

FELIPE LUIZ DE LEMOS NOBRE

**PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS ATRAVÉS DE
IMAGEAMENTO COM DRONES**

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
JULHO – 2025

FELIPE LUIZ DE LEMOS NOBRE

**PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS ATRAVÉS DE
IMAGEAMENTO COM DRONES**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutor.

Orientador:

Dr. Reginaldo Ferreira Santos

Co-orientador:

Dr. Juan López Herrera

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
JULHO – 2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

DE LEMOS NOBRE, FELIPE LUIZ
PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS ATRAVÉS DE
IMAGEAMENTO COM DRONES / FELIPE LUIZ DE LEMOS NOBRE;
orientador REGINALDO FERREIRA SANTOS; coorientador JUAN LÓPEZ
HERRERA. -- Marechal Cândido Rondon, 2025.
89 p.

Tese (Doutorado Campus de Marechal Cândido Rondon) --
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2025.

1. Plantas daninhas. 2. glifosato. 3. bioestimulantes. 4.
sensoriamento remoto. I. FERREIRA SANTOS, REGINALDO, orient.
II. LÓPEZ HERRERA, JUAN, coorient. III. Título.

FELIPE LUIZ DE LEMOS NOBRE

Pulverização localizada de herbicidas através de imageamento com drones

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura APROVADO pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br REGINALDO FERREIRA SANTOS
Data: 30/07/2025 16:16:15 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Orientador - Reginaldo Ferreira Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Maritane Prior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Juan López de
Herrera

Firmado digitalmente por Juan López de Herrera
Nombre de reconocimiento (DN): cn=Juan López
de Herrera, o=Universidad Politécnica de Madrid,
ou=ETSIAAIB, email=juan.lz.herrera@upm.es, c=ES
Fecha: 2025.07.29 09:59:11 +02'00'

Juan López de Herrera
Universidad Politécnica de Madrid – Espanha (UPM)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA PAULA MORAIS MOURAO SIMONETTI
Data: 30/07/2025 13:23:44 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Ana Paula Morais Mourão Simonetti
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

Documento assinado digitalmente
gov.br WESLEY ESDRAR SANTIAGO
Data: 29/07/2025 09:37:04 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Wesley Esdras Santiago
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – (UFVJM)

Cascavel, 28 de julho de 2025

Este trabalho é fruto de um esforço coletivo, escrito a muitas mãos generosas, que colaboraram de forma direta e indireta para a sua concretização.

Quero manifestar minha mais sincera e calorosa gratidão, em especial, aos meus orientadores, Professores Reginaldo e Juan. Vocês foram fundamentais não apenas na condução técnica e científica deste estudo, mas também no meu amadurecimento intelectual, profissional e humano. Carregarei para sempre o aprendizado que me proporcionaram.

Estendo meu agradecimento aos estagiários, colegas, professores e pesquisadores que compuseram essa grande equipe de trabalho ao longo dos últimos quatro anos.

Sou profundamente grato aos meus sócios e parceiros profissionais, pois sei que, sem o apoio recebido no ambiente de trabalho, todo este processo teria sido infinitamente mais árduo.

Dirijo uma homenagem especial aos meus pais, que jamais mediram esforços para me proporcionar uma sólida formação, tanto acadêmica quanto de caráter.

À minha amada esposa Leandra e à minha filha Joana, vocês são a razão de cada passo dado. Obrigado por estarem ao meu lado, enfrentando todas as adversidades e celebrando cada conquista, com amor que transcende as palavras.

Encerro esta mensagem em gratidão a Deus, pelas suas bênçãos constantes. Reconheço que nada somos se não caminarmos pela estrada da fé e do amor ao próximo.

AGRADECIMENTOS

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fluxo da seleção de artigos.	25
Figura 2. Número de publicações segundo país de origem.	27
Figura 3. Quantidade de obras segundo ano de publicação.	28
Figura 4. Localização geográfica do NEEA.....	46
Figura 5. Espaçamento entre as parcelas	47
Figura 6. Marcação área de interesse via DH para levantamento de plantas daninhas	48
Figura 7. Ortomosaico da imagem de campo de produção para levantamento de plantas daninhas (A e B) e Mapa de aplicação de herbicida localizado (C).	49
Figura 8. Croqui da área experimental da Fazenda Experimental da UNIOESTE Cascavel para avaliação da combinação entre bioestimulante e herbicida a base de glifosato pulverizado por drone para controle de plantas daninhas.....	66
Figura 9. Marcação área de interesse via DH para levantamento de plantas daninhas	80
Figura 10. Planejamento da missão via DH para levantamento de plantas daninhas	81
Figura 11. Parâmetros de voo para levantamento de plantas daninhas	81
Figura 12. Ortomosaico da imagem de campo de produção Moinho para levantamento de plantas daninhas.	83
Figura 13. Geolocalização de espécie de <i>Conyza bonariensis</i>	84
Figura 14. <i>Buffer</i> de localização de plantas daninhas	84
Figura 15. União dos polígonos com <i>buffer</i> de identificação das plantas daninhas ..	85
Figura 16. Uso da ferramenta <i>Dissolve</i> para reunir os polígonos com o mesmo atributo	85
Figura 17. Atributos, formatos, comprimento e área em m ²	86
Figura 18. Mapa de aplicação de herbicida gerado no processo	86
Figura 19. Monitor de pulverizador modelo Topper 5500, Stara, com dados de aplicação localizada de herbicida.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Etapas associadas ao planejamento da coleta de dados para este estudo	22
Tabela 2. Descrição da estratégia PICO com definição de descritores em inglês e português	23
Tabela 3. Descrição dos trabalhos selecionados de forma controlada nas bases de dados, que abordam o impacto da pulverização localizada de herbicidas (PLH) por drone	25
Tabela 4. Descrição de trabalhos selecionados de diferentes fontes, que abordam o impacto da pulverização localizada de herbicidas (PLH) por drone	26
Tabela 5. Descrição dos tratamentos, volume de calda e métodos de aplicação dos pulverizadores para o controle de plantas daninhas	47
Tabela 6. Índices de vegetação calculados a partir de imagens multiespectrais	51
Tabela 7. Massa de 1000 grãos (g), população de plantas (m ²), e produtividade dos grãos em função dos tratamentos avaliados	52
Tabela 8. Análise dos índices de Vegetação em relação ao tipo de pulverização localizada.....	53
Tabela 9. Descrição dos tratamentos, dose e volume de calda.	66
Tabela 10. Análise descritiva da produtividade dos grãos de soja (Kg/ha) (média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo dos tratamentos de todos os blocos.....	68
Tabela 11. Resultado do teste de Dunnet do controle (T0) contra os tratamentos (T1 a T8).....	69
Tabela 12. Resultados da massa de 1000 grãos (g), área de coleta de 10 plantas (m ²), e produtividade dos grãos em função dos 8 tratamentos e da testemunha.	71

RESUMO

NOBRE, Felipe Luiz de Lemos, Doutorado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Julho – 2025. **Pulverização localizada de herbicidas através de imageamento com drones**. Orientador: Reginaldo Ferreira Santos. Coorientador: Juan López Herrera.

A presente tese reúne três estudos complementares que abordam o uso de drones agrícolas na pulverização localizada, avaliando seu impacto sobre a eficiência de aplicação, economia de insumos e efeitos sobre a cultura da soja. O avanço das tecnologias digitais na agricultura tem possibilitado maior precisão e sustentabilidade nas práticas de manejo, especialmente no uso de herbicidas e bioestimulantes. O primeiro artigo analisou a aplicação localizada de herbicidas via drones, comparando-a com a pulverização convencional. Os resultados mostraram que o uso de drones reduziu significativamente o volume de herbicida aplicado, sem comprometer a eficácia no controle de plantas daninhas, além de diminuir perdas por deriva e o desperdício do produto. O segundo artigo avaliou a eficiência da pulverização por drones na cultura da soja. Observou-se que a tecnologia proporcionou boa cobertura foliar, com deposição adequada do produto e sem diferenças significativas na produtividade final em relação ao método convencional, reforçando o potencial do drone como ferramenta complementar de manejo agrícola. O terceiro artigo investigou a aplicação localizada de bioestimulante associado ao glifosato. Os resultados indicaram que a tecnologia favoreceu melhor aproveitamento do bioestimulante, com incremento no desenvolvimento inicial das plantas de soja, além de possibilitar a redução de perdas de insumos. Assim, o presente trabalho demonstra que a pulverização localizada por drones pode contribuir para uma agricultura eficiente e sustentável, ao reduzir o uso de defensivos, otimizar a deposição de produtos e manter o desempenho produtivo da cultura da soja.

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

PALAVRAS-CHAVE: Plantas daninhas; glifosato; agricultura de precisão; bioestimulantes; sensoriamento remoto, agricultura 4.0.

ABSTRACT

NOBRE, Felipe Luiz de Lemos, Doutorado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, July – 2025. **Localized spraying of herbicides through imaging with drones**. Advisor: Reginaldo Ferreira Santos. Co-advisor: Juan López Herrera.

This thesis brings together three complementary studies that address the use of agricultural drones in localized spraying, evaluating their impact on application efficiency, input savings, and effects on soybean crops. The advancement of digital technologies in agriculture has enabled greater precision and sustainability in management practices, especially in the use of herbicides and biostimulants. The first article analyzed localized herbicide spraying with drones, comparing it to conventional spraying. The results showed that the use of drones significantly reduced the volume of herbicide applied without compromising weed control efficacy, while also decreasing drift losses and product waste. The second article evaluated the efficiency of drone spraying in soybean crops. The technology provided good foliar coverage, with adequate product deposition and no significant differences in final yield compared to conventional methods, reinforcing the potential of drones as a complementary management tool. The third article investigated the localized application of a biostimulant combined with glyphosate. The results indicated that the technology enhanced the utilization of the biostimulant, promoting improvements in the initial development of soybean plants, in addition to reducing input losses. Thus, this work demonstrates that localized spraying with drones can contribute to efficient and sustainable agriculture by reducing the use of pesticides, optimizing product deposition, and maintaining the productive performance of soybean crops.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

KEYWORDS: Weeds; glyphosate; precision agriculture; biostimulants; remote sensing, agriculture 4.0.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
3 ARTIGO 1: UTILIZAÇÃO DE DRONES NA PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS: REVISÃO SISTEMÁTICA	20
3.1 INTRODUÇÃO	20
3.2 MÉTODOS	22
3.2.1 Método controlado	23
3.2.2 Método descontrolado	24
3.2.3 Seleção e análise dos artigos	24
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3.3.1 Características gerais dos estudos	27
3.3.2 Evolução do sensoriamento remoto na agricultura	28
3.3.3 Impacto econômico.....	31
3.3.4 Impacto ambiental	34
3.3.5 Tecnologia de imageamento de drones	35
3.3.6 Perspectiva futura	37
3.4 CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
4 ARTIGO 2: EFICIÊNCIA DO USO DE DRONES NA PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS PARA CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS NA CULTURA DE SOJA	43
4.1 INTRODUÇÃO	43
4.2 METODOLOGIA.....	45
4.2.1 Caracterização da área	45
4.2.2 Delineamento experimental	46
4.2.3 Monitoramento das plantas daninhas e coleta de imagens	47
4.2.4 Aplicação aérea	49
4.2.5 Aplicação terrestre	49
4.2.6 Variáveis analisadas.....	50
4.2.7 Análises estatísticas	51
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51

4.4 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5 ARTIGO 3: EFEITO DA COMBINAÇÃO DE BIOESTIMULANTE COM HERBICIDA NO CONTROLE LOCALIZADO DE PLANTAS DANINHAS PULVERIZADAS COM DRONES	60
5.1 INTRODUÇÃO	60
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	65
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.4 CONCLUSÃO.....	72
6 CONCLUSÕES	77
7 ANEXOS	79
ANEXO I - METODOLOGIA DE PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS – PLH-AVANT	79
Execução do voo.....	82
Pontos de controle	82
Processamento das imagens	83
Geolocalização das plantas daninhas	83
Mapa de aplicação localizada.....	84
Uso do mapa de aplicação no aparelho pulverizador	87

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial das Nações Unidas, a população mundial atingiu o marco de 8 bilhões de pessoas. Além disso, projeções mostram que existe uma tendência de que até 2050, estaremos próximos dos 10 bilhões de habitantes (ONU, 2024). As consequências do crescente aumento populacional mundial recaem sobre o concomitante aumento significativo na demanda alimentar global. A fim de assegurar a segurança alimentar, é necessário um aumento de produtividade agrícola utilizando o mínimo de recursos, como insumos e defensivos agrícolas, e sem expandir as fronteiras agrícolas (Bhandari; Sessa, 2020; Villafuerte *et al.*, 2018). Ou seja, deve-se prezar por uma produção sustentável com aproveitamento eficiente e inteligente dos recursos disponíveis e extraindo o máximo potencial da área (Bhandari; Sessa, 2020).

É através da agricultura 4.0, também conhecida como *smart farming*, que este desafio está sendo enfrentado e soluções inteligentes sendo implementadas através da aplicação de tecnologias como *Big Data Analytics*, armazenamento em nuvem, *Internet of Things (IoT)*, *Machine Learning*, sensores sem fio e drones (Ferreira *et al.*, 2021). Todas estas tecnologias, aliadas a boas práticas de gestão, já mostram resultados positivos através da melhoria da saúde financeira e aumento de produtividade em propriedades rurais brasileiras (Zaparolli, 2020). Nesse sentido, é de extrema importância identificar onde estas tecnologias podem ser aplicadas no manejo utilizado pelo produtor, como é o caso do monitoramento de plantas daninhas em lavouras.

As áreas de cultivo são ecossistemas abertos, ou seja, sofrem influência de fatores externos. Portanto, é comum que o produtor tenha que lidar com plantas indesejadas em sua área de produção. Estas plantas invasoras afetam a produtividade da cultura instalada, competindo por água, luz e nutrientes, demandando um manejo diferenciado para o seu controle (Barbosa *et al.*, 2008). É cada vez mais difícil se conseguir um controle efetivo das plantas daninhas presentes em áreas de cultivo. É comum que se tenha o desenvolvimento de variantes com germoplasma resistente aos herbicidas mais comuns, demandando um manejo mais específico e muitas vezes com um valor mais elevado, principalmente com o custo crescente destes defensivos (Rosa, 2021).

A forma mais comum de manejo para controle de plantas daninhas é a aplicação do herbicida em dose única em toda área do cultivo, seja por pulverizadores

tracionados por tratores, autopropelidos ou até mesmo com drones de pulverização. Entretanto, a aplicação em área total geralmente não é a forma mais eficiente de combate já que a dose aplicada pode ser muito baixa para realmente eliminar a planta invasora. Além disso, os alvos de interesse não estão presentes por toda a extensão do cultivo e pulverizar e percorrer áreas em que não se tem presença de plantas daninhas gera desperdício de herbicida e de combustível o que, além de antieconômico, pode contaminar o solo e a água próximos a área de aplicação através da deriva.

A deriva é causa do desperdício de defensivos agrícolas na lavoura. Para reduzir os efeitos deste problema, tem-se uma janela de aplicação ideal, com condições de temperatura, umidade e vento que não provoquem este efeito, entretanto, nem sempre se consegue realizar toda a aplicação neste espaço de tempo, devido à grande extensão das áreas de cultivo. Além disso, em épocas chuvosas, às vezes, por vários dias, não se tem piso agrícola para a entrada do maquinário na lavoura, prejudicando o controle das plantas invasoras e, conseqüentemente, o desenvolvimento da cultura instalada. Portanto, é de extrema importância o uso de tecnologias disponíveis que consigam reduzir o tempo de aplicação e o trânsito de máquinas na lavoura, buscando um manejo mais eficiente e econômico para o produtor e para o meio-ambiente.

Diante desse contexto, o uso de tecnologias voltadas à agricultura de precisão tem ganhado destaque como alternativa viável e sustentável para enfrentar os desafios contemporâneos da produção agrícola. A pulverização localizada de herbicidas (PLH), viabilizada pelo uso de drones equipados com sensores ópticos e plataformas SIG, permite intervenções específicas no controle de plantas daninhas, minimizando o uso excessivo de insumos e reduzindo os impactos ambientais (Nobre et al., 2021; Andrade et al., 2019). Além disso, o avanço no uso dessas ferramentas tecnológicas representa uma transformação na forma como se toma decisões no campo, com base em dados georreferenciados e em tempo real (Reips; Gubert, 2019).

Outro ponto que merece destaque é o papel dos bioestimulantes vegetais, que têm sido amplamente estudados como insumos capazes de melhorar o metabolismo e a resistência das plantas a estresses, inclusive quando combinados a herbicidas como o glifosato, amplamente utilizado no controle químico de daninhas (Rosa, 2021). As interações entre essas substâncias podem ser sinérgicas ou antagônicas, afetando diretamente a eficiência do manejo e a resposta fisiológica das espécies invasoras (Nobre et al., 2021). A compreensão dessas interações é

fundamental para o desenvolvimento de práticas agronômicas mais sustentáveis e personalizadas.

Nesse sentido, foram elaboradas as seguintes hipóteses que norteiam essa pesquisa: i) O uso de PLH pode ser eficiente e preciso no controle de plantas daninhas; ii) Sistemas de PLH são mais precisos no controle de plantas daninhas em comparação ao método tradicional de área total; iii) Sistemas de PLH reduzem o uso de insumos agrícolas em cultivo de soja; iv) O controle de plantas daninhas por PLH em cultivos de soja é catalisado com a sinergia entre bioestimulantes e herbicidas.

Durante esta pesquisa, foram desenvolvidos 3 artigos. No primeiro artigo, (Tópico 3) apresentamos uma revisão integrativa da literatura em que mostramos as evidências, a partir da literatura, da eficiência do uso de PLH no controle de plantas daninhas (hipótese i). No segundo artigo (Tópico 4), testamos a precisão e eficiência do uso de drones no controle de plantas daninhas através da PLH (hipóteses ii e iii). Por fim, no terceiro artigo (Tópico 5) avaliamos os efeitos da combinação entre bioestimulantes e herbicidas com base em glifosato no controle de plantas daninhas usando drones (hipótese iv).

1.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar a otimização do manejo agrícola pela precisão no controle de plantas daninhas e redução do consumo de insumos através da pulverização localizada utilizando-se drones e uso de bioestimulantes.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar o estado-da-arte sobre a efetividade do uso de drones para otimização do manejo agrícola;
- Comparar a otimização do manejo agrícola utilizando-se drone versus pulverizador manual;
- Avaliar a redução do consumo de insumos através do uso de drones;
- Definir as condições que determinam os efeitos sinérgicos e antagônicos entre bioestimulantes e herbicidas no controle de plantas daninhas usando drones.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento tecnológico dos últimos anos permite hoje que se faça a aplicação localizada do herbicida, de forma precisa e eficaz no controle das plantas invasoras sem desperdício de insumos. O uso de *drones*, para imageamento e monitoramento das propriedades rurais, substituindo os satélites, é um excelente exemplo do uso de tecnologias para o manejo mais inteligente, tendo em vista que as avaliações do campo se tornam mais próximas e precisas (Andrade *et al.*, 2019).

Em 2021, foram cadastrados 419.830 *drones* para uso profissional, de um total de 1.016.587 cadastros no Brasil. No estado do Paraná, 4º com mais cadastros no país, esse número foi de 66.815 aeronaves (ANAC, 2022). Vê-se que é um nicho de mercado em crescente desenvolvimento, com muito potencial para otimizar as atividades agrícolas e o consumo de insumos e ainda reduzir drasticamente o consumo de combustíveis fósseis, por funcionarem à bateria. Sendo assim é de extrema importância a condução de pesquisas utilizando estas tecnologias.

Os *drones* são equipados com sensores ópticos, que podem atuar em diferentes faixas do espectro eletromagnético, destacando-se, para fins agrícolas, o espectro visível (RGB), infravermelho próximo (NIR) e borda do infravermelho (Red Edge) (Nobre *et al.*, 2021). As imagens capturadas pelos sensores são processadas e dão origem a outros produtos por meio de plataformas SIG (Sistemas de Informações Geográficas). Com estes produtos em mãos, a tomada de decisão fica mais precisa e eficaz, considerando-se características distintas como distribuição espacial, altitude, heterogeneidade do solo, grau de infestação de plantas daninhas e outras pragas, variações de produtividade, dentre outras (Reips; Gubert, 2019).

Em se tratando de plantas daninhas, é de extrema importância que estas diferenças sejam identificadas para que diferentes estratégias de manejo possam ser utilizadas em seu controle. Dessa forma, elimina-se assim aplicações em locais desnecessários tornando-se mais eficaz o combate às invasoras, o que gera uma economia tanto de material como de combustível (drone movido à energia elétrica), sem contar os danos ambientais evitados (Montanhani, 2023). Assim, os drones tem grande potencial de atuarem com pulverizadores localizados de herbicidas (PLH).

