*. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L7802.htm. Acesso em: 21 abril 2020.
- 41 INCA. *Agrotóxico: causas e prevenção*. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/agrotoxicos>. Acesso em: 21 abril 2020.
- 42 PLUTH, T. B.; ZANINI, L. A. G.; BATTISTI, I. D. E. Pesticide exposure and cancer: an integrative literature review. *Saúde em Debate*, SciELO Public Health, v. 43, p. 906–924, 2019.
- 43 CAMPOS, A. L. d. *Levantamento bibliográfico sobre a relação entre cânceres e contaminação por agrotóxico no Brasil*. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- 44 RIGOTTO, R. M. *et al.* Tendências de agravos crônicos à saúde associados a agrotóxicos em região de fruticultura no Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, SciELO Public Health, v. 16, p. 763–773, 2013.
- 45 SIQUEIRA, D. F. de *et al.* Análise da exposição de trabalhadores rurais a agrotóxicos. *Revista Brasileira em Promoção da Saúde*, Universidade de Fortaleza, v. 26, n. 2, p. 182–191, 2013.
- 46 PEREIRA, V. G. M. *et al.* A relação entre o uso de agrotóxicos e o aumento do índice de câncer no Brasil. *Revista Gestão em Foco*, n. 9, p. 164–170, 2017.

- 47 ANVISA. *Painel de monografias de agrotóxicos*. Disponível em: <https://cutt.ly/bhhI6sJ>. Acesso em: 21 abril 2020.
- 48 ANVISA. *Monografias autorizadas*. Disponível em: <http://antigo.anvisa.gov.br/registros-e-autorizacoes/agrotoxicos/produtos/monografia-de-agrotoxicos/autorizadas>. Acesso em: 21 abril 2020.
- 49 ANVISA. *Monografias excluídas*. Disponível em: <http://antigo.anvisa.gov.br/registros-e-autorizacoes/agrotoxicos/produtos/monografia-de-agrotoxicos/excluidas>. Acesso em: 21 abril 2020.
- 50 BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Quantidade de agrotóxico comercializado por classe de periculosidade ambiental*. Disponível em: https://www.mma.gov.br/images/informacoes_ambientais/p_info_ambientais/indicadores_ambientais_nacionais/DB_Ibama_QuantidadeAgrotoxico.pdf. Acesso em: 22 abril 2020.
- 51 BRASIL. DECRETO Nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002. *Regulamenta a lei Nº 7.802 de 11 de julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, experimentação, produção, embalagem, rotulagem, transporte, armazenamento, comercialização, propaganda comercial, utilização, importação, exportação do destino final dos resíduos e a fiscalização de agrotóxicos e seus componentes afins, e de outras providências*. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4074.htm#_blank. Acesso em: 22 abril 2020.
- 52 IBAMA. *Relatórios de comercialização de agrotóxicos*. Disponível em: <http://ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 22 abril 2020.
- 53 AGROLINK. *AgrolinkFito*. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/agrolinkfito/busca-simples-produto>. Acesso em: 22 abril 2020.
- 54 TOOGE, R. *Lista: quais são e para que servem os ingredientes dos agrotóxicos mais vendidos*. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2019/10/07/quais-sao-e-para-que-servem-os-principais-ingredientes-dos-agrotoxicos-mais-vendidos.ghtml>. Acesso em: 22 abril 2020.
- 55 YAMADA, T.; CASTRO, P. d. C. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. *Informações Agronômicas*, v. 119, p. 1–32, 2007.
- 56 AMARANTE, J. O. P. d. *et al.* Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 25, n. 4, p. 589–593, 2002.
- 57 LIMA, W. F. *et al.* Interação genótipo-ambiente de soja convencional e transgênica resistente a glifosato, no estado do Paraná. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, SciELO Brasil, v. 43, n. 6, p. 729–736, 2008.
- 58 BERVALD, C. M. P. *et al.* Desempenho fisiológico de sementes de soja de cultivares convencional e transgênica submetidas ao glifosato. *Revista Brasileira de Sementes*, SciELO Brasil, v. 32, n. 2, p. 09–18, 2010.
- 59 MONQUERO, P. A. Plantas transgênicas resistentes aos herbicidas: situação e perspectivas. *Bragantia*, SciELO Brasil, v. 64, n. 4, p. 517–531, 2005.
- 60 CARPENTER, J. E.; GIANESSI, L. P. Herbicide tolerant soybeans: why growers are adopting roundup ready varieties. *Journal of Agrobiotechnology Management Economics*, AgBioForum, v. 2, n. 2, p. 65–72, 1999.