Um dos principais herbicidas não seletivos utilizados na agricultura para controlar uma ampla gama de plantas daninhas é o glifosato. Este herbicida é conhecido por sua ação de inibir a enzima EPSPS (5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase) envolvida na síntese de aminoácidos aromáticos. Ao inibir a EPSPS, o

glifosato interrompe a síntese de proteínas e outros compostos necessários para o crescimento e a sobrevivência das plantas daninhas (Embrapa, 2021).

Em contrapartida, os bioestimulantes são compostos que, quando aplicados às plantas, têm a capacidade de modular seu crescimento, metabolismo e resposta fisiológica a estresses bióticos e abióticos. Eles podem influenciar a absorção e a translocação de nutrientes, estimular a atividade de enzimas envolvidas no metabolismo vegetal e aumentar a resistência das plantas a estresses ambientais. A interação entre bioestimulantes e o glifosato pode proporcionar resultados divergentes, podendo potencializar a ação herbicida ou atenuar seus efeitos, dependendo da composição e concentração dos bioestimulantes utilizados. A combinação de bioestimulantes com herbicidas, como o glifosato, tem sido objeto de estudos recentes visando entender seus efeitos sinérgicos ou antagônicos na mortalidade de plantas daninhas (Sousa *et al.*, 2023).

O efeito sinérgico entre o uso de bioestimulantes e glifosato no controle de plantas daninhas refere-se a uma interação positiva entre essas substâncias, resultando em uma maior eficácia na redução da população de plantas daninhas. Esse efeito sinérgico pode ocorrer devido ao aumento da absorção e translocação do glifosato nas plantas daninhas pelo bioestimulante, pela potencialização do efeito inibitório do glifosato sobre a EPSPS afetando negativamente o metabolismo das plantas daninhas e resultando em um maior controle dessas espécies (Katsenios *et al.*, 2023; Tandathu *et al.*, 2024).

Já a combinação antagônica de bioestimulantes com herbicidas, como o glifosato, refere-se à interação entre essas substâncias que resulta em uma redução da eficácia do herbicida na mortalidade de plantas daninhas. Isso pode ocorrer devido a diferentes mecanismos, como a competição por sítios de absorção e translocação do herbicida, alterações na fisiologia das plantas daninhas que diminuem sua sensibilidade ao glifosato, promoção de mudanças na permeabilidade das membranas celulares dificultando a entrada do herbicida nas células vegetais e a ativação de mecanismos de defesa das plantas contra estresses (Sousa *et al.*, 2023; Katsenios *et al.*, 2023). Essa interação pode reduzir a eficácia do glifosato no controle das plantas daninhas, exigindo uma abordagem integrada e personalizada para o manejo dessas espécies indesejadas.

Vemos que a sinergia entre bioestimulantes e glifosato pode variar de acordo com o tipo de bioestimulante utilizado, sua concentração, a espécie de planta daninha alvo e outras condições ambientais. Portanto, se faz necessário realizar pesquisas

específicas para cada combinação de bioestimulante e herbicida, a fim de avaliar a eficácia e a segurança dessa abordagem de controle de plantas daninhas. Em adição, como o uso de tecnologias de pulverização localizada de insumos agrícolas podem contribuir para o controle eficiente de plantas daninhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAC. **Quantidade de Cadastros de Drones**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/quantidade-de-cadastros>. Acesso em: 14 jan. 2022.
- ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P.; D'OLIVEIRA, P. S.; OLIVEIRA, J. S. Uso de veículo aéreo não tripulado (vant) no monitoramento dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho. In: Embrapa. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Ponta Grossa: Atena, 2019. Cap. 21. p. 225-234. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bits/tream/item/209340/1/Cap-21-Ebook-EngSanitAmb-Ricardo.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; VOLPATO, C. E. S. DESEMPENHO COMPARATIVO DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL UTILIZANDO DIESEL E MISTURAS DE BIODIESEL. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 32, p. 1588-1593, out. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/T3fRqdynKbbgp7Zn7KxTj3p/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- BHANDARI, R.; SESSA, V.. Energia na agricultura no Brasil. **Revista Ciência Agronômica: Special Agriculture 4.0**, Fortaleza, v. 51, n. 1, p. 2-11, nov. 2020. Trimestral. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/7784>. Acesso em: 11 jan. 2022.
- EMBRAPA. Embrapa Milho e Sorgo. **Monitoramento de plantas daninhas resistentes a glifosato no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1136521/monitoramento-de-plantas-daninhas-resistentes-a-glifosato-no-brasil>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- KATSENIOS, N. et al. Application of Biostimulants and Herbicides as a Promising Approach. **Agronomy**, 2023.
- FERREIRA, P. C.; GÓES, B. C.; PUTTI, F. F.; SILVA, A. B. Main concepts of agriculture 4.0. In: GÓES, B. C.; PUTTI, F. F.; SILVA, A. B. (Orgs.). **Sustainable Innovation in Agriculture**. New Xavantina: Pantanal, 2021.
- MONTANHANI, M. E. S. **Controle de plantas daninhas em pós-emergência na cultura da soja por aplicação terrestre e drone**. 2023. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023.
- NOBRE, F. L. L.; RUPPENTHAL, J. G.; RODRIGUES, E. A.; VERDE, L. V.; SANTOS, R. F.. Acompanhamento de área de pastagem de azevém através de imagens obtidas por drone e índice de vegetação vari. In: III Workshop Internacional Pesquisa Resiliência Ambiental - RIPERC, 3., 2021, Cascavel. **III Workshop Internacional Pesquisa Resiliência Ambiental**. Cascavel: Ceped/Unioeste, 2021. v. 1, p. 299-303. Disponível em: https://netsr-web02.unioeste.br/portal/arq/files/CEPED/ANAIS_DO_III_WORKSHOP_RIPERC_25_nov.pdf. Acesso em: 11 jan. 2022.

ONU. População mundial atingirá 10,3 bilhões em meados da década de 2080. 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/07/1834411>. Acesso em: 14 jul. 2025.

REIPS, L.; GUBERT, L. C. Drones como ferramenta de apoio para agricultores do Rio Grande do Sul. **Revista Ufg**, Ibirubá, v. 19, p. 1-19, 22 ago. 2019. Universidade Federal de Goiás. DOI: <http://dx.doi.org/10.5216/revufg.v19.58528>.

ROSA, Talles Soares. **Invasoras de Difícil Controle**. 2021. Disponível em: <https://avantsementes.com.br/invasoras-de-dificil-controle/>. Acesso em: 11 abr. 2022.

SOUSA, U. V. et al. Interação da mistura em tanque entre os herbicidas diquat e glyphosate na dessecação de área em pousio. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 2, p. 61-70, 2023.

TANDATHU, T. et al. Effect of Biostimulants and Glyphosate on Morphophysiological Parameters of Zea mays (L.) Seedlings under Controlled Conditions. **Agronomy**, v. 14, n. 10, art. 2396, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14102396.

VILLAFUERTE, A.; VALADARES, F. G.; CAMPOLINA, G. F.; SILVA, M. G. P. Agricultura 4.0 - Estudo de inovação disruptiva no agronegócio brasileiro. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGICAL INNOVATION, 9., 2018, Aracaju. **Proceedings of ISTI**. Aracaju: Simtec, 2018. v. 9, p. 150-162. Disponível em: <http://www.api.org.br/conferences/index.php/ISTI2018/ISTI2018/paper/viewFile/567/276>. Acesso em: 13 jan. 2022.

ZAPAROLLI, D. Agricultura 4.0. **Revista Pesquisa**, [S.L.], v. 287, n. 1, p. 1-9, 16 jan. 2020.

3 ARTIGO 1: UTILIZAÇÃO DE DRONES NA PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS: REVISÃO SISTEMÁTICA

O presente artigo apresenta uma revisão sistemática sobre a utilização de drones no contexto da Pulverização Localizada de Herbicidas (PLH), destacando sua aplicação no manejo e controle de plantas daninhas. A abordagem considera aspectos técnicos, econômicos e ambientais, ressaltando como essa tecnologia pode otimizar o uso de insumos agrícolas, reduzir desperdícios e minimizar impactos ambientais. A pesquisa reuniu estudos nacionais e internacionais, com o objetivo de avaliar as potencialidades e desafios do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) na agricultura de precisão.

3.1 INTRODUÇÃO

Os herbicidas representam uma das principais formas de combate às plantas daninhas em culturas agrícolas. Para isso, são utilizados produtos com alto nível de toxicidade para a saúde humana, animal e meio ambiente, principalmente se utilizados sem controle. O método de aplicação mais utilizado no mercado atualmente é a pulverização convencional, que traz consigo problemas como aplicação excessiva em áreas consideradas “saudáveis”, prejudicando o solo fértil para o cultivo. Além disso, também contamina o pasto, afetando indiretamente a saúde do animal. Em todos esses casos, também são gerados prejuízos econômicos.

O Brasil está entre os principais consumidores de defensivos agrícolas do mundo (FAO, 2021). Os danos à saúde humana e os perigos de acidentes envolvidos em seu manuseio são creditados ao seu “uso incorreto” e não necessariamente à toxicidade das formulações e à imposição generalizada do modelo de produção de agrotóxicos no país (Abreu, 2014). Ainda assim, é preciso ressaltar que o agronegócio é responsável por 27,4% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro, valor calculado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Universidade de São Paulo (Cepea -USP) em parceria com a Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária (CNA).

Segundo estudos da Emater (2018), aproximadamente 46% das aplicações de herbicidas são desperdiçadas devido ao erro humano, reforçando a necessidade de ampliação de pesquisas para garantir tomadas de decisão mais precisas. Com o objetivo de reduzir a quantidade de produto aplicado, perdas excessivas por deriva,

umentar a capacidade operacional e o rendimento do produto, novos recursos têm sido cada vez mais buscados, como a aplicação localizada. Por meio dela, é possível obter economia de herbicidas em torno de 69–79% em áreas de baixa infestação (Castro *et al.*, 2018). Em geral, o sistema de aplicação localizada visa aplicar o produto diretamente no alvo na quantidade correta.

Neste sistema, normalmente é utilizado o sensoriamento remoto por drones para identificar a área desejada. O sensoriamento remoto tem sido adotado para controlar a qualidade vegetal de culturas de campo por meio de sua capacidade de adquirir um alto nível de informação por meio de fotografias aéreas (com o uso de drones, por exemplo), imagens de satélite e outras. Com um profissional qualificado, é possível fazer um diagnóstico preciso por meio das imagens obtidas e, na mesma área, é possível detectar danos e necessidades diversas.

O objetivo da tecnologia de pulverização é colocar a quantidade correta de ingrediente ativo no alvo desejado, com a máxima eficiência e da forma mais econômica possível, sem afetar o meio ambiente (Durigan, 1989). Johnson *et al.* (1997), Stafford e Benlloch (1997) e Antuniassi (1998) apresentaram três opções para realizar a aplicação localizada de herbicidas por meio de diferentes tecnologias. A primeira tecnologia mostra que é possível detectar plantas daninhas em tempo real usando câmeras e sensores digitais. Essas informações são processadas instantaneamente, possibilitando a pulverização pontual imediata de herbicidas apenas nas áreas necessárias. No entanto, deve-se ressaltar que é uma tecnologia sensível e precisa que requer calibração durante toda a aplicação. A segunda tecnologia está associada ao mapeamento de plantas daninhas, onde a operação de mapeamento é realizada antes do processo de pulverização, e após é possível aplicar a dosagem recomendada para cada local da área. No entanto, essa tecnologia necessita de um sistema de posicionamento. A terceira via está associada à aplicação localizada de herbicidas com base na variabilidade espacial dos fatores edáficos. A variação das dosagens de herbicidas pode ser realizada de acordo com a variabilidade do solo previamente mapeado e que serve de base para a construção do mapa de prescrição.

Entre as estratégias para adoção do uso de PLH (Herbicide Spot Spraying) os drones de baixo custo, também chamados de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), representam uma excelente opção. Com esse sistema de processamento de imagens e dados, é possível produzir mapas onde as plantas daninhas são georreferenciadas de forma isolada ou em grupos de plantas daninhas. O mapa de

plantas daninhas produzido pelo sistema PLH após o processamento das imagens do drone passa por um processamento posterior, sendo adaptado à máquina que realiza a operação de pulverização. Os mais utilizados no Brasil hoje são os pulverizadores autopropelidos, os pulverizadores de reboque e os drones pulverizadores (não necessariamente nessa ordem de relevância).

No caso do drone, algumas vantagens diferenciadas são obtidas, em linha com os demais conceitos modernos do sistema PLH, pois uma vez feito o imageamento de campo com este equipamento, a missão também é executada no modo de voo autônomo, previamente programado. Quando outro drone é utilizado para a operação de pulverização, na sequência, este também realiza a missão remotamente pilotada de forma autônoma, com base no mapa PLH previamente produzido. A combinação dos dois drones, “drone to imaging” e “drone to spraying”, eleva o conceito PLH a um sistema executado com voos totalmente autônomos, sem necessidade de operador a bordo da máquina em nenhum momento. Além disso, utiliza quantidades reduzidas de insumos, com aplicações em áreas de fácil e difícil acesso, gerando melhor controle de plantas daninhas, menor fitotoxicidade à cultura, maior produtividade média e produção de nutrição de melhor qualidade industrial ou para consumo direto.

Diante do exposto, esta revisão tem como objetivo avaliar como os drones podem auxiliar no controle de plantas daninhas no contexto da Pulverização Localizada de Herbicidas (PLH).

3.2 MÉTODOS

Foi realizada uma revisão bibliográfica, com base na pesquisa de trabalhos científicos que analisaram exclusivamente o impacto da pulverização localizada de herbicidas (PLH) por drone. Para o planejamento da coleta de dados, os pesquisadores adaptaram o passo a passo de Paranhos *et al.* (2016), desenvolvido em cinco etapas (Tabela 1).

Tabela 1. Etapas do planejamento da coleta de dados para a revisão sistemática sobre pulverização localizada de herbicidas (PLH) com drones

Fases	Descrição
1	Definição do tema e questão norteadora do estudo (PICo)
2	Definição de critérios de seleção (inclusão e exclusão de artigos)
3	Seleção de bases de dados e descritores para acesso à literatura
4	Coleta de dados
5	Análise dos resultados

Fonte: Adaptado de Paranhos *et al.* (2016).

Para definir a questão norteadora deste estudo, foi utilizada uma adaptação da

estratégia PICO (Araújo, 2020), que se refere a uma sigla cujo significado é problema (P), fenômeno de interesse (I) e contexto (Co). Assim, considerou-se como “P” Plantas Daninhas, “I” drone, “Co” Pulverização Localizada de Herbicidas (PLH). Desta forma, a questão norteadora deste estudo foi: “Como é realizado o controle de plantas daninhas, por meio do uso de drone, no contexto da Pulverização Localizada de Herbicidas (PLH)?”

Para responder à questão acima mencionada, em novembro de 2022, foram pesquisados artigos científicos utilizando dois métodos diferentes, um deles de forma controlada e outro de forma não controlada.

3.2.1 Método controlado

A busca nas bases de dados foi realizada nas bases de dados Scientific Electronic Library Online (Scielo), Directory of Open Access Journals (DOAJ), *Periódicos* CAPES e Google Acadêmico. Os descritores definidos para esta pesquisa foram, “Weed”, “drone”, “Remotely Piloted Aircraft System”, “Unmanned Aerial Vehicle” e “Precision Spray” (Tabela 2).

Tabela 2. Descrição da estratégia PICO com definição de descritores em inglês e português

Acrônimo	Definição	Descritor(es)
P	Problema	Erva daninha Planta daninha
I	Interesse	Drone; Sistema de aeronave pilotada remotamente; Veículo aéreo não tripulado Drone ; Aeronave pilotada remotamente; Veículo aéreo não tripulado
Co	Contexto	Pulverização de precisão; Pulverização de localizada

Com o objetivo de abordar todos os descritores de forma eficiente e eliminar o máximo possível de resultados indesejados, foi definida a seguinte string de busca, utilizada em todas as bases de dados: (“Weed” AND (Drone OR Remotely Piloted Aircraft System OR Unmanned Aerial Vehicle) AND “Precision Spray”). Exclusivamente na base de dados Google Acadêmico, a busca também foi realizada com a *string* com os descritores em português, com o objetivo de ampliar a busca por artigos publicados no âmbito nacional/regional/local, cujas pesquisas tivessem aplicação direta no contexto da agricultura de precisão no Brasil. Para isso, a procura *string* usada foi (“*Planta Daninha*” E (Drone OU “*Aeronave Pilotada Remotamente*” OU “*Veículo Aéreo Não Tripulado*”) E (“*Pulverização Localizada*” OU “*Pulverização de Precisão*”).

Estabeleceram-se como critérios de inclusão artigos originais, publicados entre 2004 e 2022, em qualquer idioma, desenvolvidos no Brasil e internacionalmente e disponíveis na íntegra. Posteriormente, foram selecionados artigos cujos títulos e resumos estivessem associados à temática deste estudo. Foram excluídos artigos duplicados nas bases de dados investigadas.

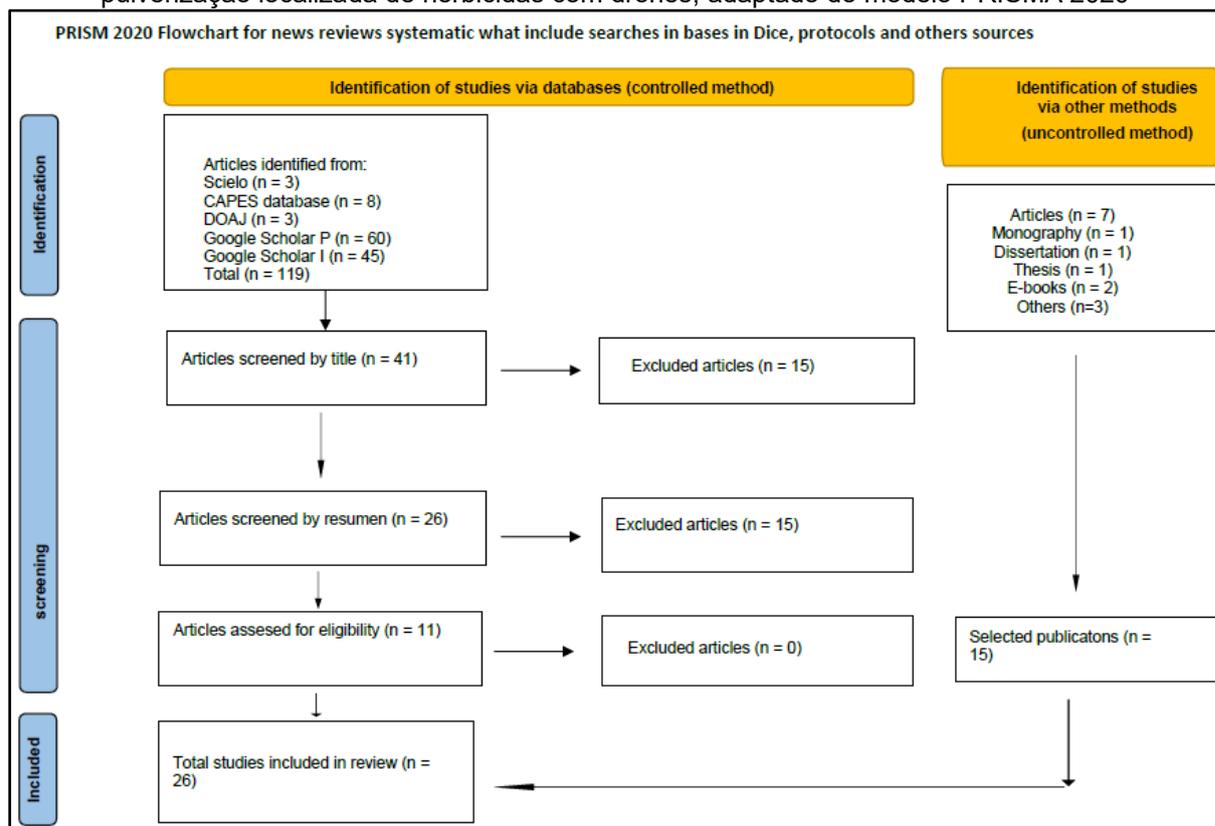
3.2.2 Método descontrolado

A busca não controlada pela literatura científica foi realizada a partir da seleção de trabalhos científicos citados em outros estudos, bem como de indicações, pesquisas na internet e em bibliotecas físicas e online. Por esse método, foram selecionados artigos científicos, relatórios governamentais, teses, dissertações e resumos publicados em anais de eventos científicos.