- 61 PADGETTE, S. R. *et al.* New weed control opportunities: development of soybeans with a Roundup Ready™ gene. In: DUKE, S. O. *Herbicide resistant crops*. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.53–84.
- 62 MENDONÇA, F. G. Alimentos transgênicos x alimentos de qualidade: os desafios jurídicos para a garantia do direito humano à segurança alimentar. *Anais da Semana Acadêmica Fadisma Entrementes*, Fadisma, 2019.
- 63 BOSCO, M. G. D.; MACHADO, L. de O.; NODA, R. D. M. S. Rotulagem de alimentos transgênicos no Brasil: a polêmica da informação no âmbito do direito humano à alimentação adequada. *Revista CEJ*, v. 23, n. 78, p. 95–106, 2019.
- 64 ZATERKA, L. Transgênicos e o princípio de equivalência substancial. *Estudos Avançados*, SciELO Brasil, v. 33, n. 95, p. 271–284, 2019.
- 65 SILVA, L. de O. *et al.* Agrotóxicos: a importância do manejo adequado para a manutenção da saúde. *Nature and Conservation*, v. 12, n. 1, p. 10–20, 2019.
- 66 ARAÚJO, A. J. d. *et al.* Exposição múltipla a agrotóxicos e efeitos à saúde: estudo transversal em amostra de 102 trabalhadores rurais, Nova Friburgo, RJ. *Ciência & Saúde Coletiva*, SciELO Brasil, v. 12, n. 1, p. 115–130, 2007.
- 67 MENEGAT, R. P.; FONTANA, R. T. Condições de trabalho do trabalhador rural e sua interface com o risco de adoecimento. *Ciência, Cuidado e Saúde*, v. 9, n. 1, p. 52–59, 2010.
- 68 WURZ, D. A.; SANTOS, G. dos. Uso correto de equipamentos de proteção individual (epi) e destinação correta de embalagens vazias de agrotóxicos no planalto norte catarinense. *Caminho Aberto*, n. 12, p. 35–41, 2020.
- 69 ALMUSSA, A.; SCHMIDT, M. L. G. O contato com agrotóxicos e os possíveis agravos à saúde de trabalhadores rurais. *Revista de Psicologia da UNESP*, v. 8, n. 2, p. 5–5, 2009.
- 70 STOLLER. *Soluções biológicas*. Disponível em: <https://www.stoller.com.br/solucoes/biologicos/>. Acesso em: 23 abril 2020.
- 71 STK. *Sobre a STK*. Disponível em: <https://www.timorexgold.com.br/dev/sobre-a-stk/s>. Acesso em: 23 abril 2020.
- 72 OLIVEIRA, A. M. de *et al.* Controle biológico de pragas em cultivos comerciais como alternativa ao uso de agrotóxicos. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, Editora Verde, v. 1, n. 2, p. 1–9, 2006.
- 73 NUNES, M. U. C.; LEAL, M. L. S. Efeito da aplicação de biofertilizante e outros produtos químicos e biológicos, no controle da broca pequena do fruto e na produção do tomateiro tutorado em duas épocas de cultivo e dois sistemas de irrigação. *Horticultura Brasileira*, SciELO Brasil, v. 19, n. 1, p. 53–59, 2001.
- 74 STK. *Bula Timorex Gold*. Disponível em: https://www.timorexgold.com.br/dev/wp-content/uploads/2019/05/TimorexGold-Bula-1L-importer-Stockton_Minor-crops19-09-18.pdf. Acesso em: 23 abril 2020.
- 75 STK. *Timorex Gold: a broad-spectrum, botanical-based fungicide*. Disponível em: <https://stk-ag.com/product/timorex-gold/>. Acesso em: 23 abril 2020.

- 76 STOLLER. *Rizotec*. Disponível em: <https://www.stoller.com.br/solucoes/rizotec/>. Acesso em: 23 abril 2020.
- 77 GIANNAKIS, E. *et al.* Exploring the economy-wide effects of agriculture on air quality and health: evidence from europe. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 663, p. 889–900, 2019.
- 78 CAMPBELL-LENDRUM, D.; PRÜSS-USTÜN, A. Climate change, air pollution and non-communicable diseases. *Bulletin of the World Health Organization*, World Health Organization, v. 97, n. 2, p. 160, 2019.
- 79 POMPERMAIER, A. *et al.* *Resíduos de agrotóxicos prejudicam o comportamento anti predatório em peixes*. (Dissertação em Ciências Ambientais) - Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2019.
- 80 LIMA, M. L. S. d. *Ensaio de toxicidade aguda em embriões de Zebrafish (Danio rerio) para avaliação de risco associada à exposição ao agrotóxico prometrina*. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.