3.2.3 Seleção e análise dos artigos

A seleção dos artigos seguiu as recomendações das diretrizes PRISMA com adaptações (Page *et al.*, 2021) (Figura 1). A análise e organização dos estudos selecionados foram realizadas de forma descritiva. A coleta de dados incluiu os seguintes itens: ano, autoria, título e país de origem (Tabelas 3 e 4) e informações referentes à evolução do sensoriamento remoto na agricultura, impacto econômico, impacto ambiental, tecnologia de imagens por drones e perspectivas futuras. A pesquisa e seleção dos artigos foi realizada em novembro de 2022, por dois pesquisadores.

Figura 1. Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão de estudos sobre pulverização localizada de herbicidas com drones, adaptado do modelo PRISMA 2020



Fonte: Adaptado de Page *et al.* (2021).

Tabela 3. Descrição dos trabalhos selecionados de forma controlada nas bases de dados, que abordam o impacto da pulverização localizada de herbicidas (PLH) por drone

Identificação do artigo: autor/ano	Título	País
BARBOSA JÚNIOR <i>et al.</i> , 2022	Revisão integrativa de VANTs para monitoramento e manejo da cana-de-açúcar	EUA
SABOIA <i>et al.</i> , 2022	Pulverização seletiva em tempo real para controle de viola rope em culturas de soja e algodão usando aprendizado profundo	Brasil
ANZILIERO, 2021	Técnicas de monitoramento de UAV: uma revisão dos resultados obtidos na agricultura	Brasil
MATTIVI <i>et al.</i> , 2021	Drones comerciais de baixo custo e tecnologias GIS de código aberto podem ser adequados para mapeamento semiautomático de ervas daninhas para agricultura inteligente: um estudo de caso na Itália	Itália
KHAN <i>et al.</i> , 2021	Sistema de identificação de ervas daninhas baseado em aprendizado profundo	Paquistão
ESPOSITO <i>et al.</i> , 2021	Tecnologia de drones e sensores para sustentabilidade	Itália
JENSEN, SMITH; DEFEO, 2020	Um sistema automatizado de manejo de plantas daninhas em pousio específico para cada local usando veículos aéreos não tripulados	Austrália

Identificação do artigo: autor/ano	Título	País
SILVA & CAVICHIOLO, 2020	A utilização da Agricultura 4.0 como perspectiva de aumento da produtividade no campo	Brasil
CHIACCHIO, TEIXEIRA & TECH, 2017	VANT: um estudo sobre o uso de veículos aéreos não tripulados na agricultura de precisão	Brasil
NEW SCIENTIST, 2013	Drones de herbicidas de precisão lançam ataques contra ervas daninhas	Londres
SHIRATSUCHI, MOLIN & CHRISTOFFOLETI, 2004	Mapeamento da distribuição espacial de <i>Panicum maximum</i> durante a colheita de milho	Brasil

Tabela 4. Descrição de trabalhos selecionados de diferentes fontes, que abordam o impacto da pulverização localizada de herbicidas (PLH) por drone

Identificação do artigo: autor/ano	Título	País
FERREIRA <i>et al.</i> , 2021	Inovação sustentável na agricultura	Brasil
RODRIGUES, 2020	VANT: da sua criação até os dias atuais	Brasil
RIBEIRO; SULAIMAN, 2020	O risco climático na agricultura no Brasil no contexto dos mecanismos de busca (big data)	Brasil
ZAPAROLLI, 2020	Agricultura 4.0	Brasil
OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2020	Potencialidades do uso de drones na agricultura de precisão	Brasil
ANDRADE <i>et al.</i> , 2019	Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) para monitoramento de estágios de desenvolvimento da cultura do milho	Brasil
SILVA, 2018	A “revolução militar” dos drones (2001 a 2018): da “caça ao homem” no Afeganistão às várias frentes de batalha no Médio Oriente e à escalada da guerra entre as “grandes potências”	Brasil
VILLAFUERTE, VALADARES E CAMPOLINA, 2018	Agricultura 4.0 - Estudo da inovação disruptiva no agronegócio brasileiro	Brasil
NARDINI, 2016	Veículos aéreos não tripulados e segurança de voo: uma análise no contexto internacional	Brasil
BUZZO, 2015	Drones: um pequeno histórico e as consequências do seu uso	Brasil
SANTOS, 2018	Cartografias: latitudes móveis, longitudes	Brasil
PIN KOH & WICH, 2012	Alvorecer da ecologia dos drones: veículos aéreos autônomos de baixo custo para conservação	Suíça
WEBSTER, 2011	AIR. Drone chegando ao Android, ganha novos jogos multijogador	EUA

Identificação do artigo: autor/ano	Título	País
BARBOSA <i>et al.</i> , 2008	Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel usando misturas de diesel e biodiesel	Brasil
TESLA, 1898	Método e aparelho para controlar o mecanismo de movimentação de embarcações ou veículos	EUA

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Características gerais dos estudos

Nesta revisão, foram selecionados 26 trabalhos, entre artigos científicos e outros tipos de trabalhos técnicos. Ficou evidente que, dos estudos analisados, a maioria foi produzida por pesquisadores brasileiros (Figura 2), com o número de autores variando de um a oito, totalizando 74 autores envolvidos com todos os trabalhos. Em relação ao ano de publicação, a maioria dos trabalhos foi publicada a partir do ano de 2020, evidenciando a inovação associada ao uso de drones na pulverização localizada de herbicidas (Figura 3).

Figura 2. Distribuição do número de publicações selecionadas sobre pulverização localizada de herbicidas (PLH) com drones segundo o país de origem

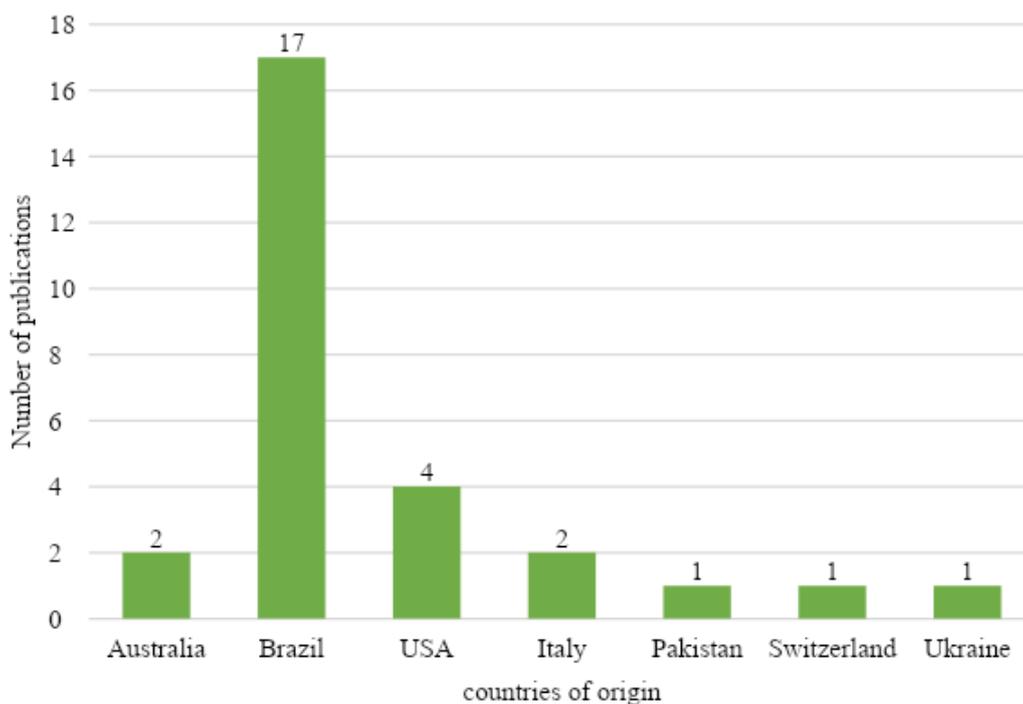
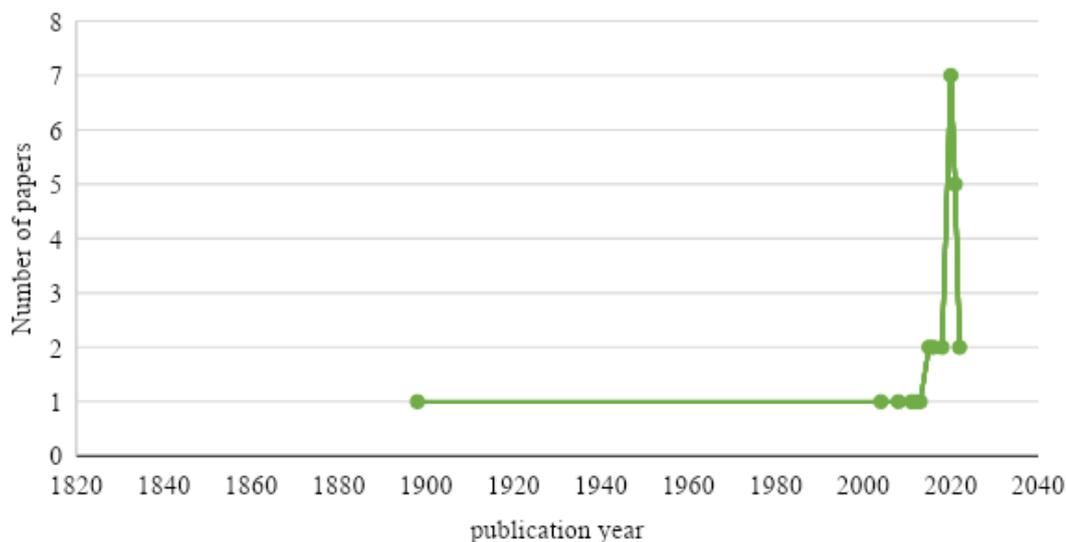


Figura 3. Distribuição do número de trabalhos selecionados sobre pulverização localizada de herbicidas (PLH) com drones por ano de publicação



3.3.2 Evolução do sensoriamento remoto na agricultura

O sensoriamento remoto na agricultura tem suas origens associadas a antigos conflitos militares entre alguns países. Possivelmente, a origem mais antiga está associada ao ano de 1849, quando a Áustria enviou para a região de Veneza, na Itália, balões com bombas acopladas que eram lançadas após um certo tempo. Esse ataque, no entanto, foi um fracasso devido ao vento (Nardini, 2016). Já em 1898, o Exército dos EUA utilizava câmeras acopladas em pipas para reconhecimento terrestre durante conflitos. Essas câmeras capturavam imagens de áreas de interesse (Buzzo, 2015). No entanto, tanto os balões austríacos quanto as pipas norte-americanas eram influenciados por fatores externos e não podiam ser controlados à distância, sendo considerados, portanto, apenas uma ideia de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), mas que ainda não apresentavam um meio que permitisse maior controle sobre os veículos. No mesmo ano, Nikola Tesla desenvolveu um barco que podia ser controlado remotamente, via rádio, já prevendo que essa tecnologia seria utilizada em guerras (Tesla, 1898).

No entanto, ainda foram necessários vários anos e vários modelos para aperfeiçoar a tecnologia. Com os avanços tecnológicos, na Segunda Guerra Mundial, foram utilizadas bombas guiadas V-1, desenvolvidas pela Alemanha. Estas voavam apenas em linha reta e a velocidade era constante até o local determinado. No entanto, neste caso, esta tecnologia foi desastrosa, sendo responsável por milhares de mortes.

Cabe destacar que em 1908 o fotógrafo alemão Júlio Neubronner patenteou o sistema de utilização de câmeras fotográficas transportadas por pombos, onde as câmeras iniciavam o disparo sequencial de fotografias algum tempo após o início do voo dessas aves. A CIA (Central Intelligence Agency) em operações na década de 1970, durante o período da Guerra Fria (após a Segunda Guerra Mundial), utilizou esse sistema para fotografar locais estratégicos das tropas da União Soviética, permitindo melhor reconhecimento do terreno e gerando informações estratégicas. Essa operação foi denominada “Tacana” (que significa “saber voltar para casa”) (Santos, 2018).

Durante a Guerra do Yom Kippur (1973), em Israel, a Northrop criou o Chukar, o primeiro drone capaz de transmitir imagens e dados de radar em tempo real para um centro de comando (Silva, 2018). Em 1998, o drone Laima tornou-se o primeiro a cruzar o Oceano Atlântico, completando o trajeto em 26 horas. Até hoje, toda a tecnologia foi predominantemente desenvolvida em modelos de asa fixa, semelhantes aos aviões, que têm a característica de ter uma maior autonomia de voo. Em 2007, o *drone Aerosonde (AR)*, um modelo quadricóptero em tamanho reduzido quando comparado aos drones de asa fixa, capturou imagens inéditas de um furacão na Virgínia, demonstrando novos objetivos para o desenvolvimento deste tipo de equipamento (Silva, 2018).

O *AR Drone* foi lançado em 2010, o primeiro drone do modelo mais comum que está em uso atualmente, da empresa *Parrot*. Este drone é um quadricóptero controlado via *Wi-Fi*, com autonomia de voo de até 46 minutos. Este equipamento serviu de modelo para o lançamento do primeiro drone comercial da DJI (*Dà -Jiāng Innovations Science and Technology*), empresa chinesa que até então desenvolvia peças e vendia drones em formato modular, ou seja, o cliente personalizava conforme suas necessidades. Este drone comercial era o *Phantom*, com design mais aerodinâmico. Esta aeronave tinha autonomia de voo de apenas 10 minutos e não possuía câmera embutida (Webster, 2011).

É importante ressaltar que a tecnologia utilizada para criação de drones evoluiu muito rapidamente e continua evoluindo, com a inclusão de sensores de obstáculos, câmeras de alta resolução embutidas, estabilizadores de câmera, etc. Além disso, eles têm muitas utilidades, não apenas para captura de imagens. Entre os vários modelos e usos, estão os drones destinados à aplicação na agricultura, para pulverização de defensivos líquidos e/ou dispersão de sólidos, entrega e transporte

de produtos, monitoramento e serviços de segurança pública, entre muitos outros (Rodrigues, 2020).

Os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) apresentam vantagens sobre os VTNTs (Veículos Terrestres Não Tripulados) inicialmente desenvolvidos, pois voam, e por isso conseguem operar mesmo em condições em que o tráfego de máquinas terrestres não é possível, como em solos com alta umidade onde há problema de escorregamento, em solos encharcados ou com camada superficial de água, como ocorre no cultivo de arroz irrigado no Brasil, em áreas com materiais dispersos que danificam as máquinas terrestres como pedras, galhos ou tocos, comuns em áreas de reflorestamento, entre outros. O limite dos VANTs está relacionado à presença de chuva exatamente no momento da pulverização ou às condições da tecnologia de aplicação vinculadas às especificidades do produto (Esposito *et al.*, 2021).

Segundo Barbosa Júnior *et al.* (2022) a adoção do uso de “drones” no campo tem apresentado alto crescimento comercial, onde pode ser observado ano a ano o desenvolvimento de novas soluções e o aumento do uso de tecnologia associada ou em substituição às tecnologias atuais. A agricultura está em um período de transição onde a tecnologia disruptiva da pulverização aérea, que foi apresentada na época do uso de aviões para pulverização agrícola, apresenta um salto ainda maior associado à precisão, níveis de controle, gerenciamento de informações e agricultura de precisão quando implementada utilizando drones.

A evolução das atuais tecnologias de sensoriamento remoto atualmente inclui o processamento "*onboard*" ou "*real-time*". Há uma tendência de desenvolvimento de equipamentos com tecnologia IOT (Internet Of Things, em português Internet das Coisas) onde o equipamento fará a imageamento dos campos, ao mesmo tempo em que iniciará o processamento dos dados e o envio das informações para o equipamento de pulverização, automatizando todo o processo desde a detecção de lesões, passando pelo processamento dos dados e realizando a operação de aplicação (Saboia *et al.*, 2022).

Essa tendência de automação e integração de tecnologias em tempo real reforça o papel estratégico dos drones como ferramentas complementares aos métodos tradicionais de monitoramento agrícola (Saboia *et al.*, 2022). Ao permitir a coleta e o processamento imediato das informações no próprio equipamento, os drones possibilitam uma resposta mais rápida e precisa às demandas da lavoura. Essa característica os diferencia de outras plataformas de sensoriamento remoto, como os satélites, especialmente no que se refere à qualidade e à frequência das

informações geradas, aspectos em que os drones apresentam vantagens em termos de resolução temporal e espacial (Chiacchio *et al.*, 2016; Esposito *et al.*, 2021).

O sensoriamento remoto por drones é uma realidade nos dias de hoje, onde o monitoramento remoto de lavouras é amplamente utilizado por meio de sensores a bordo de satélites. No entanto, existem muitas diferenças quando se trabalha com sensores a bordo de drones. Para o sensoriamento remoto, três medidas de resolução são importantes para definir o conjunto de equipamentos mais adequado, considerando o conjunto como a soma do equipamento de voo ou órbita e os sensores que ele carrega consigo.

A resolução espacial está diretamente relacionada à capacidade de identificar detalhes no terreno, o que é fundamental para o mapeamento preciso de áreas agrícolas e a detecção de plantas daninhas de forma individualizada. Nesse aspecto, drones oferecem grande flexibilidade, pois o operador pode ajustar a altitude de voo e, conseqüentemente, o tamanho do pixel, chegando a resoluções muito superiores às obtidas por sensores orbitais de uso gratuito (Pin Koh; Wich, 2012). Essa vantagem possibilita a geração de ortomosaicos detalhados e a aplicação localizada de insumos, reduzindo desperdícios e impactos ambientais (Esposito *et al.*, 2021). Já a resolução espectral, embora mais limitada nos drones comerciais em comparação com satélites de alta tecnologia, pode ser expandida com a utilização de sensores multiespectrais ou hiperespectrais embarcados, permitindo a identificação de estresses nutricionais e fitossanitários invisíveis ao olho humano.

A resolução temporal, por sua vez, é um fator decisivo para o monitoramento agrícola dinâmico, pois define a frequência com que as informações são atualizadas. Enquanto satélites seguem órbitas fixas e possuem intervalos pré-determinados de revisita, drones podem ser operados a qualquer momento, proporcionando maior flexibilidade para capturar dados em períodos críticos, como no surgimento de infestações ou durante eventos climáticos adversos (Chiacchio *et al.*, 2017). Essa capacidade de operação sob demanda favorece uma gestão agrícola mais responsiva e eficiente, especialmente quando integrada a sistemas de processamento em tempo real e plataformas de Agricultura 4.0 (Ferreira *et al.*, 2021; Saboia *et al.*, 2022).

3.3.3 Impacto econômico

Entre as principais injúrias que afetam a produção agrícola, as plantas daninhas são as mais importantes, pois afetam a produtividade média final, a

qualidade dos alimentos e, conseqüentemente, o custo de produção. Também conhecidas como plantas invasoras, o conceito de planta daninha não está relacionado a uma espécie ou gênero específico. Diz respeito a qualquer planta que apareça irregularmente no manejo agrônômico desejado, podendo até ser da mesma espécie ou cultivar em questão, desde que esteja prejudicando o desenvolvimento da forma planejada pelo agricultor ou pecuarista.

Sabe-se que áreas de cultivo são ecossistemas abertos, ou seja, estes são influenciados por fatores externos. Por isso, é comum a presença de plantas indesejadas em áreas produtivas. Plantas invasoras competem por água, luz e nutrientes, demandando um manejo diferenciado para seu controle (Barbosa Junior *et al.*, 2022). O controle efetivo de plantas daninhas em terras de cultivo é complexo. Uma das causas dessa complexidade está associada à resistência aos herbicidas mais comuns, demandando manejos mais específicos e muitas vezes de maior valor, principalmente considerando o aumento do custo desses insumos (Rosa, 2021).

A forma mais comum de manejo é a aplicação em dose única em toda a área, seja com pulverizador de arrasto, autopropelido ou mesmo via drone. Entretanto, esse tipo de aplicação nem sempre é o ideal, tendo em vista que os alvos de interesse não estão presentes em toda a área e que a dose aplicada pode ser muito baixa para de fato matar a planta invasora. Além disso, há também desperdício de herbicida e combustível quando a pulverização passa por áreas sem a presença de plantas daninhas, o que, além de antieconômico, pode contaminar o solo e a água próximos à área de aplicação (Marini, 2014).