- 81 ARIAS, A. R. L. *et al.* Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. *Ciência & Saúde Coletiva*, SciELO Public Health, v. 12, p. 61–72, 2007.
- 82 MATYJASZCZYK, E. Problems of implementing compulsory integrated pest management. *Pest Management Science*, Wiley Online Library, v. 75, n. 8, p. 2063–2067, 2019.
- 83 EMBRAPA. *NASA confirma dados da Embrapa sobre área plantada no Brasil*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/30972114/nasa-confirma-dados-da-embrapa-sobre-area-plantada-no-brasil>. Acesso em: 25 abril 2020.
- 84 SOUZA, V. A. S. d. *et al.* Dinâmica do desmatamento na amazônia e seus impactos na hidrologia: bacia do rio machadinho-Rondônia/Brasil. *Ciência Florestal*, SciELO Brasil, v. 29, n. 3, p. 1004–1018, 2019.
- 85 INPE. *Alertas do DETER na Amazônia em junho somam 2.072,03 km²*. Disponível em: http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5147. Acesso em: 25 abril 2020.
- 86 FAO. *State of the world's forests 2016*. Italy: UN Food and Agriculture Organization Rome, 2016.
- 87 ANA. *Quase metade da água usada na agricultura é desperdiçada*. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias-antigas/quase-metade-da-a-gua-usada-na-agricultura-a-c.2019-03-15.2354987174>. Acesso em: 25 abril 2020.
- 88 IMESON, A. Introdução geral à degradação da terra e à desertificação. *In: Project LUCINDA: land care in desertification affected areas, from science towards application*. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/cplpuncdd/DEFI_Curso/DEFI_-_Apresentacao_LUCINDA.pdf. Acesso em: 08 janeiro 2021.
- 89 ATLAS IRRIGAÇÃO. *Uso da água na agricultura irrigada*. Disponível em: <http://atlasirrigacao.ana.gov.br/>. Acesso em: 25 abril 2020.

- 90 EMBRAPA. *O desafio do uso da água na agricultura brasileira*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agua-na-agricultura/sobre-o-tema>. Acesso em: 25 abril 2020.
- 91 EMBRAPA. *Soluções tecnológicas*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agua-na-agricultura/solucoes-tecnologicas>. Acesso em: 25 abril 2020.
- 92 COELHO, E. *et al.* Sistemas de irrigação de baixo custo para agricultura familiar de assentamentos ribeirinhos do Semiárido. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. da S.; MEDEIROS, S. de S.; GALVÃO, C. de O. (Ed.). *Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações*. Campina Grande: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2012. p. 99–116.
- 93 EMBRAPA. *Produção de frutas e hortaliças com o uso de água de chuva armazenada em cisterna*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/954668/producao-de-frutas-e-hortalicas-com-o-uso-de-agua-de-chuva-armazenada-em-cisterna>. Acesso em: 25 abril 2020.
- 94 EMBRAPA. *Barragem subterrânea*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2129/barragem-subterranea>. Acesso em: 25 abril 2020.
- 95 COELHO, E. F.; SILVA, A. J. D.; MIRANDA, J. H. D. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. *Engenharia Agrícola*, SciELO Brasil, v. 30, n. 4, p. 608–618, 2010.
- 96 EMBRAPA. *Simulador de chuva para sensibilizar quanto ao potencial erosivo*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/3925/simulador-de-chuva-para-sensibilizar-quanto-ao-potencial-erosivo>. Acesso em: 25 abril 2020.
- 97 EMBRAPA. *Trajatória da agricultura brasileira*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 05 maio 2020.
- 98 IPEA. *Revisão da previsão de crescimento do PIB agropecuário brasileiro em 2020 - atualização de abril*. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/index.php/2020/04/29/boletim-agro-2/>. Acesso em: 05 maio 2020.
- 99 CEPEA. *PIB do agronegócio brasileiro*. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 05 maio 2020.
- 100 PAM. *Produção Agrícola Municipal: principais resultados*. Disponível em: <https://cutt.ly/VjfxSAv>. Acesso em: 05 maio 2020.
- 101 CEPEA. *PIB do agronegócio cresce 3,81 % em 2019*. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_PIB_CNA_2019.pdf. Acesso em: 05 maio 2020.
- 102 MONTEIRO, J. E. *et al.* *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. MAPA/INMET, v. 1, 2009.
- 103 EMBRAPA. *Solos do Brasil*. Disponível em: <https://cutt.ly/zjfxLcl>. Acesso em: 07 maio 2020.
- 104 SANTOS, H. G. dos *et al.* *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa, 2018.