O uso de “drones” na agricultura estimula a atuação de profissionais não tradicionais no meio agrícola, principalmente pelo envolvimento de tecnologias que migram de outros setores para o agronegócio. Ainda assim, eles também impactam diretamente nos hábitos de consumo de insumos agrícolas, uma vez que um melhor conhecimento e monitoramento mais detalhado da área rural podem levar à aquisição de insumos diferenciados, mais específicos, com mais tecnologia embarcada, em menores quantidades e mais alinhados à conservação do meio ambiente (Anziliero, 2021).

Entre os mais diversos impactos econômicos do uso de drones na agricultura, pode-se citar o melhor aproveitamento de mão de obra em áreas rurais e maior segurança nas operações agrícolas, uma vez que as aeronaves são pilotadas remotamente, não sendo, portanto, tripuladas. Ainda existem algumas diferenças entre os drones, os de imageamento, que podem ser de asa fixa ou multirrotor, e os

de pulverização, que podem ser menores (no mercado atual existem versões com capacidade de 10 L de carga) ou maiores (atualmente no Brasil existem drones com capacidade de carga de até 40 L).

Além dos benefícios econômicos diretos, como a redução de custos e o aumento da segurança operacional, a diversidade de modelos e configurações de drones amplia as possibilidades de aplicação no campo, tornando-se um fator determinante para a escolha da tecnologia mais adequada a cada realidade produtiva. Essa variedade está relacionada tanto às características estruturais das aeronaves quanto ao tipo de operação a ser realizada, seja para fins de monitoramento e mapeamento ou para a pulverização localizada de herbicidas. A compreensão dessas diferenças é essencial para alinhar o investimento tecnológico aos objetivos agrônômicos e às condições específicas de cada propriedade rural.

Para geração de imagens existem diferentes modelos, cujas ações também são variadas. O drone de Asa Fixa é o modelo com maior alcance de voo, maior velocidade e, portanto, maior cobertura de área. O drone Multirotor é o modelo com melhor qualidade de imagem, no que se refere à resolução espacial e facilidade/agilidade para processamento de dados. Para drones pulverizadores, são considerados dois modelos, os Drones Menores, que são mais fáceis de operar e manusear equipamentos periféricos, além de uso mais otimizado de baterias; os Drones Maiores, que têm melhor desempenho operacional, pulverizando áreas maiores, em menos tempo e com menor custo (Chiaccio *et al.*, 2017).

O sistema Spray Specific Weed Management (SSWM), proposto por Shahbaz Khan *et al.* (2021) visa o uso eficiente e controlado de insumos agrícolas, especificamente herbicidas para controle de plantas daninhas. Este sistema é baseado na capacidade de realizar georreferenciamento por meio de sensoriamento remoto eficiente, que monitora o padrão e a dispersão de plantas daninhas no campo e está relacionado ao manejo do ingrediente ativo e da dose em linha com o que é encontrado neste mecanismo. O SSWM é um sistema em desenvolvimento que pode monitorar e identificar com precisão as plantas daninhas em uma área agrícola. Com isso, é possível avaliar o nível de ameaça atual e seu potencial na produtividade da área, determinando o momento certo e quais serão as medidas de controle (Khan *et al.*, 2021).

Cabe destacar que, em geral, a principal preocupação dos agricultores está associada à incerteza da lucratividade, que é agravada por considerações de viabilidade e altos custos de investimento. De fato, se fazendas com áreas maiores

podem estar mais interessadas em adotar Tecnologias de Agricultura de Precisão (TAPs), enquanto pequenas e médias fazendas podem estar menos envolvidas. O tamanho da área é reconhecido como um dos principais fatores determinantes na adoção de TAPs. Há maior adesão às tecnologias no mercado por agricultores cujas áreas são maiores, pois é mais comum que tenham mais acesso à informação e sejam mais assediados pelo mercado. Muitas vezes, eles também são mais tecnificados, ou seja, já têm o hábito de consumir tecnologia de ponta, enquanto agricultores menores podem ser mais conservadores em relação à adoção de inovações no campo (Mattivi *et al.*, 2021).

3.3.4 Impacto ambiental

Por meio do sensoriamento remoto via drones, é possível delimitar com alta precisão zonas ou ambientes afetados pela presença de plantas daninhas e outros fatores de estresse, permitindo a racionalização do uso de insumos agrícolas. Essa prática se insere em um manejo de base conservacionista, no qual a aplicação de produtos químicos ou biológicos ocorre exclusivamente em áreas onde a presença do agravo é confirmada por levantamentos remotos (Anziliero, 2021). Para alcançar esse nível de precisão, os drones podem ser equipados com diferentes sensores embarcados, como câmeras RGB de alta resolução, capazes de capturar imagens em cores visíveis com excelente detalhamento; sensores multiespectrais, que registram faixas específicas do espectro eletromagnético, permitindo calcular índices de vegetação como o NDVI; sensores hiperespectrais, que oferecem centenas de bandas espectrais para identificar variações sutis de saúde vegetal; e sensores térmicos, úteis para detectar alterações de temperatura associadas ao estresse hídrico ou ataques de pragas.

Utilizando técnicas avançadas de processamento dessas imagens e dados, é possível georreferenciar com precisão tanto plantas individuais quanto populações de plantas daninhas (weed plant set), integrando as informações obtidas a sistemas de informação geográfica (SIG) para elaboração de mapas de aplicação. Dessa forma, torna-se viável empregar herbicidas de formulação mais tecnológica de forma direcionada, reduzindo o uso do insumo às áreas de real necessidade. Consequentemente, áreas livres de infestação não recebem aplicação, evitando desperdício de produtos e mitigando impactos ambientais (Shiratsuchi *et al.*, 2004). Essa integração entre sensores embarcados, análise geoespacial e tomada de

decisão baseada em dados consolida o uso de drones como uma ferramenta central para a Agricultura de Precisão e para estratégias de manejo sustentável.

3.3.5 Tecnologia de imageamento de drones

Durante a Conferência de Hannover, em 2011, surgiu o termo “Agricultura 4.0”, cujo objetivo era promover a integração de tecnologias com a produção agrícola, melhorando a captura de informações para a tomada de decisão pelos produtores (Ribeiro; Sulaiman, 2020). O grande desafio, segundo Villafuerte *et al.* (2018), é atender à crescente demanda por alimentos e energia elétrica em decorrência do crescimento populacional, sem expandir as fronteiras agrícolas e valorizando a produção sustentável.

É por meio da Agricultura 4.0 que esse desafio será enfrentado e solucionado, com tecnologias como Big Data Analytics, armazenamento em nuvem, Internet das Coisas (IoT), Machine Learning, sensores sem fio, drones (Ferreira *et al.*, 2021). Todas essas tecnologias, aliadas a uma boa gestão, apresentam resultados satisfatórios, como melhora da saúde financeira e aumento da produtividade nas propriedades rurais brasileiras (Zaparolli, 2020). Nesse sentido, é de suma importância identificar onde essas tecnologias podem ser aplicadas na gestão utilizada pelo produtor, como no caso do monitoramento da lavoura.

Os drones estão cada vez mais presentes no cotidiano, com diferentes funções, que vão desde um simples passatempo até auxiliar bombeiros a identificar focos de incêndio. Existem diversos modelos, formatos e tamanhos utilizados, para as mais variadas finalidades. Dentre elas, pela importância, origem e avanço dessa tecnologia no uso militar, que teve desde seu surgimento até os dias atuais, avanços em relação ao método de comunicação entre o controle e o drone, permitindo maior autonomia e distância de voo; avanços em termos de qualidade de voo e sensores, melhorando a coleta e utilização de dados; entre outros fatores que tornaram o drone uma ferramenta cada vez mais relevante (Costa, 2019).

Além do sensoriamento remoto por meio de imagens de satélite, a obtenção de imagens remotamente requer melhor resolução espacial e controle da resolução temporal. Por isso, surgiram as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), também conhecidas popularmente como drones. O fato de voarem em menor altitude que os satélites, reduz problemas com nuvens, por exemplo, na captura de imagens. Além disso, a resolução temporal depende apenas do piloto e das baterias necessárias para

a realização dos voos, com avanços em relação ao método de comunicação entre o controle e o drone, permitindo maior autonomia e distância de voo; avanços em termos de qualidade de voo e sensores, melhorando a coleta e utilização de dados; entre outros fatores que têm tornado o drone uma ferramenta cada vez mais relevante, maior controle sobre ele e garantia da aquisição periódica de informações da área, quando necessário (Oliveira *et al.*, 2020). No que se refere à resolução espacial, além da menor altitude de voo, há dependência da câmera a bordo do ARP que, somada aos avanços tecnológicos, produz imagens com tamanhos de pixels muito menores do que as imagens de satélite que distribuem dados gratuitamente, chegando a atingir entre 2 e 3 cm, na maioria dos voos (Pin Koh; Wich, 2012).

Para obter imagens em outras bandas do espectro eletromagnético, podem ser feitas alterações na câmera, como filtros ou mesmo substituição por outros sensores, que permitem uma gama maior de informações para o cálculo dos índices de vegetação. No entanto, os sensores RGB apresentam uma excelente relação custo-benefício, pois além de conseguir extrair índices da interação das três bandas (vermelha, verde e azul), outros produtos como ortomosaicos e modelos 3D podem ser gerados, com o auxílio de softwares específicos de geoprocessamento (Andrade *et al.*, 2019).

Os drones atuais podem, se necessário, melhorar a resolução de pixels (resolução espacial) de forma a atingir 0,01m (por exemplo), ajustando apenas a altura do voo. Também podem ser equipados com diferentes sensores (desde sensores ópticos até sensores multi e hiperespectrais) de acordo com o objetivo/alvo de captura nas imagens obtidas pelo voo do drone, visando a detecção e manejo de plantas daninhas. Esse conhecimento faz parte do que é conhecido como Agricultura 4.0 e fornece suporte técnico e operacional eficaz para a tomada de decisões e o uso da agricultura de precisão. A maioria das soluções de análise de imagens são facilmente encontradas em softwares comerciais ou de código aberto e a maioria não exige conhecimento técnico ou específico do usuário, o que torna o uso dessa ferramenta mais fácil e prático. Portanto, esse conjunto de recursos inteligentes associados ao VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) comprova sua eficiência e facilidade na detecção de plantas daninhas (Mattivi *et al.*, 2021).

No caso da criação de um ortomosaico georreferenciado com dados RGB, as imagens individuais são retificadas usando dados de GPS e compiladas para formar uma única imagem com todos os detalhes e cobrindo toda a área. Comparados aos dados RGB mencionados anteriormente, os sensores multiespectrais têm uma gama

maior de dados para serem utilizados em cálculos de índice de vegetação, pois têm maior número de bandas radiométricas (Esposito *et al.*, 2021).

Sensores hiperespectrais, por outro lado, têm o poder de registrar até centenas de bandas radiométricas estreitas, tanto no espectro eletromagnético visível quanto no infravermelho. No entanto, trabalhar com aplicações hiperespectrais tende a ser mais trabalhoso, devido à necessidade de escolher o número de bandas radiométricas para a finalidade desejada. Cada banda ou conjunto de bandas pode servir para detectar diferentes características no campo. Como cada sensor espectral pode detectar apenas um certo número de bandas, o objetivo do levantamento deve ser bem definido para que o sensor correto possa ser escolhido (Esposito *et al.*, 2021).

3.3.6 Perspectiva futura

O aumento da utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para monitoramento está em ascensão atualmente devido às novas tecnologias, principalmente por oferecerem soluções práticas e objetivas às necessidades do setor (Chiaccio *et al.*, 2017).

Com o avanço da tecnologia de pulverização de precisão, os mapas de prescrição desenvolvidos com algoritmos de reconhecimento de plantas daninhas em ortofotos reconhecidos pelos VANTs, permitem obter inúmeros benefícios com este sistema de aplicação. Além do aspecto econômico, utilizando apenas a quantidade necessária de produto em áreas de real necessidade, há também aspectos ambientais e de saúde a serem considerados, devido à redução na aplicação de herbicidas (Anziliero, 2021).

Ainda há uma certa carência de um sistema objetivo para geração de mapas de aplicação de herbicidas para uso com equipamentos de pulverização de precisão. Os sistemas conhecidos no mercado atualmente não coletam imagens de forma direta e automática, bem como processamento de dados e liberação de aplicações (Embrapa, 2025).

3.4 CONCLUSÃO

Os serviços de drones no agronegócio constituem um nicho de mercado em crescente desenvolvimento, com potencial para otimizar as atividades agrícolas e o consumo de insumos, reduzindo drasticamente o consumo de combustíveis fósseis,

pois funcionam com bateria, sendo de grande importância a realização de mais pesquisas utilizando essas tecnologias.

Por meio do PLH, obtém-se uma redução na quantidade e no volume de aplicações de herbicidas realizadas na colheita, com mais eficiência e agilidade no controle de plantas daninhas. Conseqüentemente, reduz-se o consumo de diesel nos equipamentos e, por sua vez, a emissão de gás carbônico na atmosfera, sendo ambiental e economicamente sustentável.

Além disso, a utilização desse sistema resulta em significativa redução no volume de herbicida aplicado, uma vez que possibilita a identificação precisa dos locais onde há presença de plantas invasoras (*weed sets*), direcionando a aplicação apenas para essas áreas. Essa abordagem não apenas otimiza o uso de insumos, como também preserva o solo e os recursos naturais, evitando aplicações desnecessárias. Com a diminuição da competição entre plantas no campo, é possível alcançar maior produtividade média na área analisada e, conseqüentemente, aumentar a lucratividade do produtor pela redução dos custos de manejo. Paralelamente, a adoção de tecnologias como drones abre espaço para a entrada de novos perfis profissionais no agronegócio, incluindo especialistas em análise de dados, desenvolvedores de sistemas e operadores de aeronaves remotamente pilotadas, ampliando a interdisciplinaridade do setor e incentivando a integração de conhecimentos vindos de áreas não tradicionais na agricultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P. H. B. **The family farmer and the (un)safe use of pesticides in the municipality of Lavras, MG**. 2014. 205 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Coletiva) Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

ANDRADE, R. G. *et al.* **Uso de veículo aéreo não tripulado (vant) no monitoramento dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho**. In: SILVA, H. C. Sanitary and Environmental Engineering. Ponta Grossa: Atena, 2019. Disponível em: <https://intranet.cnpqgl.embrapa.br/metlas/node/5589>. Acesso em: Apr, 15, 2022. doi: 10.22533/at.ed.006192407.

ANTUNIASSI, U. R. Precision agriculture: localized application of pesticides. In: Technology and safety in the application of agrotoxics, Santa Maria, 1998. **Anais**. Santa Maria: UFSM, 1998.

ANZILIERO, D. As técnicas de monitoramento por VANT: Uma revisão dos resultados obtidos na agricultura. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 10, p. 34-47, 2021. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/187>. Acesso em: Jul, 15, 2022. doi: 10.47879/ed.ep.2021328p34.

BARBOSA JÚNIOR, M. R.; MOREIRA, B. R. de A.; BRITO FILHO, A. L.; Tedesco, D.; *et al.* UAVs to Monitor and Manage Sugarcane: Integrative Review. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 661, mar. 2022.

BARBOSA, R. L. *et al.* Comparative performance of a diesel cycle engine using diesel and biodiesel blends. **Ciência e agrotecnologia**, v. 32, p. 1588-1593, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/T3fRqdynKbbgp7Zn7KxTj3p/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: May, 11, 2022.

BUZZO, L. (Org.). História dos Drones: do início aos dias de hoje. **Odrones**, 2015. Disponível em: <https://odrones.com.br/historia-dos-drones/>. Acesso em: Apr, 11, 2022.

CASTRO, J. *et al.* Comentário sobre eficiência de drones em áreas de difícil acesso no manejo com pulverização (teste comparativo com avião e helicóptero). **FAPESP Revista Pesquisas**. 2018.

CHIACCHIO, S. S. R. *et al.* VANT: Um estudo sobre a utilização de Veículo Aéreo Não Tripulado na agricultura de precisão. **Espacios**, v. 38, n. 24, p. 5, 2017. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n24/a17v38n24p05.pdf>. Acesso em: Jul, 11, 2022.

COSTA, R. D. **Análise da atuação dos drones na segurança de um país**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado em Direito e Segurança) Curso de Pós Graduação em Direito, Faculdade de Direito, Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/91298>. Acesso em: May, 11, 2022.

DURIGAN, J. C. Behavior of herbicides in the environment. In: Technical seminar on weed plants and the use of herbicides in reforestation, 1989, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBS/ABRACAVE/SIF, 1989.

EMATER. **Relatório técnico**, 2018.

EMBRAPA. Embrapa Soja. **Uso de drones agrícolas no Brasil: da pesquisa à prática**. Londrina, 2025.

ESPOSITO, M. *et al.* Drone and sensor technology for sustainable weed management: A review. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2021. Disponível em: <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-021-00217-8>. Acesso em: May, 25, 2022. doi: 10.1186/s40538-021-00217-8.

FAO (Food and Agriculture Organization). **Pesticides use and trade, 1990–2021**. FAOSTAT. Disponível em: [endereço FAOSTAT]. Acesso em: 2025.

FERREIRA, P. C.; GÓES, B. C.; PUTTI, F. F.; SILVA, A. B. Main concepts of agriculture 4.0. In: GÓES, B. C.; PUTTI, F. F.; SILVA, A. B. (Orgs.). **Sustainable Innovation in Agriculture**. New Xavantina: Pantanal, 2021.

JENSEN, T. A. *et al.* An automated site-specific fallow weed management system using unmanned aerial vehicles. GRDC Grains Research Update in Goondiwindi, 2020. Disponível em: <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2020/03/an-automated-site-specific-fallow-weed-management-system-using-unmanned-aerial-vehicles>. Acesso em: May, 25, 2022.

JOHNSON, G. A. *et al.* **Site specific weed management: Current and future directions**. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.) *The site specific management for agricultural systems*. Madison: ASA-CSSASSSA, 1997.

KHAN, S. *et al.* Deep learning-based identification system of weeds and crops in strawberry and pea fields for a precision agriculture sprayer. **Precision Agriculture**, v. 22, n. 6, p. 1711-1727, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09808-9>. Acesso em: June, 25, 2022. doi: 10.1007/s11119-021-09808-9.

KOH, P.; WICH, E. Dawn of drone ecology: Low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. **Tropical Conservation Science**, v. 5, n. 2, p. 121-132, 2012. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/194008291200500202>. Acesso em: Dec. 10, 2022. doi: 10.1177/194008291200500202.

MARINI, L. T. **Agri World**. n. 17. Oldmen, 2014, 103 p. Disponível em: https://issuu.com/revistaagriworld/docs/aw_17_763f4ff1e842f3/1. Acesso em: Ago, 25, 2022.

MATTIVI, P. *et al.* Can commercial low-cost drones and open-source GIS technologies be suitable for semi-automatic weed mapping for smart farming? A case study in NE Italy. **Remote sensing**, v. 13, n. 10, p. 1869, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/10/1869>. Acesso em: June, 25, 2022. doi: 10.3390/rs13101869.

NARDINI, E. Da guerra à paz, uma incursão pelo mundo dos drones. **Revista Eletrônica de Jornalismo Científico**. UNICAMP, 2016. Disponível em: <http://comciencia.br/comciencia//handler.php?section=8&edicao=124&id=1503>. Acesso em: Ago. 25, 2022.

NEW SCIENTIST. **Precision herbicide drones launch strikes on weeds**. 2013. Disponível em: <https://www.newscientist.com/article/dn23783-precision-herbicide-drones-launch-strikes-on-weeds/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

OLIVEIRA, A. J. et al. Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 64140-64149, 2020.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, p. 1-9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: May, 29, 2022. doi: 10.1136/bmj.n71.

PARANHOS, R.; FIGUEIREDO FILHO, D. B.; ROCHA, E. C.; SILVA JÚNIOR, J. A.; FREITAS, D. Uma introdução aos métodos mistos. **Sociologias**, v. 18, n. 42, mai.-ago. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/15174522-018004221>.

PIN KOH, P.; WICH, S. Dawn of drone ecology: Low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. **Tropical Conservation Science**, v. 5, n. 2, p. 121-132, 2012.

RIBEIRO, R. R. R.; SULAIMAN, S. N. O risco climático na agricultura do Brasil no contexto de ferramentas de busca (Big data). **Territorium Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança**, v. 27, n. 2, p. 21-27, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344197469_O_risco_climatico_na_agricultura_do_Brasil_no_contexto_de_ferramentas_de_busca_big_data. Acesso em: Oct, 28, 2022. doi:10.14195/1647-7723_27-2_2.