- 105 BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Fichas agroecológicas*. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/fichas-agroecologicas/fertilidade-do-solo>. Acesso em: 28 novembro 2020.
- 106 SHARMA, S. *et al.* Physical characteristics and nutritional composition of some new soybean (*glycine max* (L.) merrill) genotypes. *Journal of Food Science and Technology*, Springer, v. 51, n. 3, p. 551–557, 2014.
- 107 BISCHOFF, T. Z. *et al.* Technological quality of soybean oil obtained from stored grain under controlled environmental conditions. *Engenharia Agrícola*, SciELO Brasil, v. 36, n. 6, p. 1145–1156, 2016.
- 108 RITCHIE, S. *Como a planta de soja se desenvolve*. [s.l.]: POTAFOS, 1998.
- 109 FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. *Embrapa Soja-Circular Técnica (INFOTECA-E)*, Embrapa Soja, Londrina, n. 48, 2007.
- 110 IPEA. *Revisão da previsão de crescimento do PIB agropecuário brasileiro em 2020 - atualização de abril*. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/conjuntura/200428_boletim_agro.pdf. Acesso em: 05 maio 2020.
- 111 USDA. *World agricultural production*. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em: 09 maio 2020.
- 112 NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: ótica, relatividade, física quântica*. [s.l.]: Editora Blucher, 2014. v. 4.
- 113 GONZÁLEZ, F. H. D. *Fotossíntese*. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/lacvet/restrito/pdf/fotossintese.pdf>. Acesso em: 13 maio 2020.
- 114 GAWAS, U.; MANDREKAR, V.; MAJIK, M. Structural analysis of proteins using X-ray diffraction technique. In: MEENA S.N.; NAIK M.M. *Advances in biological science research: a practical approach*. [s.l.]: Academic Press, 2019. cap. 5, p. 69–84.
- 115 SUN, T.-P. *et al.* Novel measurement system for linear array type UVC germicidal system. In: IEEE EURASIA CONFERENCE ON BIOMEDICAL ENGINEERING, HEALTHCARE AND SUSTAINABILITY (ECBIOS). *Proceedings* [...]. Okinawa: IEEE, 2019. p.57–60.
- 116 PLOTINO, G.; GRANDE, N.; MERCADE, M. Photodynamic therapy in endodontics. *International Endodontic Journal*, Wiley Online Library, v. 52, n. 6, p. 760–774, 2019.
- 117 CAMPOSTRINI, E. *Fluorescência da clorofila a: considerações teóricas e aplicações práticas*. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2001.
- 118 BRIGGS, W. R.; CHRISTIE, J. M. Phototropins 1 and 2: versatile plant blue-light receptors. *Trends in Plant Science*, Elsevier, v. 7, n. 5, p. 204–210, 2002.
- 119 CASHMORE, A. R. *et al.* Cryptochromes: blue light receptors for plants and animals. American Association for the Advancement of Science. *Science*, v. 284, n. 5415, p. 760–765, 1999.
- 120 JAEDICKE, K. *et al.* A phytochrome–phototropin light signaling complex at the plasma membrane. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Academy of Sciences, v. 109, n. 30, p. 12231–12236, 2012.

- 121 WANG, H.; DENG, X. W. Dissecting the phytochrome a-dependent signaling network in higher plants. *Trends in Plant Science*, Elsevier, v. 8, n. 4, p. 172–178, 2003.
- 122 JIAO, Y.; LAU, O. S.; DENG, X. W. Light-regulated transcriptional networks in higher plants. *Nature Reviews Genetics*, Nature Publishing Group, v. 8, n. 3, p. 217, 2007.
- 123 DENG, X. W.; QUAIL, P. H. Signalling in light-controlled development. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, Elsevier, v. 20, n. 2, p. 121–129, 1999.
- 124 PRATES, R. A. *et al.* Light parameters influence cell viability in antifungal photodynamic therapy in a fluence and rate fluence-dependent manner. *Laser Physics*, Springer, v. 19, n. 5, p. 1038–1044, 2009.
- 125 WILDE, W.; PARR, W.; MCPEAK, D. Seeds bask in laser light. *Laser Focus*, v. 5, n. 23, p. 41–42, 1969.
- 126 ALSALHI, M. *et al.* Effects of he–ne laser and argon laser irradiation on growth, germination, and physico-biochemical characteristics of wheat seeds (*triticumaestivum* l.). *Laser Physics*, IOP Publishing, v. 29, n. 1, p. 015602, 2018.
- 127 OSMAN, Y. A. *et al.* Effect of laser radiation treatments on growth, yield and chemical constituents of fennel and coriander plants. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 5, p. 244–252, 2009.
- 128 ASGHAR, T. *et al.* Laser light and magnetic field stimulation effect on biochemical, enzymes activities and chlorophyll contents in soybean seeds and seedlings during early growth stages. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: biology*, Elsevier, v. 165, p. 283–290, 2016.
- 129 MELONI, D. A. *et al.* Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 69–76, 2003.
- 130 KLIMEK-KOPYRA, A. *et al.* Impact of coherent laser irradiation on germination and mycoflora of soybean seeds—innovative and prospective seed quality management. *Agriculture*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 8, p. 314, 2020.
- 131 DZIWULSKA-HUNEK, A.; SZYMANEK, M.; STADNIK, J. Impact of pre-sowing red light treatment of sweet corn seeds on the quality and quantity of yield. *Agriculture*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 5, p. 165, 2020.
- 132 DINANI, H. J. *et al.* Effects of laser radiation on the growth indicators of kelussia odoratis-sima mozaff medical plant. In: *IEEE Photonics Technology Letters*. Canada: IEEE, 2019. DOI 10.1109/PN2019.8819599.
- 133 DHAKAL, R. *et al.* Soybean (*glycine max* l. merr.) sprouts germinated under red light irradiation induce disease resistance against bacterial rotting disease. *Plos One*, Public Library of Science, v. 10, n. 2, 2015.
- 134 ISLAM, S.; BABADOOST, M.; HONDA, Y. Effect of red light treatment of seedlings of pepper, pumpkin, and tomato on the occurrence of phytophthora damping-off. *HortScience*, American Society for Horticultural Science, v. 37, n. 4, p. 678–681, 2002.
- 135 COLDREN, L. A.; CORZINE, S. W.; MASHANOVITCH, M. L. *Diode lasers and photonic integrated circuits*. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2012. v. 218.

- 136 RASPBERRY PI FOUNDATION. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org>. Acesso em: 31 março 2020.
- 137 RASPBERRY PI FOUNDATION. *Raspberry Pi 3 model B*. Disponível em: <http://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. Acesso em: 31 março 2020.
- 138 NODE-RED ORG. *Low-code programming for event-driven applications*. Disponível em: <https://nodered.org/>. Acesso em: 31 março 2020.
- 139 RASPBERRY PI FOUNDATION. *Camera module*. Disponível em: <http://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/>. Acesso em: 31 março 2020.
- 140 BOSCH SENSORTECH. *BME280 Combined humidity and pressure sensor*. Disponível em: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BME280-DS002.pdf. Acesso em: 01 abril 2020.
- 141 THINGSPEAK TM. *ThingSpeak for IoT analytics*. Disponível em: <https://thingspeak.com/>. Acesso em: 01 abril 2020.
- 142 THINGSPEAK TM. *Estufa LIO²A*. Disponível em: <https://thingspeak.com/channels/871971>. Acesso em: 14 abril 2020.
- 143 BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regra para análise de sementes*. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/arquivos-publicacoes-insumos-agricolas/2946_regras_analise_sementes.pdf/view. Acesso em: 23 março 2020.
- 144 CARVALHO, D. B. d.; CARVALHO, R. I. N. d. Qualidade fisiológica de sementes de guaxuma sob influência do envelhecimento acelerado e da luz. *Acta Scientiarum. Agronomy*, SciELO Brasil, v. 31, n. 3, p. 489–494, 2009.
- 145 KONICA Minolta Sensing Americas. *Chlorophyll meter SPAD-502 Plus*. Disponível em: https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/spad-502plus_instruction_eng.pdf. Acesso em: 28 março 2020.
- 146 KONICA Minolta Sensing Americas. *SPAD-502 plus medidor de clorofila*. Disponível em: <http://sensing.konicaminolta.com.br/products/medidor-de-clorofila-spad-502plus/>. Acesso em: 28 março 2020.
- 147 OPER. *Como interpretar uma análise de variância (ANOVA)?* Disponível em: <https://cutt.ly/jzTYw1B>. Acesso em: 11 março 2021.
- 148 OPER. *Teste de Tukey para comparações múltiplas*. Disponível em: <https://cutt.ly/ozTMUGq>. Acesso em: 11 março 2021.
- 149 KUZNETSOVA, G. *et al.* Pulsed irradiation of the seeds of *Solanum laciniatum* before sowing. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, Springer, v. 10, n. 10, p. 1331–1334, 1976.
- 150 SACALA, E. *et al.* Impact of presowing laser irradiation of seeds on sugar beet properties. *International Agrophysics*, v. 26, n. 3, p. 295–300, 2012.