RODRIGUES, P. S. **Vant: de sua criação até os dias atuais**. 2020. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Aeronáuticas), Universidade do Sul de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/8389>. Acesso em: Jun. 11, 2022.

ROSA, T. S. Invasoras de difícil controle. **Avant Sementes e Drones**, 2021. Disponível em: <https://avantsementes.com.br/invasoras-de-dificil-controle/>. Acesso em: Apr. 11, 2022.

SABOIA, H. S. et al. Real-time selective spraying for viola rope control in soybean and cotton crops using deep learning. **Engineering in Agriculture**, v. 42, p. e20210163, 2022.

SANTOS, V. O. **Cartografias: latitudes, longitudes móveis**. 2018. 236 f. Tese (Doutorado em Artes Visuais) - Programa de Pós Graduação em Artes Visuais, Universidade Federal da Bahia. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/29412>. Acesso em: Nov, 15, 2022.

SHIRATSUCHI, L.S. *et al.* Mapping of the spatial distribution of *Panicum* infestation maximum during the corn crop harvest. **Planta Daninha**, v. 22, p. 269-274, 2004.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/pd/a/VptwxNDRMkFh7zSLzVCSD4x/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: Dez, 15, 2022. doi: 10.1590/S0100-83582004000200014.

SILVA, J. M. P.; CAVICHIOLI, F. A.. O uso da agricultura 4.0 como perspectiva do aumento da produtividade no campo. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, SP, v. 17, n. 2, p. 616–629, 2020. DOI: 10.31510/infa.v17i2.1068. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1068>. Acesso em: 18 ago. 2025.

SILVA, M.C. **A "Revolução Militar" do drone (2001 a 2018):** da "caçada" no Afeganistão às múltiplas frentes de batalha do Oriente Médio e à escalada da guerra entre as "grandes potências". 2018. 229f. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Relações Internacionais) Universidade Estadual da Paraíba. Acesso em: Ago, 12, 2022.

STAFFORD, J. V.; BENLLOCH, J. V. Machine-assisted detection of weeds and weed patches. In: Precision Agriculture, Warwick, 1997. **Proceedings**. Oxford: SCI, 1997. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302883224>. Acesso em: Nov. 27, 2022.

TESLA, N. **Method of and apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicles**. US Patent n. 613,809, 8 nov. 1898.

VILLAFUERTE, A. *et al.* Agriculture 4.0 - Study of disruptive innovation in Brazilian agribusiness. In: International Symposium on Technological Innovation, **ISTI/SIMTEC**, v. 9, n. 1, p. 150-162, 2018. Disponível em: <https://www.api.org.br/conferences/index.php/ISTI2018/ISTI2018/paper/viewFile/567/276>. Acesso em: Nov. 30, 2022. doi:10.7198/S2318-3403201800010018.

WEBSTER, A. AR.Drone coming to Android, gets new multiplayer games. **Gaming & Culture**. Disponível em: <https://arstechnica.com/gaming/2011/06/ardrone-coming-to-android-gets-new-multiplayer-games/>. Acesso em: Mar. 30, 2022.

ZAPAROLLI, D. Agricultura 4.0. **Revista Pesquisa**, v. 287, n. 1, p. 1-9, 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/agricultura-4-0/>. Acesso em: Sep. 30, 2022.

4 ARTIGO 2: EFICIÊNCIA DO USO DE DRONES NA PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS PARA CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS NA CULTURA DE SOJA

Este artigo aborda a eficiência do uso de drones na pulverização localizada de herbicidas na cultura da soja, destacando essa tecnologia como uma alternativa ao método convencional de pulverização em área total. A pulverização localizada de herbicidas (PLH) busca otimizar o uso dos defensivos agrícolas, aplicando-os somente onde há presença de plantas daninhas, na intenção de reduzir custos de produção, minimizar o impacto ambiental e contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis.

A pesquisa foi conduzida em campo experimental, comparando diferentes métodos de aplicação (pulverizador costal, drones de baixo e alto volume de calda) a fim de avaliar produtividade, massa de mil grãos, população de plantas e índices de vegetação.

4.1 INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha um papel fundamental na segurança alimentar e no suprimento de matéria-prima para diversas indústrias. No entanto, um dos principais desafios enfrentados pelos agricultores é o controle eficiente das plantas daninhas, que causam grandes prejuízos aos sistemas agrícolas ao competirem por recursos essenciais, como luz solar, nutrientes e água, com as culturas cultivadas (Embrapa, 2018). O controle químico através do uso de herbicidas é uma estratégia amplamente adotada em cultivos de larga escala, para reduzir o impacto das plantas daninhas e assegurar a produtividade dos sistemas de cultivo. No entanto, o uso excessivo e indiscriminado desses produtos, pode levar ao desenvolvimento de resistência química ao defensivo agrícola pela planta, como também, à contaminação do meio ambiente (Santos, 2020).

Além das tecnologias emergentes, como os drones, é relevante considerar como base comparativa métodos tradicionais como a pulverização localizada de herbicidas com pulverizador costal visual. Embora esse método dependa da percepção visual do operador, ele apresenta baixo custo de implementação, facilidade de operação e aplicabilidade em pequenas propriedades (Embrapa, 2018). Sua eficiência depende da correta identificação de plantas daninhas,

homogeneidade na aplicação e condições ambientais, podendo sofrer perdas por deriva, subdosagem ou cobertura desigual, ou, em situações ideais, alcançar bons níveis de controle desde que o operador seja habilitado e o ambiente adequado (Aslan *et al.*, 2022).

Nesse contexto, um dos principais herbicidas pós-emergente utilizados para controle de plantas daninhas é o glifosato (N-(fosfometil) glicina). Contudo, a ampla utilização de herbicidas, a base de glifosato, tem promovido a seleção de biótipos resistentes ao defensivo (Nodari, 2018), como o azevém (*Lolium multiflorum*), a buva (*Conyza bonariensis* e *C. canadensis*), o capim-amargoso (*Digitaria insularis*) e o leiteiro (*Euphorbia heterophylla*). Com isso, as “superplantas daninhas” (*superweeds*) se caracterizam pela resistência a altas doses de herbicidas, como também, a múltiplos herbicidas. Além disso, o uso amplo e indiscriminado de herbicidas, a base de glifosato, vem provocando efeitos nocivos e tóxicos, tanto em humanos como ao meio ambiente (Nodari; Hess, 2020). Dessa forma, estratégias de pulverização localizada para um controle mais seletivo e eficiente de plantas daninhas com menor impacto ambiental e à saúde humana, tem sido desenvolvida.

Neste sentido, a pulverização localizada de herbicidas (PLH) surge como avanço ao método convencional de pulverização que ocorre em área total. Uma das principais vantagens da PLH é a maior eficiência de uso dos produtos químicos por meio da aplicação direcional do herbicida somente nas áreas onde as plantas daninhas estão presentes. Com isso, a exposição das culturas de interesse econômico ao herbicida é menor, gerando menor custo de produção pelo uso racional do defensivo e menor contaminação ambiental. Em adição, a PLH pode ser aplicada em diferentes estágios de crescimento das plantas daninhas, ajustando-se às necessidades de controle em diferentes momentos do ciclo da cultura (Molin; Amaral; Colaço, 2015).

Os principais tipos de pulverizadores são os costais, terrestres e aéreos. Os pulverizadores costais são equipamentos utilizados nas costas do operador. Os pulverizadores terrestres são equipamentos acoplados em veículos terrestres, como tratores ou pulverizadores motorizados, que são equipados com barras de pulverização e podem variar em tamanho e configuração. Já os pulverizadores aéreos são equipamentos que utilizam aviões, helicópteros ou drones, Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), para realizar a aplicação do herbicida. Os drones podem ser equipados com tanques de herbicida e sistemas de pulverização para

realizar a aplicação sobre as plantas daninhas. Os drones de pulverização podem cobrir grandes áreas de cultivo de forma rápida e eficiente, além de áreas de difícil acesso, terrenos acidentados e encostas íngremes (Gasparetto; Bukzem, 2023).

Como a utilização de drones para pulverização localizada de herbicidas é uma abordagem recente em sistemas agrícolas, é importante avaliar a efetividade do seu uso, em comparação com outros métodos. Uma vez que, a pulverização com defensivos agrícolas visa uma aplicação mais eficiente, de baixo custo de produção e com menor impacto ambiental. Estudos mostram que a otimização das operações agrícolas tem impactos imediatos nas emissões de gás carbônico devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis nas operações de manejo da lavoura, por exemplo (Liu; Zhang; Bae, 2017). Drones são operados a partir de fontes renováveis (energia elétrica) e por isso podem ser aliados na produção agrícola de baixo carbono, com uso localizado e eficiente de defensivos e, assim, com menor custo de operação (Gonçalves, 2019).

Com base no exposto, a hipótese deste trabalho é que o pulverizador costal cobre uma área de aplicação menor em comparação com o drone, seja este utilizado com baixo ou alto volume de calda, ambos empregando o sistema PLH. Isso se deve ao fato de que os drones, tanto com alto quanto com baixo volume de calda, são capazes de cobrir quase a totalidade da área da parcela, graças à altura de pulverização entre 5 e 9 metros, resultando em uma área mínima de aplicação superior à do pulverizador costal.

Nesse sentido, o estudo teve como objetivo avaliar, por meio dos componentes de produção e índices de vegetação, qual equipamento de pulverização (costal, drone de baixo volume de calda, drone de alto volume de calda) apresentou maior eficiência na aplicação de herbicida sobre as plantas de soja.

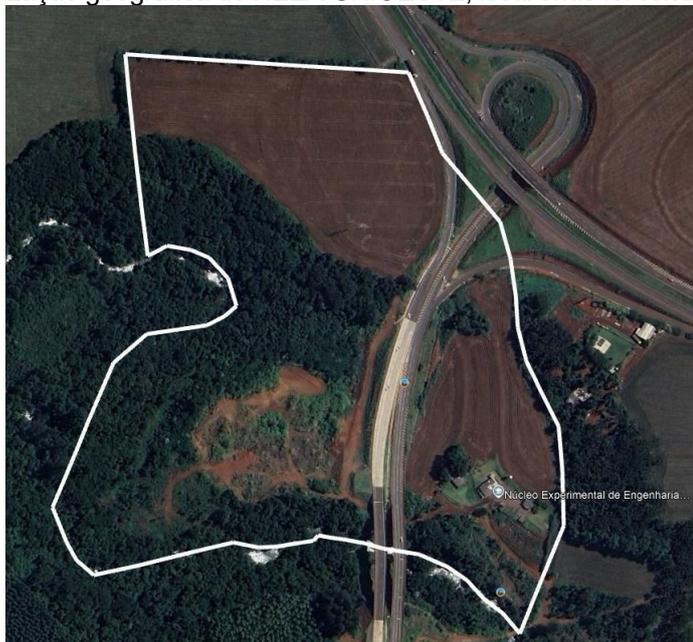
4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Caracterização da área

O estudo foi conduzido no Núcleo Experimental em Engenharia Agrícola (NEEA), pertencente à Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). A área de pesquisa está localizada na BR 467, km 16, sentido Cascavel – Toledo, no município de Cascavel, localizado no Terceiro Planalto do Estado do Paraná.

Geograficamente, o local está posicionado à 24°54'09" de latitude sul e 53°31'56" de longitude oeste, com uma altitude média de 619 metros (Figura 4).

Figura 4. Localização geográfica do NEEA-UNIOESTE, local onde foi conduzida a pesquisa



Fonte: Google Maps e Google Earth, 2023.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é enquadrado como Cfa – Clima subtropical mesotérmico superúmido. A precipitação média anual é de 1800 mm, concentrada principalmente no verão. Cascavel tem temperatura média anual de 20 °C, com umidade relativa do ar em torno de 75% (IAPAR, 2024). A região registra geadas com pouca frequência e não possui uma estação de seca definida.

A pesquisa foi realizada em parceria com a empresa AVant Sementes & Drones. Toda a tecnologia de aquisição, tratamento e manipulação de imagens, via sensoriamento remoto por drones (PLH-AVant), foi fornecida pela empresa parceira.

4.2.2 Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, constituído por 5 tratamentos: T0 (testemunha) e T1 a T4 - tratamentos com o uso de herbicidas. Todos os tratamentos possuíam quatro repetições, totalizando 20 parcelas experimentais (Tabela 5).

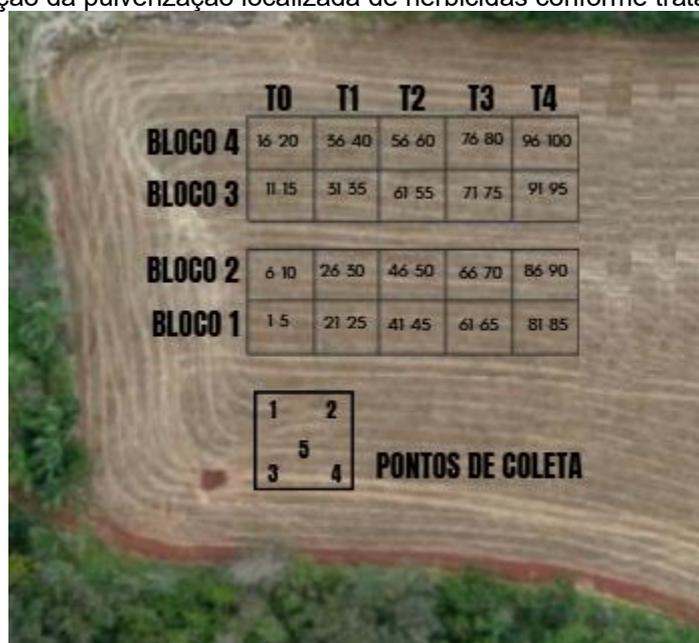
Tabela 5. Descrição dos tratamentos, volume de calda e métodos de aplicação dos pulverizadores para o controle de plantas daninhas. Cultura de Soja em Cascavel/PR

Tratamento	Manejo	Volume de calda (L/ha ⁻¹)	Método	Aplicação
T0	Testemunha	-	-	-
T1	Herbicida	8	Área total	Drone
T2	Herbicida	8	PLH	Drone
T3	Herbicida	30	PLH	Drone
T4	Herbicida	8	PLH	Costal

O tratamento T0 (testemunha): não houve aplicação de herbicida; T1: simulou o método tradicional de aplicação em área total (não localizada); T2: pulverização localizada com uso de drone com aplicação em baixo volume de calda (8 L/ha⁻¹); T3: pulverização localizada com uso de drone com aplicação em alto volume de calda (30 L/ha⁻¹), simulando o pulverizador terrestre e T4: pulverização localizada com equipamento costal.

Entre os tratamentos houve uma distância de dois metros. As parcelas de cada tratamento foram de 10m x 8m e uma distância de um metro de cada lado foi desconsiderado para aumentar a independência entre as amostras. Com isso, a área efetiva amostrada em cada parcela foi de 8m x 6m (48 m²). A área amostrada era homogênea quanto às condições climáticas e geomorfológicas (Figura 5).

Figura 5. Croqui da área experimental da Fazenda Experimental da UNIOESTE Cascavel para avaliação da pulverização localizada de herbicidas conforme tratamentos



4.2.3 Monitoramento das plantas daninhas e coleta de imagens

Antes da aplicação dos herbicidas, a área foi monitorada com drone, DJI Mavic 2 Pro portado por uma câmera da marca Hasselblad com sensor de 1" CMOS

de 20 milhões de pixels efetivos, campo de visão (FOV) de 77° e captura nas faixas do espectro magnético do visível ao olho humano (RGB), para mapeamento das plantas daninhas e estimativa da produtividade da cultura da soja (Figura 6).



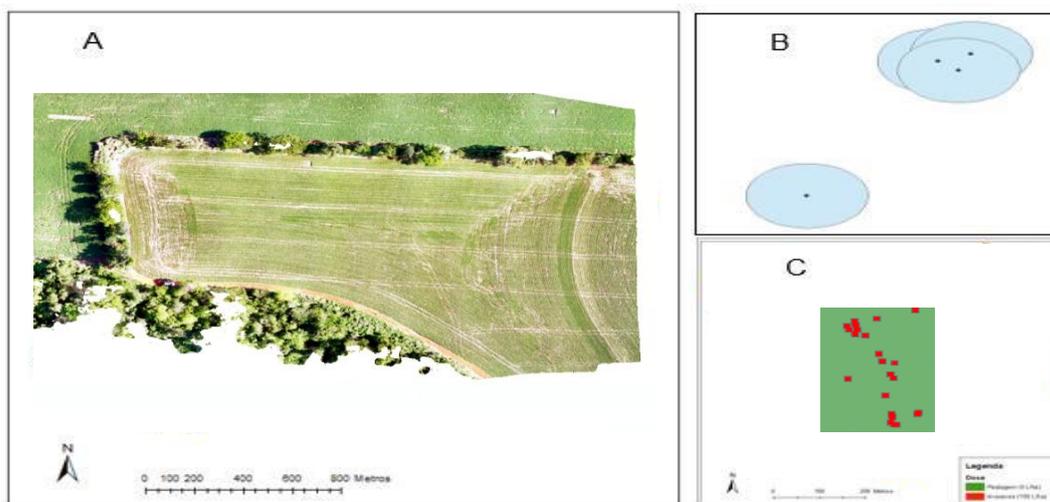
Em 19/11/2022 foi feito o último mapeamento dos pontos focais de plantas daninhas. Em 23/11/2022 foi realizada a aplicação do herbicida glifosato (Preciso Xk[®]) em combinação com cloransulam-metílico (Pacto[®]) e óleo mineral adjuvante (Assist[®] EC) nas parcelas T1 a T4.

As imagens foram coletadas com sobreposições longitudinais e laterais de 80%, resultando em uma resolução espacial de 0,04 m pixel⁻¹. O plano de voo foi criado no modo piloto automático com o aplicativo DroneDeploy[®]. O UAV foi configurado para cobrir a área experimental a uma velocidade de 3 m s⁻¹ e 100 m de altura.

Após o voo as imagens foram armazenadas em cartão memória e por meio dos *softwares* especializados foram associadas em um ortomosaico variando parâmetros para atingir a melhor qualidade da imagem, levando-se em conta o tempo de processamento.

Na Figura 7a tem-se o ortomosaico de uma área levantada de plantas daninhas, bem como a indicação de onde estão localizadas. Nesta etapa são identificadas e marcadas as plantas daninhas presentes na área (Figura 7b) para que a partir desta marcação possa ser gerado o mapa de aplicação localizada de herbicidas (Figura 7c).

Figura 7. Ortomosaico da imagem de campo de produção para levantamento de plantas daninhas (A e B) e Mapa de aplicação de herbicida localizado (C). Cultura de Soja em Cascavel/PR



4.2.4 Aplicação aérea

Para as aplicações aéreas foi utilizado a aeronave PELICANO da marca brasileira SkyDrones, com capacidade de carga de 10 L de calda. O PELICANO possui 4 bicos para tratamentos líquidos, as pontas de pulverização utilizadas foram, da marca Teejet Technologies, ponta de pulverização de Jato Cônico Vazio, modelo TXA8001VK.

O voo com a aeronave foi realizado com as condições climáticas favoráveis com ventos entre 4 e 8 km/h⁻¹ e umidade relativa do ar entre 65% e 72% e temperatura entre 25 e 29°C. A altura de voo foi de dois metros, faixa de aplicação reduzida e velocidade de voo de 15 km/h⁻¹, conforme o planejamento do voo.

4.2.5 Aplicação terrestre

Para as aplicações terrestres foi utilizado o pulverizador costal da marca Jacto, com capacidade de carga de 20 L de calda. O pulverizador costal possui bico de pulverização do tipo leque, da marca Teejet Technologies, modelo XR11002.

A operação foi realizada sob condições climáticas favoráveis, com ventos entre 4 e 8 km/h⁻¹ e, umidade relativa do ar variando entre 65% e 72% e temperatura entre 25 e 29°C. A altura de aplicação foi mantida a 50 cm acima do alvo, com uma faixa de aplicação adequada e ritmo constante conforme o planejamento da atividade.

4.2.6 Variáveis analisadas

Foram avaliadas as componentes produtivas, massa de 1000 grãos (g), população de plantas (m^2) e produtividade (kg/ha^{-1}).

A determinação da massa de mil grãos foi realizada a partir de coletas em cinco pontos representativos dentro de cada parcela experimental. Para a estimativa da produtividade, procedeu-se à colheita de duas linhas contendo dez plantas, sendo posteriormente determinada a área colhida e a produtividade por unidade de área. Após a coleta, as sementes foram devidamente limpas e submetidas à correção da umidade para 13%, conforme padrão recomendado para comparabilidade dos dados, a Regra para Análise de Sementes (RAS), documento normativo publicado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Brasil, 2009). Dessa forma, obteve-se a massa de mil grãos sob sementes limpas, que, juntamente com a densidade populacional e a produtividade, compõem as variáveis analisadas na Tabela 7.

Neste estudo, quatro índices de vegetação foram usados. Todos esses índices de vegetação foram calculados usando a calculadora raster QGIS. Cada equação foi demonstrada na Tabela 6.

O Normalized Green Red Difference Index (NGRDI), proposto por Tucker (1979), é utilizado como indicador do crescimento e desenvolvimento das culturas, a partir da diferença normalizada entre as bandas verde e vermelha. Esse índice tem sido amplamente empregado em estudos agrícolas por sua sensibilidade à biomassa verde e à atividade fotossintética das plantas (Hunt Júnior et al., 2005).

O Excess Green Index (ExG), desenvolvido por Woebbecke et al. (1995), tem como característica realçar a banda verde em imagens digitais, reduzindo a influência das bandas vermelha e azul. Considerado simples e eficiente, o ExG é bastante utilizado no mapeamento de plantas daninhas em imagens aéreas, favorecendo a aplicação localizada de herbicidas (Marques; Cunha; Lemes, 2021).

Já o Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), descrito por Gitelson et al. (2002), é um índice sensível à presença de pigmentos foliares, como a clorofila e os carotenoides, podendo indicar precocemente situações de estresse fisiológico nas culturas (Abrantes et al., 2021).

Por fim, o Green Leaf Index (GLI), estabelecido por Louhaichi, Borman e Johnson (2001), também está associado ao realce da banda verde, sendo útil para

a identificação e quantificação de áreas vegetadas em contraste com o solo exposto.

Tabela 6. Índices de vegetação calculados a partir de imagens multiespectrais

Índices	Equações	Referências
NGRDI	$\frac{(G - R)}{(G + R)}$	Hunt Júnior <i>et al.</i> (2005)
ExG	$\frac{(2XG) - R - B}{(R + G + B)}$	Woebbecke <i>et al.</i> (1995)
VARI	$\frac{(G - R)}{(G + R - B)}$	Gitelson <i>et al.</i> (2002)
GLI	$\frac{(2 \cdot G - R - B)}{(2 \cdot G + R + B)}$	Louhaichi, Borman; Johnson (2001)

4.2.7 Análises estatísticas

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para determinar a precisão na aplicação localizada de herbicidas entre os diferentes equipamentos (costal, drone de baixo volume de calda, drone de alto volume de calda). As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As comparações post-hoc com o teste de Tukey são fundamentais quando se tem mais de dois tratamentos, uma vez que a análise de variância (ANOVA) indica apenas a existência de diferenças estatísticas globais, mas não especifica entre quais grupos elas ocorrem. O teste de Tukey, portanto, possibilita identificar quais tratamentos diferem significativamente entre si, garantindo maior robustez e confiabilidade na interpretação dos resultados experimentais (Kronka, Banzatto, 1992). No presente estudo, essa análise estatística foi conduzida utilizando o *software* R Core.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao comparar a massa de 1000 grãos, a densidade populacional de plantas (m^2) e a produtividade (kg/ha^{-1}), não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos (Tabela 7).

Tabela 7. Massa de 1000 grãos (g), população de plantas (Kg/ha), e produtividade dos grãos em função dos tratamentos avaliados. Cultura de Soja em Cascavel/PR

Tratamentos	Massa de 1000 grãos (g)	População de plantas (kg/ha)	Produtividade (kg/ha ⁻¹)
T0	154,86 A	193.442,55 A	4.437,91 A
T1	154,87 A	217.061,83 A	4.985,06 A
T2	155,53 A	246.576,93 A	5.451,45 A
T3	151,84 A	223.334,55 A	4.588,66 A
T4	150,09 A	223.789,41 A	4.436,35 A
Média	153,44	220.841,05	4.779,89

Médias com letras iguais na coluna não indicam diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nota-se pela tabela que as diferentes tecnologias não exerceram influência significativa na produtividade da cultura. Do mesmo modo, em estudo de Bautista *et al.* (2024), o número de plantas de arroz e a biomassa seca das plantas não foram afetados pelos tratamentos com herbicidas. No mesmo sentido, Paul *et al.* (2023) relataram menor densidade de plantas daninhas e menor matéria seca após aplicações de herbicidas pré e pós-emergentes por drone. Resultados semelhantes foram obtidos para outras culturas de cereais, como trigo ou milho, com herbicidas pré e pós-emergentes aplicados com um drone (Pranaswi *et al.*, 2022, Supriya *et al.*, 2021). Além disso, o uso de pulverização de herbicidas por meio de drones pode resultar em menor quantidade de uso de água e menores necessidades de mão de obra, conforme afirmam Hiremath, Khatri; Jagtap (2024).

A pulverização pós-emergência precoce com UAVs leva a uma redução no uso de herbicidas sem afetar o rendimento da cultura, ao mesmo tempo em que aumenta a produção de biomassa de silagem (Castaldi; Pelosi; Pascucci, 2017). A integração do mapeamento UAV com pulverizadores introduz uma nova técnica que melhora a agregação espacial de plantas daninhas (manchas) e a utilidade do produto, maximizando assim a eficiência. A pulverização integrada UAV melhora a detecção e o controle de plantas daninhas, mitigando o desenvolvimento de resistência a herbicidas e promovendo melhor crescimento e produtividade das culturas (Meesaragandla *et al.*, 2024).

Com relação aos índices vegetativos Excess Green Vegetation Index (ExG) e Green Leaf Index (GLI), houve diferença significativa entre os tratamentos aplicados para as variáveis estudadas (Tabela 8). Os índices ExG e o GLI apresentam semelhança devido aos dois índices realçarem a banda verde na imagem processada, e diminuir os valores das bandas vermelha e azul. O ExG, segundo Woebbecke *et al.* (1995), é amplamente utilizado para a detecção automática de plantas daninhas em imagens digitais, enquanto o GLI, conforme

Louhaichi, Borman e Johnson (2001), mostra-se útil na quantificação da cobertura vegetal em contraste ao solo exposto. Esses resultados confirmam que a pulverização localizada favoreceu maior vigor vegetativo da soja, especialmente nos tratamentos T2 e T4, em comparação à aplicação em área total (T1).

Tabela 8. Análise dos índices de Vegetação em relação ao tipo de pulverização localizada. Cultura de Soja em Cascavel/PR

Tratamentos	NGRDI	ExG	VARI	GLI
T0	0,095 AB	85,665 A	0,167 AB	0,102 A
T1	0,090 B	83,542 A	0,159 B	0,101 A
T2	0,099 AB	84,880 A	0,176 A	0,101 A
T3	0,095 AB	84,482 A	0,169 AB	0,100 A
T4	0,100 A	84,817 A	0,178 A	0,103 A
Média	0,096	84,76	0,171	0,102

NGRDI: Normalized Green Red Difference Index; ExG: Excess Green Vegetation Index; VARI: Visible Atmospherically Resistant Index; GLI: Green Leaf Index. Médias com letras diferentes na coluna indicam diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Por outro lado, o tratamento T4 com aplicação localizada de 8 L/ha⁻¹ de herbicida com o uso do pulverizador costal apresentou Normalized Green Red Difference Index (NGRDI) superior (0,100) ao tratamento que aplicou herbicida na área total (T1) (0,090), indicando aumento da biomassa verde das plantas de soja neste tratamento.

VARI é um índice mais relacionado aos pigmentos de folhas (Ex.: clorofila e carotenóides) e pode ser utilizado como indicativo precoce de estresse da cultura, pois um dos sintomas é a redução do teor de clorofila. Esse índice, descrito por Gitelson *et al.* (2002), é menos sensível às condições atmosféricas, o que o torna mais confiável para monitoramento em larga escala. No presente estudo, observou-se que os tratamentos com pulverização localizada (T2, T3 e T4) apresentaram valores de VARI superiores ao método convencional em área total (T1), indicando menor estresse e maior eficiência no uso do herbicida. O monitoramento de culturas por índices de vegetação permite a avaliação de grandes áreas; além disso, o monitoramento de culturas permite uma melhor avaliação de áreas que sofreram com aplicações heterogêneas de herbicidas (Marques; Cunha; Lemes, 2021). Para facilitar isso, delinear áreas infestadas de plantas daninhas em imagens capturadas por RPA para aplicação direcionada de herbicidas surge como uma solução viável (Aslan *et al.* 2022).

Do mesmo modo, o índice Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) apresentou maior diferença nos tratamentos, em que, as aplicações foram feitas com drone e com a bomba costal utilizando 8 L/ha⁻¹ de herbicida. Para o VARI o

tratamento T1 também não foi favorável. Por serem índices com alta correlação com a banda verde, ambas tendem a realçar apenas a quantidade relativa de vegetação idealmente saudável e fotossinteticamente ativa (Abrantes *et al.*, 2021). Nesse sentido, os índices demonstraram que a pulverização localizada, sobretudo em baixo volume de calda, preservou melhor a capacidade fotossintética da cultura em comparação à pulverização em área total. Esse resultado está de acordo com Huang *et al.* (2016), que ressaltam a utilidade dos índices espectrais na detecção precoce de danos causados por herbicidas.

A exposição da planta ao herbicida pode causar alterações nos pigmentos da planta, como clorofila, carotenoides e antocianinas (Marques; Cunha; Lemes, 2021). Essas alterações interferem na resposta espectral das folhas da planta e podem ser usadas como indicadores de lesões (Huang *et al.*, 2016).

Desta forma, o PLH em baixo volume de calda independente do sistema (costal (T4) ou drone (T2)) apresentou índices superior ao sistema de área total (T1) o que indica que com menos herbicidas por área temos melhor controle de plantas daninhas e melhor desenvolvimento de plantas. Resultados semelhantes foram obtidos por Hiremath, Khatri e Jagtap (2024) onde avaliaram diferentes pulverizadores usados para aplicação de herbicidas pré-emergente e foi observado menor quantidade de plantas daninhas nas áreas que foi utilizado o pulverizador costal e o drone. O objetivo principal da tecnologia de pulverização é fornecer a quantidade correta de ingredientes ativos ao alvo desejado, maximizando a eficiência e a relação custo-benefício, ao mesmo tempo em que minimiza o impacto ambiental.

A aplicação de herbicida em área total não é adequada de acordo com os índices avaliados, pois pode interferir no crescimento da planta (NGRDI) e no processo fotossintético (VARI) devido a redução da clorofila. O NGRDI foi proposto por Tucker (1979), que descobriu que a diferença normalizada das bandas do verde e do vermelho, indicavam ser possível utilizá-la no indicador de crescimento e desenvolvimento.

Os dados obtidos indicam que o uso do PLH apresenta desempenho semelhante ao da aplicação em área total em termos de produtividade, massa de mil grãos e população de plantas, já que não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos (Tabela 7). Por outro lado, a análise dos índices de vegetação revelou resultados superiores para os tratamentos com pulverização localizada, evidenciando maior vigor vegetativo e menor estresse das plantas em comparação à pulverização convencional em

área total. Além disso, essa tecnologia oferece benefícios como a redução dos custos com herbicidas, combustível e desgaste de máquinas, além de favorecer o desenvolvimento das plantas, já que a aplicação de herbicidas em toda a área pode causar fitotoxicidade nas plantas de soja. Pesquisas recentes destacam a capacidade dos drones de proporcionar uma cobertura espacial aprimorada, reduzir o tempo operacional e minimizar a compactação do solo durante a aplicação aérea de agroquímicos (Klauser; Pauschinger, 2021; Sánchez-Fernández *et al.*, 2023).

Além disso, o uso de IVs tem o potencial de substituir a avaliação visual de danos causados por herbicidas, oferecendo uma alternativa mais rápida e econômica (Marques; Cunha; Lemes, 2021). Estudos indicam que os danos à cultura provocados pelo glifosato podem ser detectados em até 24 horas após o tratamento da soja (Huang *et al.*, 2012).

A eficiência operacional dos drones é particularmente destacável, resultando em uma redução de 99% (0,34 h) no tempo de aplicação de herbicida por hectare, em comparação com pulverizadores costais e de lança (Hiremath; Khatri; Jagtap, 2024). Além disso, o uso de drones reduziu em 85% a necessidade de mão de obra em relação a capina manual, enquanto pulverizadores costais demonstraram economia de mão de obra de 35,7% (Hiremath; Khatri; Jagtap, 2024). Esses resultados evidenciam o papel fundamental da pulverização por drones na revolução das práticas agrícolas, contribuindo para o aumento da eficiência e o avanço de metodologias sustentáveis (Ansari pour *et al.*, 2023; Trappey *et al.*, 2023; Vázquez-Carmona *et al.*, 2022).

A integração da tecnologia de drones mostra-se promissora não apenas para otimizar a distribuição de agroquímicos, mas também para mitigar as limitações dos sistemas tradicionais de pulverização, especialmente em terrenos desafiadores e campos remotos (Hiremath; Khatri; Jagtap, 2024).

Os drones oferecem vantagens distintas, alinhando-se aos conceitos modernos de PLH, pois permitem imagens de campo autônomas e execução de missões pré-programadas. Quando outro drone é utilizado para a fase de pulverização, ele também conduz missões pilotadas de forma autônoma com base no mapa PLH gerado anteriormente. A combinação desses dois drones, um para imagens e outro para pulverização, eleva o sistema PLH a um sistema de voo totalmente autônomo, eliminando a necessidade de um operador a bordo de qualquer máquina em qualquer ponto do processo.

Esta abordagem parece minimizar o uso de insumos, aplica-se a áreas com níveis de acessibilidade variáveis, melhora o controle de ervas daninhas, reduz a fitotoxicidade das culturas, aumenta a produtividade média e resulta em produtos agrícolas industriais ou de consumo direto de maior qualidade.

4.4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que o uso de Pulverização Localizada de Herbicidas (PLH) com baixo volume de calda (T2 e T4) reduziu significativamente o consumo de herbicidas e de água, sem comprometer a produtividade, a população de plantas ou a massa de mil grãos. Essa abordagem se mostra recomendada por aliar eficiência agrônômica à economia de insumos, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis.

A aplicação localizada, seja realizada por drones ou por pulverizador costal visual, demonstrou eficiência equivalente à pulverização total, evidenciando que métodos seletivos podem alcançar o mesmo nível de controle de plantas daninhas, com menor impacto ambiental e custos reduzidos.

O uso de drones na pulverização localizada apresenta vantagens adicionais, como a possibilidade de aplicações mais precisas, maior uniformidade na distribuição, redução de sobreposição e otimização do uso de insumos. Além disso, essa tecnologia contribui para a diminuição dos custos operacionais e da exposição de operadores a agroquímicos, ao mesmo tempo em que minimiza impactos ambientais, reforçando o papel da agricultura de precisão como ferramenta essencial para a sustentabilidade agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, T. C. et al. Assessing the effects of dicamba and 2, 4 Dichlorophenoxyacetic acid (2, 4D) on soybean through vegetation indices derived from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based RGB imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 7, p. 2740-2758, 2021. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832283>
- ANSARIPOUR, M. et al. Characteristics of a tip-vortex generated by a single rotor used in agricultural spraying drone. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 149, n. 1, p. 110995, 2023. <https://10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2023.110995>
- ASLAN, M. F. et al. A comprehensive survey of the recent studies with UAV for precision agriculture in open fields and greenhouses. **Applied Sciences**, v. 12, n. 1, p. 1–29, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12031047>
- BAUTISTA, A. S. et al. Remote Sensing Evaluation Drone Herbicide Application Effectiveness for Controlling Echinochloa spp. **Sensors**, v. 24, n. 3, p. 804, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24030804>
- CASTALDI, F.; PELOSI, F.; PASCUCCI, S. R. Assessing the potential of images from unmanned aerial vehicles (UAV) to support herbicide patch spraying in maize. **Precision Agriculture**, v. 18 n. 1, p. 76-94, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9468-3>
- EMBRAPA. **Sobre o tema plantas daninhas**. Portal Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-plantas-daninhas/sobre-o-tema>. Acesso em: 08 de junho de 2024.
- GASPARETTO, T. R.; BUKZEM, S. C. Implementação de aeronaves remotamente pilotadas na agricultura: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, v. 3, n. 3, p. 125–150, 2023.
- GITELSON, A. A. et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76–87, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- GOOGLE EARTH. 2023. Disponível em: <http://earth.google.com>. Acesso em: 03 ago. 2023.
- GOOGLE MAPS. 2023. Disponível em: <https://www.google.com/maps/dir/>. Acesso em: 03 ago. 2023.
- GONÇALVES, F. **Drones e inteligência artificial impulsionam uso de energias renováveis**. Agência Canal Energia. Rio de Janeiro: UFRJ, 2019. Disponível em: https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/41_goncalves_11_01. Acesso em: 03 ago. 2023.
- HIREMATH, C.; KHATRI, N.; JAGTAP, M. P. Comparative studies of knapsack, boom, and drone sprayers for weed management in soybean (*Glycine max L.*). **Environmental Research**, v. 240, n. 1, p. 117480, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117480>

HUANG, Y. et al. Detecção hiperespectral de plantas in-situ para detecção precoce de danos à soja causados por dicamba. **Biosystems Engineering**, v. 149, n. 1, p. 51–59, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.013>

HUANG, Y. et al. Early detection of soybean plant damage caused by glyphosate by measuring chlorophyll reflectance and fluorescence. **Journal Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 117–124, 2012. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v4n5p117>

HUNT JÚNIOR, E. R. et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 359-378, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-005-2324-5>

IAPAR. **Cartas Climáticas do Paraná**. Disponível em: <http://www.iapar.br/>. Acesso em: 01 jun. 2024.

KLAUSER, F.; PAUSCHINGER, D. Entrepreneurs of the air: sprayer drones as mediators of volumetric agriculture. **Journal Rural Studies**, v. 84, n. 1, p. 55-62, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2021.02.016>

KRONKA, S. N.; BANZATTO, D. A. **Experimentação agrícola**. Jaboticabal: FUNEP, 1992.

LIU, X.; ZHANG, S.; BAE, J. The impact of renewable energy and agriculture on carbon dioxide emissions: Investigating the environmental Kuznets curve in four selected ASEAN countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, n. 1, p. 1239-1247, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.086>

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. Spatially located platform and antenna Photography to document the impacts of grazing on wheat. **Geocarto Internacional**, v. 16, n. 1, p. 65–70, 2001. <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>

MARQUES, M. G.; CUNHA, J. P. A. R.; LEMES, E. M. Dicamba injury on soybean assessed visually and with spectral vegetation index. **AgriEngineering**, v. 3, n. 2, p. 240-250, 2021. <https://doi.org/10.3390/agriengineering3020016>

MEESARAGANDLA, S. et al. Herbicide spraying and weed identification using drone technology in modern farms: A comprehensive review. **Results in Engineering**, v. 21, n. 1, p. 101870, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101870>

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de Precisão**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

NODARI, R. O. Plantas transgênicas: da falta de precisão à falta de eficácia. In: HESS, S. C. (organizadora). **Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil**. São Paulo: Outras Expressões, 2018. p. 107-128.

NODARI, R. O.; HESS, S. C. Campeão de vendas, cientificamente o Glifosato é um agrotóxico perigoso. **Extensio: Revista Eletrônica de Extensão**, v. 17, n. 35, p. 2-18, 2020. <https://doi.org/10.3390/agriengineering3020016>

PAUL, R. A. I. et al. Drone-based herbicide application for energy saving, higher weed control and economics in direct-seeded rice (*Oryza sativa*). **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 93, n. 1, p. 704–709, 2023. <https://doi.org/10.56093/ijas.v93i7.137859>

PRANASWI, D. et al. Weed control efficiency with herbicide application by the combination of Drone and Knapsack sprayer in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Pharma Innovation**, v. 11, n. 1, p. 741–744, 2022.

SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, L. et al. DRIFT reduction in orchards through the use of an autonomous UAV system. **Computers Electronics in Agriculture**, v. 211, v. 1, p. 107981, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107981>

SANTOS, M. S. Rotação de mecanismos de agroquímicos. 2020. **Mais Soja**. Disponível em: <http://www.maissoja.com.br>. Acesso em: 03 ago. 2023.

Software R Core. **R**: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

SUPRIYA, C. et al. Optimization of Spray Fluid for Herbicide Application for Drones in Irrigated Maize (*Zea mays* L.). **International Journal Plant & Soil Science**, v. 33, n. 1, p. 137–145, 2021. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i2130665>

TRAPPEY, A. J. C. et al. A comprehensive analysis of global patent landscape for recent R&D in agricultural drone Technologies. **World Patent Inf.**, v. 74, n. 1, p. 102216, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.WPI.2023.102216>

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing Environment**, v. 8, n. 1, p. 127–150, 1979. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

VÁZQUEZ-CARMONA, E. V. et al. Coverage path planning for spraying drones. **Computer Industrial Engineering**, v. 168, n. 1, p. 108125, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2022.108125>

WOEBBECKE, D. M. et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 1, p. 259-269, 1995. <https://doi.org/10.13031/2013.27838>

5 ARTIGO 3: EFEITO DA COMBINAÇÃO DE BIOESTIMULANTE COM HERBICIDA NO CONTROLE LOCALIZADO DE PLANTAS DANINHAS PULVERIZADAS COM DRONES

5.1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola do Brasil é uma das mais bem sucedidas mundialmente, e o país ocupa a terceira colocação no ranking de exportação (CNA, 2024). Este cenário é validado pelo uso bem-sucedido de defensivos agrícolas, e o Brasil, neste caso, ocupa uma posição de destaque como maior mercado mundial de defensivos agrícolas (FAO, 2021).

São diversas as variáveis que contribuem para a ocorrência de plantas daninhas nas atividades agrícolas, tais como, a introdução de sementes em locais sem inimigos naturais, métodos de armazenagem, mudanças genéticas, desequilíbrios ecológicos etc. As plantas daninhas destacam-se nesse contexto, uma vez que competem com as culturas por nutrientes, água e luz, reduzindo a produtividade e a qualidade dos cultivos (Dayan *et al.*, 2015).

O controle das plantas daninhas é feito por meio de práticas como o uso de herbicidas químicos. Os produtores frequentemente preferem o uso de herbicidas ao invés da diversificação dos sistemas de produção devido a fatores relacionados a custo, simplicidade operacional e retorno econômico no curto prazo (Embrapa Soja, 2017).

Ainda, muitos produtores estão acostumados aos modelos de monocultura com a aplicação de herbicidas como um método de manejo de ervas daninhas. A mudança para sistemas diversificados, como aqueles explorados a partir do Manejo Integrado de Pragas (MIP), apresenta-se como arriscada para aqueles que já possuem sistemas de produção bem estabelecidos e eficientes, criando uma barreira para a adoção da diversificação (Embrapa Soja, 2017).

Se por um lado, a simplificação dos modelos de produção facilita a rotina operacional nas propriedades, por outro, pode promover, a longo prazo, a degradação do solo e o aumento dos problemas fitossanitários, como a infestação de plantas daninhas resistentes a herbicidas. Nas últimas duas décadas, a cultura da soja experimentou aumentos expressivos de área e produtividade, elevando o Brasil ao posto de maior produtor mundial de soja (CNA, 2024).

De forma geral, a cultura foi inserida em modelos de produção pouco

diversificados, como, por exemplo, sucessões de soja/milho segunda safra e soja/trigo, por vários anos consecutivos, o que aumenta a demanda por produtos químicos. O glifosato é um dos mais utilizados devido à sua eficácia e baixo custo (Duke, 2018). É conhecido por sua ação inibidora da enzima EPSPS (5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase), que está envolvida na síntese de aminoácidos aromáticos, resultando, dentre outros efeitos, na necrose da planta.

O glifosato é um herbicida não seletivo amplamente utilizado na dessecação de áreas para a semeadura, pois possui ação sistêmica e é usado para o controle de plantas daninhas anuais e perenes e na dessecação de culturas de coberturas, devido ao seu amplo espectro de controle e baixa toxicidade a organismos não alvos (Forte *et al.*, 2017).

A soja geneticamente modificada para ser resistente ao glifosato (soja RR) foi introduzida no Brasil em 2005. Essa tecnologia teve rápida aceitação, pois permitia o controle de plantas daninhas com uma única aplicação de glifosato. No entanto, antes mesmo da aprovação oficial, a soja RR era cultivada no sul do Brasil sem regulamentação adequada, o que implicava o uso indiscriminado de glifosato (Vargas *et al.*, 2016). Desta maneira, apesar da ação benéfica do glifosato, o uso recorrente e em larga escala, sem práticas de manejo adequadas, gerou uma forte pressão seletiva, favorecendo os biótipos resistentes ao glifosato (Adegas *et al.*, 2022).

A resistência está disseminada em várias regiões do Brasil, afetando grandes áreas cultivadas com plantas como a buva (*Conyza sp.*), azevém (*Lolium multiflorum*) e capim-amargoso (*Digitaria insularis*). Essa resistência causa aumento nos custos de manejo, podendo multiplicar por até cinco vezes em áreas com resistência múltipla, como o capim-amargoso. Além dos custos diretos com herbicidas alternativos, a competição das plantas daninhas reduz a produtividade das lavouras, impactando a rentabilidade dos produtores (Vargas *et al.*, 2016).

O impacto do uso indiscriminado de glifosato em cultivos, além de afetar negativamente a produção agrícola, também leva à fitotoxicidade do cultivo, como a soja, que diminui seu crescimento para metabolizar o herbicida (Adegas *et al.*, 2022).

Produtores e pesquisadores têm buscado alternativas para o controle de plantas daninhas resistentes ao glifosato com concomitante redução da fitotoxicidade do herbicida aos cultivos. Substâncias naturais ou sintéticas, classificadas como reguladores vegetais, podem ser aplicadas diretamente nas plantas (em folhas, frutos e sementes) para modificar processos vitais e estruturais. Essas alterações têm como objetivo aumentar a produção, aprimorar a qualidade e facilitar a colheita. Com o uso

dessas substâncias, é possível influenciar diversos processos, como germinação, enraizamento, floração, frutificação e senescência (Ribeiro, 2019). Nesse contexto, o uso de bioestimulantes combinados com herbicidas surge como uma estratégia eficaz e sustentável, visando melhorar a eficiência do controle de plantas daninhas, reduzindo a dependência exclusiva do herbicida e minimizando seu impacto no ambiente.

Os bioestimulantes são uma alternativa significativa às práticas agrícolas convencionais, pois podem diminuir a quantidade de fertilizantes e defensivos sintéticos. São relevantes durante o desenvolvimento das plantas, atuando na regulação hormonal, possibilitando que as plantas alcancem todo o seu potencial genético. Essas substâncias, de origem natural ou sintética, quando aplicadas nas plantas, promovem o crescimento, influenciam a homeostasia hormonal das plantas e fortalecem as respostas de defesa contra estresses ambientais e biológicos. Além de estimular o crescimento e o desenvolvimento das plantas, os bioestimulantes aumentam a eficiência na absorção de nutrientes e podem atuar no solo, contribuindo para melhorar sua estrutura e funcionalidade, o que favorece a resposta das plantas (Calvo *et al.*, 2014).

A combinação de bioestimulantes com herbicidas pode potencializar os efeitos dos herbicidas através da melhora da adesão pelas folhas, absorção e a translocação do glifosato, resultando em maior eficácia no controle de plantas daninhas (López-Rodríguez *et al.*, 2019). Os bioestimulantes podem ativar e estimular as enzimas responsáveis pelo metabolismo do glifosato, resultando em uma maior velocidade de metabolização do herbicida dentro das plantas daninhas, aumentando a eficácia do controle pelo herbicida. Os bioestimulantes também podem aumentar a resposta de defesa das plantas contra o estresse causado pelo glifosato através do aumento da produção de compostos antioxidantes, da ativação de mecanismos de reparo de danos celulares e da estimulação da produção de fitoalexinas, substâncias de defesa naturais das plantas. Como resultado, as plantas daninhas podem enfrentar um estresse adicional ao serem expostas ao glifosato, o que pode levar a uma maior eficácia no seu controle (Kaushal *et al.*, 2017).

Entretanto, a literatura também aponta que essas interações não são uniformes. Pesquisas recentes demonstraram que certos bioestimulantes podem exercer efeito sinérgico, como no caso da associação de glifosato com brassinosteróides em milho, resultando em maior massa seca e vigor das plantas (Tandathu *et al.*, 2024). Por outro lado, outros estudos identificaram efeitos

antagônicos, como a combinação de glifosato com diquat, que reduziu a eficácia herbicida no controle de plantas daninhas (Sousa *et al.*, 2023). De modo semelhante, bioestimulantes também podem atuar como “*safeners*”, atenuando o impacto fitotóxico do herbicida sobre a cultura, mas ao mesmo tempo reduzindo sua ação sobre as plantas alvo (Katsenios *et al.*, 2023). Esses resultados reforçam a necessidade de análises específicas para cada formulação, espécie alvo e condição ambiental, pois a mesma associação pode gerar ganhos ou perdas de eficiência.

Sugere-se, ainda, que certos bioestimulantes podem, por meio de mecanismos químicos específicos, interagir diretamente com o glifosato tornando-o mais eficiente na inibição da enzima EPSPS, potencializando sua ação herbicida. Aponta-se também para um efeito positivo do uso de bioestimulantes na recuperação da fitotoxicidade do cultivo causada pela exposição ao glifosato favorecendo a alteração de processos vitais e o estímulo do desenvolvimento das raízes, e alterar, inibir ou modificar processos bioquímicos, causando diferentes respostas na mitigação desses efeitos fitotóxicos (Pires, 2017). A pesquisa de Bertolin *et al.* (2010), por exemplo, verificou que o bioestimulante aumentou o número de vagens por planta de soja e na produtividade dos grãos em aplicação tanto via semente quanto foliar. Deste modo, a ação do bioestimulante apresenta-se como um complemento na manutenção fisiológica, importante em condições ambientais de seca e geada, ou naquelas relacionadas a plantas daninhas e doenças.

Embora já existam estudos realizados com o uso de bioestimulantes em diversas culturas, os resultados obtidos até o momento têm mostrado divergências, o que torna indispensável a realização de novas pesquisas para uma avaliação mais precisa dos efeitos desses produtos na agricultura, considerando que seu uso tem se difundido em várias regiões do mundo (Costa, 2010).

Nos últimos anos, alguns estudos foram conduzidos utilizando bioestimulantes em culturas amplas, incluindo soja, arroz, milho e feijão (Castro; Vieira, 2001; Vieira; Castro, 2005). Esses estudos têm indicado ganhos de produtividade, atribuídos ao fortalecimento do sistema radicular na fase de estabelecimento da cultura após a germinação e ao aumento do pegamento de vagens nas culturas da soja e do feijão.

Alguns desses estudos evidenciaram que os bioestimulantes podem influenciar positivamente a germinação e o acúmulo de biomassa seca nas sementes de soja, além de promover o crescimento em altura das plantas (Klahold *et al.*, 2008; Ávila *et al.*, 2008; Campos *et al.*, 2008). No entanto, a pesquisa de Ferreira *et al.* (2007) indica que os bioestimulantes podem não beneficiar, e até reduzir, a absorção de nutrientes

pelas plantas, sugerindo que suas respostas variam conforme fatores como a espécie vegetal e a composição das substâncias húmicas dos produtos utilizados.

A pulverização localizada de herbicidas (PLH), com imageamento remoto realizado por drone de baixo custo, representa um método inovador na agricultura. O uso de drones com sensoriamento remoto possibilita uma análise detalhada de áreas agrícolas, permitindo um monitoramento eficiente da qualidade das culturas de campo. Essa tecnologia, que inclui o uso de imagens aéreas, satélites e outras formas de captura de dados, fornece informações amplas sobre as condições da plantação. A partir das imagens obtidas, é possível realizar diagnósticos precisos, identificando danos e necessidades específicas de cada área.

No contexto da pulverização localizada, tem-se o objetivo de aplicar a quantidade exata do ingrediente ativo sobre o alvo, de forma eficiente e econômica, sem causar impacto ao meio ambiente (Durigan, 1989). Johnson *et al.* (1997), Stafford e Benlloch (1997) e Antuniassi (1998) descrevem três tecnologias para realizar a aplicação localizada de herbicidas: 1. O método de detecção imediata utiliza câmeras e sensores que identificam plantas daninhas em tempo real, permitindo que o herbicida seja aplicado de maneira pontual e apenas nas áreas necessárias por drones. É uma tecnologia de alta precisão, mas que demanda constante calibração para manter a eficácia (Johnson *et al.*, 1997); 2. O mapeamento prévio de plantas daninhas, onde o mapeamento das áreas infestadas é realizado antes da aplicação do herbicida, permitindo ajustar a dosagem conforme a localização específica de cada área infestada. Esse método exige um sistema de posicionamento para assegurar que a aplicação ocorra precisamente nos locais indicados pelo mapa (Stafford; Benlloch, 1997); 3. Aplicação baseada na variabilidade do solo onde, nesse caso, a dosagem de herbicidas é ajustada de acordo com a variabilidade do solo mapeada previamente. Essa variação permite otimizar o uso do produto ao adaptar a aplicação às condições edáficas específicas de cada área, formando um mapa de prescrição que orienta o processo (Antuniassi, 1998).

Em resumo, os efeitos da combinação de bioestimulantes com herbicidas, ainda não são claros e é importante considerar cuidadosamente a aplicação conjunta desses compostos e avaliar seus efeitos na eficácia do controle de plantas daninhas e impactos indiretos na produtividade da soja, bem como a eficiência dos métodos de aplicação que podem facilitar o processo.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar o efeito da pulverização localizada de biostimulantes com o herbicida glifosato na mortalidade

de plantas daninhas e na produtividade da cultura de soja.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em campo, na Fazenda do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), em Cascavel, Paraná, para avaliação da combinação de bioestimulante à base de complexo e ácidos orgânicos fúlvicos e húmicos com herbicida glifosato para o controle de plantas daninhas e sua influência na produtividade da cultura de soja (Kg/ha) através de pulverização localizada com drones.

A pesquisa ocorreu em parceria com a empresa AVant Sementes & Drones, bem como toda a tecnologia de aquisição, tratamento e manipulação de imagens via sensoriamento remoto por drones (PLH AVant).

Para a semeadura da soja, foi utilizada a cultivar Brasmax Zeus IPRO. O herbicida utilizado para as aplicações de manejo foi o (Preciso Xk®) em combinação com cloransulam-metílico (Pacto®) e óleo mineral adjuvante (Assist® EC). O bioestimulante orgânico Estrella de la Mañana, Horesmain S.A foi desenvolvido e disponibilizado pelo professor Juan López Herrera, da Universidade Politécnica de Madrid.

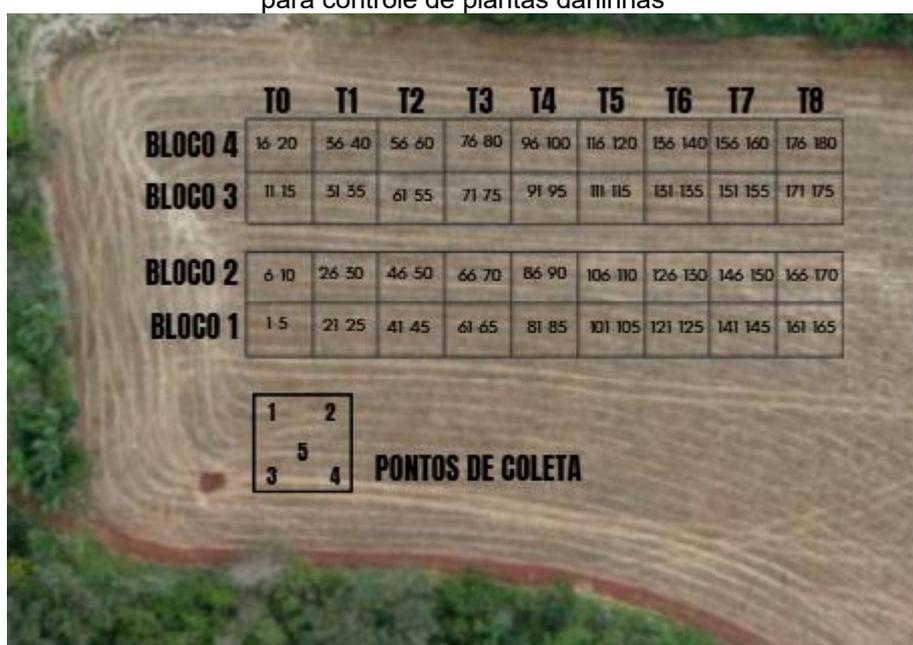
O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (Soil Survey Staff, 2014), de textura argilosa, com boa capacidade de retenção de água, aeração e permeabilidade (Embrapa Florestas, 2018).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é categorizado como Clima subtropical mesotérmico superúmido (Cfa). Há precipitação média anual de 1800 mm, principalmente no verão. A temperatura média anual de Cascavel é de 20 °C, e a umidade relativa do ar está em torno de 75% (IAPAR, 2024). A região registra geadas com pouca frequência e não possui uma estação de seca definida.

O experimento analisado seguiu um desenho experimental de blocos casualizados (DBC), onde os tratamentos foram aleatoriamente atribuídos em uma área de cultivo de soja, com o objetivo de controlar a variação proveniente de fatores fora do controle (como a variação entre blocos). Os tratamentos (T0 a T8) determinaram as diferentes condições experimentais testadas em cada repetição. Desta forma, foram executados 8 tratamentos (T1 a T8) e uma parcela controle (T0), em que nenhum manejo foi executado. Destes tratamentos, seis parcelas (T3 a T8) foram designadas para avaliar a combinação entre bioestimulantes e herbicida à base

de glifosato no controle de plantas daninhas e na produtividade da cultura de soja. Para avaliação, 5 pontos de coleta foram determinados. As parcelas experimentais possuíam a dimensão de 8x10 metros, sendo a área útil delimitada pelo descarte de 1 metro em cada lado para evitar interferências (Figura 8). Todas as aplicações foram realizadas de forma localizada, com exceção do tratamento controle (T0), onde nenhum manejo foi executado.

Figura 8. Croqui da área experimental da Fazenda Experimental da UNIOESTE Cascavel para avaliação da combinação entre bioestimulante e herbicida a base de glifosato pulverizado por drone para controle de plantas daninhas



O manejo diferenciou-se, além do tratamento, em relação ao volume de calda, que variou entre 8 e 30 L/ha, do volume de herbicida, com valores entre 1, 0,8 e 0,7 L/ha, e bioestimulante aplicados (Tabela 9).

Tabela 9. Descrição dos tratamentos, dose e volume de calda.

Tratamento	Manejo	Dose (L/ha ⁻¹)	Volume calda (L/ha ⁻¹)
T0	Testemunha	-	-
T1	Herbicida	-	8
T2	Herbicida	-	30
T3	Herbicida + bioestimulante	1,0	8
T4	Herbicida + bioestimulante	1,0	30
T5	Herbicida + bioestimulante	0,8	8
T6	Herbicida + bioestimulante	0,8	30
T7	Herbicida + bioestimulante	0,7	8
T8	Herbicida + bioestimulante	0,7	30

As dosagens foram de 1,0 kg/ha para glifosato, 0,05 kg/ha para Pacto® e 0,5 L/ha para Assist® EC. Software: R Core 2022.

Antes da aplicação, a área foi monitorada por drone para mapeamento das plantas daninhas e estimativa da produtividade da cultura da soja. DJI Mavic 2 Pro portado por uma câmera da marca Hasselblad com sensor de 1" CMOS de 20 milhões de pixels efetivos, campo de visão (FOV) de 77° e captura nas faixas do espectro magnético do visível ao olho humano (RGB).

As aplicações de herbicida + bioestimulante foram realizadas por meio da aeronave PELICANO, da marca brasileira SkyDrones, com capacidade de carga de 30 L de calda. A aeronave possui 4 bicos com pontas de pulverização de Jato Cônico Vazio, modelo TXA8001VK, da marca Teejet Technologies.

A aplicação de herbicida com o sistema de PLH foi realizada somente no controle pós-emergente, aos 20 dias após a semeadura. Posteriormente, foram realizados monitoramentos periódicos com drones a cada 10 dias, mas não foi necessária uma nova aplicação.

Foi aplicado o teste de análise de variância (ANOVA) para determinar a eficiência da combinação de bioestimulante com herbicida glifosato nas áreas com este manejo (T3 a T8), onde T0 é a hipótese nula (H0). O teste de Dunnett foi utilizado para comparar os grupos experimentais, a 5% de significância.

O teste de Dunnett, por sua vez, é uma técnica estatística utilizada para comparar múltiplos grupos experimentais com um grupo de controle, com o objetivo de determinar se há diferenças significativas entre eles. Este teste é particularmente útil em experimentos onde há um grupo de controle que não recebe o tratamento ou a intervenção, e vários outros grupos que são tratados de maneira diferente. Ele permite realizar comparações múltiplas de forma a controlar o erro do Tipo I (falsos positivos), o que é comum em análises com múltiplas comparações (Kronka, 1992).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 10 apresenta os resultados descritivos acerca da produtividade dos grãos de soja coletados para o experimento.

Tabela 10. Análise descritiva da produtividade dos grãos de soja (kg/ha^{-1}) (média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo) dos tratamentos de todos os blocos.

Tratamento	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Tratamento 0	4815	4711	757	3371	6204
Tratamento 1	4592	4677	462	3689	5349
Tratamento 2	4722	4674	722	3080	5781
Tratamento 3	4816	4604	1143	3099	7374
Tratamento 4	4966	4901	846	3385	6731
Tratamento 5	4837	4968	727	3656	6211
Tratamento 6	4972	4834	495	4173	5804
Tratamento 7	4224	4116	733	2983	6029
Tratamento 8	4713	4789	554	3581	5486

Software: R Core 2022.

Os resultados baseados no teste F (ANOVA) indicam que, com base no nível de significância determinado, não há evidências suficientes para sugerir que algum tratamento seja superior aos outros em termos de produtividade, ou seja, sugere que as mudanças nos tratamentos testados não levaram a resultados significativos para a variável de interesse.

Tabela 11. Resultado do teste de variância (ANOVA)

Fator	*g.l.	Valor-p
Tratamento	8	0,0821 ^{ns}
Bloco	3	0,9423 ^{ns}
Resíduo	159	
Total	170	

*GL: graus de liberdade; ^{ns}: não significativo a 5%. Software: R Core 2022.

Para a análise inferencial, os testes para resíduo normal e variância constante (homoscedasticidade) foram realizados, demonstrando normalidade e homoscedasticidades dos resíduos. Tanto no teste de variância (ANOVA) (Tabela 11) quanto no resultado do teste Dunnet (Tabela 12), os p-valores foram maiores que 5%, tornando possível a seguinte interpretação: para o efeito dos tratamentos, o p-valor também foi maior que 5%, não representando diferença entre as médias dos tratamentos.

Já para o efeito dos tratamentos, o valor-p também foi maior que 5%, não tendo diferença entre as médias dos tratamentos. Na Tabela 12, onde encontra-se os

resultados do teste de Dunnet, confirma-se o resultado da ANOVA (Tabela 11), ou seja, como o valor-p do teste Dunnet são maiores que 5%, não apresentam diferença significativa entre o controle e os demais tratamentos em relação à produtividade de grãos de soja das plantas coletadas.

Tabela 112. Resultado do teste de Dunnet do controle (T0) contra os tratamentos (T1 a T8).

Controle	Tratamento	Valor-p
T0	T1	0,9153
T0	T2	0,9970
T0	T3	1,0000
T0	T4	0,9917
T0	T5	1,0000
T0	T6	0,9871
T0	T7	0,0829
T0	T8	0,9940

Software: R Core 2022.

A partir dos dados analisados, em relação aos tratamentos que utilizaram exclusivamente o glifosato (T1 a T4) e aplicados em volumes de calda variáveis (8 L/ha e 30 L/ha), observa-se que, embora o glifosato seja eficaz no controle de plantas daninhas, esses tratamentos isolados apresentaram produtividade semelhante ao tratamento controle (T0), sem aditivos, o que sugere que, para as condições testadas, o volume de calda não influenciou diretamente na produtividade final da soja. Esses dados corroboram com os de Cavalcante *et al.* (2020), que também apontaram a limitada eficácia de bioestimulantes na redução de injúrias e no incremento de rendimento quando aplicados em conjunto com herbicidas, reforçando a ausência de impactos relevantes nas condições avaliadas.

Nos tratamentos combinados, foi adicionado um bioestimulante ao glifosato, e a dosagem do herbicida foi ajustada para concentrações de 0,7x, 0,8x e 1,0x do volume padrão, com a intenção de que o bioestimulante potencializasse o efeito do glifosato, promovendo melhor absorção e maior eficácia no controle de plantas daninhas sem aumentar a fitotoxicidade na soja.

Apesar disso, quando o bioestimulante foi adicionado ao glifosato em concentrações de 0,7x e 0,8x com um volume de 8 L/ha, observou-se uma leve tendência de aumento na produtividade em comparação com os tratamentos apenas com glifosato. No entanto, a diferença não foi estatisticamente significativa. Esse resultado pode sugerir que a aplicação de bioestimulantes com menor volume de herbicida e calda pode ser suficiente para manter o controle de plantas daninhas sem causar fitotoxicidade adicional, ainda que o impacto na produtividade não tenha sido

elevado.

Nos tratamentos com a aplicação do bioestimulante e glifosato em 30 L/ha, também se utilizou dosagens ajustadas (0,7x, 0,8x e 1,0x do herbicida). Embora fosse esperado aumento na absorção e, conseqüentemente, na produtividade, os resultados não diferiram significativamente dos tratamentos de menor volume. Esse resultado sugere que o aumento do volume de calda e do bioestimulante não resultou em benefícios adicionais claros para a produtividade. É possível que a concentração do bioestimulante ou a absorção não tenham sido ideais para gerar impacto adicional na soja.

Apesar das variações observadas entre os tratamentos combinados e os tratamentos isolados, notou-se que o resultado esperado não foi alcançado. Uma análise meramente visual dos dados indica uma leve tendência de aumento na produtividade nos tratamentos com menor concentração de herbicida (0,7x e 0,8x) combinados com bioestimulantes, especialmente no volume de 8 L/ha. Esse indicativo, embora não significativo, sugere que o uso de bioestimulantes em doses reduzidas de glifosato pode ser explorado mais detalhadamente para um manejo eficaz e possivelmente sustentável, sem impacto negativo na cultura. Resultados semelhantes foram relatados por Oliveira *et al.* (2020), que verificaram ganhos limitados no vigor e germinação de plântulas quando bioestimulantes foram associados a subdoses de glifosato. Ainda que haja potencial para ajustes na aplicação desses insumos, as condições do experimento não foram suficientes para demonstrar vantagens concretas dessas combinações.

Adicionalmente, Andrade *et al.* (2020) destacaram que formulações específicas de glifosato e bioestimulantes, como o MC Extra®, podem proporcionar aumentos significativos de produtividade quando as condições experimentais são otimizadas. No entanto, no experimento analisado, o aumento no volume de calda e a variação das doses de bioestimulantes não resultaram em benefícios adicionais claros. Isso indica que ajustes na concentração do herbicida, na escolha de formulações, ou até mesmo nos intervalos de aplicação, poderiam ser explorados para maximizar os benefícios potenciais dessas práticas no manejo da soja.

Em resumo, apesar de as diferenças entre tratamentos não serem relevantes, os resultados sugerem que ajustes nas concentrações de glifosato, junto ao uso de bioestimulantes, podem ter potencial de otimização no manejo.

Tabela 13. Resultados da massa de 1000 grãos (g), área de coleta de 10 plantas (m²), e produtividade dos grãos em função dos 8 tratamentos e da testemunha.

Tratamentos	Massa de 1000 grãos (g)	Área de coleta de 10 plantas (m ²)	Produtividade (kg/ha ⁻¹)
Controle	151,16 A	0,48 A	4.190,37 A
T1	153,69 A	0,39 B	4.560,68 A
T2	148,42 A	0,45 A B	5.013,33 A
T3	151,95 A	0,45 A B	4.420,70 A
T4	151,48 A	0,46 A	4.510,85 A
T5	152,86 A	0,44 A B	4.662,94 A
T6	149,67 A	0,44 A B	5.905,29 A
T7	150,72 A	0,44 A B	7.177,03 A
T8	148,98 A	0,43 A B	6.817,52 A
Média	150,99	0,45	5.495,20

Médias com letras iguais na coluna não indicam diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. Software: R Core 2022.

De acordo com a Tabela 13, o tratamento T4, com uso de Herbicida + Bioestimulante, na dose de 1,0 L/ha⁻¹ com volume de calda de 30 L/ha⁻¹, foi o tratamento que apresentou maior valor para a área de coleta de 10 plantas (m²) e o menor valor foi obtido para o tratamento T1 com uso de herbicida e volume de calda de 8 L/ha⁻¹. A massa de 1000 grãos (g) e a produtividade (kg/ha⁻¹) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos avaliados.

Entretanto, observa-se que os tratamentos T6, T7 e T8 apresentaram valores absolutos de produtividade mais elevados (variando entre 5.905 e 7.177 kg/ha), superando inclusive a média geral do experimento. Embora estatisticamente não tenham diferido da testemunha, esses números sugerem que, em condições práticas, há uma tendência de incremento produtivo quando o bioestimulante é associado ao glifosato em doses reduzidas (0,7x e 0,8x) e com diferentes volumes de calda.

Esse comportamento reforça a hipótese de que o bioestimulante pode atenuar possíveis efeitos negativos da redução da dose de herbicida, sem comprometer a produtividade final. Além disso, a maior estabilidade dos resultados na variável “área de coleta de 10 plantas” nos tratamentos com bioestimulante sugere que a combinação pode favorecer um desenvolvimento mais uniforme das plantas, aspecto relevante para o manejo de lavouras em larga escala.

Apesar da ausência de significância estatística, é importante destacar que as diferenças práticas entre tratamentos, sobretudo o contraste entre T1 (4.560,68 kg/ha) e T7 (7.177,03 kg/ha), indica potencial para otimização da tecnologia de aplicação, principalmente considerando o uso de drones para pulverização localizada, que permite ajustes finos de dose e volume em função da variabilidade da área.

5.4 CONCLUSÃO

A associação entre bioestimulante e glifosato, aplicada de forma localizada por drones, mostrou-se uma estratégia inovadora para o manejo da soja, trazendo ganhos em eficiência e sustentabilidade. Os resultados evidenciaram que a combinação proporcionou incremento no desenvolvimento inicial da cultura, sem comprometer a eficiência do herbicida, o que reforça a hipótese de efeitos sinérgicos em determinadas condições de aplicação. Contudo, também foram observadas variações que sugerem que essa interação pode não ser uniforme em todos os contextos, sendo influenciada por fatores como condições ambientais, estágio da cultura e composição química dos bioestimulantes.

Nesse sentido, embora os drones tenham se mostrado uma ferramenta eficaz para a deposição precisa e econômica de insumos, é necessário reconhecer que a complexidade das interações entre herbicidas e bioestimulantes exige cautela na extrapolação dos resultados. A adoção dessa prática em larga escala deve considerar estudos complementares que avaliem diferentes formulações, doses e espécies de plantas daninhas, bem como os impactos a médio e longo prazo na produtividade e na sustentabilidade do sistema de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEGAS, Fernando S.; CORREIA, Núbia M.; SILVA, Alexandre F. da; CONCENÇO, Germani; GAZZIERO, Dionísio L. P.; DALAZEN, Giliardi. Glyphosate-resistant (GR) soybean and corn in Brazil: past, present, and future. **Adv Weed Sci**, v. 40, n. spe1, e0202200102, Feb. 2022.
- ANDRADE, C. L. L. de et al. Bioestimulantes derivados de *Ascophyllum nodosum* associados ao glyphosate nas características agronômicas da soja RR. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.? n.?, p.?, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v17i3.592>
- ANTUNIASSI, U. R. Precision agriculture: localized application of pesticides. In: Technology and safety in the application of agrototoxics, Santa Maria, 1998. **Anais**. Santa Maria: UFSM, 1998.
- ÁVILA, M. R.; BRACCINI, A. L.; SCAPIM, C. A.; ALBRECHT, L. P.; TONIN, T. A.; STÜLP, M. Bioregulator application, agronomic efficiency, and quality of soybean seeds. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 567- 691, 2008.
- BERTOLIN, D. C.; SÁ, M. E. de; ARF, O.; FURLANI JUNIOR, E.; COLOMBO, A. de S.; CARVALHO, F. L. B. M de. Aumento da produtividade de soja com a aplicação de bioestimulantes. **Fitotecnia**, v. 69, v. 2, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000200011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/Pq3LJZyT43zwynhCKy7WrXb/#>. Acesso em: 02 nov. 2024.
- CALVO, P; NELSON, L; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant Soil**, v. 383, p. 3-41. 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-014-2131-8>. Acesso em: 07 nov. 2024.
- CAMPOS, M. F.; ONO, E. O.; BOARO, C. S. F.; RODRIGUES, J. D. Análise de crescimento em plantas de soja tratadas com substâncias reguladoras. **Revista Biotemas**, Florianópolis, v. 21, p. 53-63, 2008.
- CASTRO, P. R. C.; VIEIRA, E. L. Aplicações de reguladores vegetais na agricultura tropical. Guaíba: **Agropecuária**, 2001. 132 p.
- CAVALCANTE, W. S. et al. Eficiência dos bioestimulantes no manejo do déficit hídrico na cultura da soja. **Irriga**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 754–763, 2020. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n4p754-763. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4186>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- CNA. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Panorama do Agro**. 2024. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 05 nov. 2024.
- COSTA, N. de L. **Bioestimulante como Fator de Produtividade da Cana-deAçúcar**. 2010. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/28562/1/ClicNews-2010-4.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2024.

DAYAN, F. E. *et al.* Resistance to glyphosate: sources, mechanisms, and management strategies. **Weed Science**, v. 63, n. 2, p. 245-257, 2015.

DUKE, S. O. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1045-1058, 2018.

DURIGAN, J. C. Behavior of herbicides in the environment. In: Technical seminar on weed plants and the use of herbicides in reforestation, 1989, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBS/ABRACAVE/SIF, 1989.

EMBRAPA FLORESTAS. **Levantamento de solos no Subplanalto de Cascavel - PronaSolos**, PR. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1116221/levantamento-de-solos-no-subplanalto-de-cascavel---pronasolos-pr>. Acesso em: 14 ago. 2025.

EMBRAPA SOJA. **Alternativas para diversificação de sistemas de produção envolvendo a soja no norte do Paraná**. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1086382/alternativas-para-diversificacao-de-sistemas-de-producao-envolvendo-a-soja-no-norte-do-parana>. Acesso em: 05 nov. 2024.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT**. 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#country/21>. Acesso em: 05 nov. 2024.

FERREIRA, L. A.; OLIVEIRA, J. A.; VON PINHO, E. V. R.; QUEIROZ, D. L. Bioestimulante e fertilizante associados ao tratamento de sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 29, n. 2, p. 80-89, 2007.

FORTE, C. T.; BASSO, F. J. M.; GALON, L.; AGAZZI, L. R.; NONEMACHER, F.; CONCENÇÃO, G. Habilidade competitiva de cultivares de soja transgênica convivendo com plantas daninhas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 2, p. 185-193, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119051638011>. Acesso em: 10 nov. 2024.

IAPAR. **Cartas Climáticas do Paraná**. Disponível em: <http://www.iapar.br/>. Acesso em: 01 jun. 2024.

JOHNSON, G. A. *et al.* **Site specific weed management**: Current and future directions. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.) *The site specific management for agricultural systems*. Madison: ASA-CSSASSSA, 1997.

KAUSHAL, M. *et al.* Biostimulants in plant science: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 491-502, 2017.

KATSENIOS, N. *et al.* Biostimulants as potential safeners against herbicide stress in crops. **Agronomy**, v. 13, n. 5, art. 1256, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13051256.

KLAHOLD, C. A.; GUIMARÃES, V. F.; ECHER, M. DE M.; KLAHOLD, A.; CONTIERO, R. L.; BECKER, A. Resposta da soja *Glycine max* (L.) Merrill à ação de

bioestimulante. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 2, p. 179-185, 13 mar. 2008. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/1032>. Acesso em: 08 nov. 2024.

KRONKA, S. N.; BANZATTO, D. A. **Experimentação agrícola**. Jaboticabal: FUNEP, 1992.

LÓPEZ-RODRÍGUEZ, M. *et al.* The use of biostimulants to increase the efficiency of herbicides. A review. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 261-270, 2019.

OLIVEIRA, T. R. de; THOMÉ, S. E. N.; ANDRADE, M. G. de O.; CONTARDI, L. M.; LIMA, S. F. de. Physiological performance of RR soybean seeds in Glyphosate subdoses submitted to biostimulant. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e5489108725, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i10.8725

PARANÁ. Secretaria de Agricultura. **Pronasolos**. S.d. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/PronasolosPR/Pagina/LATOSSOLO-VERMELHO-DO-SUBPLANALTO-CASCAVEL-caracteristicas-e-potencial-de-uso>. Acesso em: 03 nov. 2024.

PIRES, H. F. **Bioestimulante na recuperação de fitotoxicidade causada por herbicidas aplicados em pós emergência na cultura da soja**. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20330>. Acesso em: 05 nov. 2024.

RIBEIRO, C. da S. **Semeadura antecipada e utilização de bioestimulante na cultura da soja no planalto catarinense**. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Santa Catarina. Curitiba, Santa Catarina, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/199436/Semeadura%20antecipada%20e%20utiliza%20a7%20a3o%20de%20bioestimulante%20na%20cultura%20da%20soja...pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 nov. 2024.

SOFTWARE R CORE. **R**: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria. 2022.

SOUSA, U. V.; CARVALHO, F. T.; BATISTA, V. de S. Interação da mistura em tanque entre os herbicidas diquat e glyphosate na dessecação de área em pousio. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 2, p. 61-70, 2023.

STAFFORD, J. V.; BENLLOCH, J. V. Machine-assisted detection of weeds and weed patches. In: Precision Agriculture, Warwick, 1997. **Proceedings**. Oxford: SCI, 1997. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302883224>. Acesso em: 27 nov. 2022.

TANDATHU, Thabiso et al. Effect of Biostimulants and Glyphosate on Morphophysiological Parameters of Zea mays (L.) Seedlings under Controlled Conditions. **Agronomy**, v. 14, n. 10, art. 2396, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14102396.

VARGAS, L.; ADEGAS, F.; GAZZIERO, D.; KARAM, D.; AGOSTINETTO, D.; SILVA, W. T. da. Resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil: histórico, distribuição, impacto econômico, manejo e prevenção. In: MESCHEDE, D. K.; GAZZIERO, D. L. P. **A era glyphosate: agricultura, meio ambiente e homem**. Londrina: Midiograf II, 2016. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1048114>. Acesso em: 07. nov. 2024.

VIEIRA, E. L.; SANTOS, C. M. G. Efeito de bioestimulante no crescimento e desenvolvimento inicial de plantas de algodoeiro. **Magistra**, v. 17, p. 1-8, 2005.

CASTRO, P. R. C.; VIEIRA, E. L. **Aplicações de reguladores vegetais na agricultura tropical**. Guaíba: Agropecuária, 2001.

VIEIRA, E. L.; CASTRO, P. R. C. **Efeito da aplicação de biorregulador no desempenho agrônômico e produtividade da soja**. 2005.

6 CONCLUSÕES

A presente tese consolidou avanços essenciais no uso de tecnologias modernas para manejo agrícola, com foco na pulverização localizada de herbicidas utilizando drones. Os três artigos que compõem este trabalho abordaram perspectivas complementares e interdependentes, ampliando o entendimento sobre a eficiência, a sustentabilidade e as inovações no controle de plantas daninhas.

O primeiro artigo sintetizou as evidências científicas disponíveis, demonstrando que a pulverização localizada com drones oferece uma alternativa eficiente e sustentável em comparação aos métodos tradicionais. A análise destacou a capacidade dessa tecnologia de reduzir significativamente o uso de insumos, minimizar os impactos ambientais e melhorar a precisão do manejo, alinhando-se às demandas globais por práticas agrícolas mais inteligentes e sustentáveis.

No segundo artigo, os experimentos práticos evidenciaram que drones superaram pulverizadores manuais e tradicionais em termos de eficiência operacional e econômica. A redução expressiva no consumo de herbicidas e a menor exposição ambiental comprovam o potencial dos drones para otimizar o manejo de culturas como a soja, especialmente em grandes extensões de terra. Essa eficiência reforça o papel dessa tecnologia como uma solução inovadora para os desafios enfrentados pela agricultura contemporânea.

O terceiro artigo complementou a pesquisa ao avaliar as interações entre bioestimulantes e herbicidas no contexto da pulverização localizada. Os resultados mostraram que combinações adequadas podem maximizar os benefícios agrônômicos, promovendo maior eficácia no controle de plantas daninhas e aumento na produtividade das culturas. Por outro lado, identificaram-se interações antagônicas em determinadas condições, o que ressalta a necessidade de um planejamento criterioso no uso dessas combinações.

As questões norteadoras apresentadas no início desta tese buscaram responder se a pulverização localizada por drones poderia, de fato, reduzir o uso de defensivos agrícolas, aumentar a eficiência da deposição de produtos e, ao mesmo tempo, preservar a produtividade das culturas. Além disso, questionou-se se essa tecnologia teria potencial para integrar práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis ao manejo agrícola.

Os três artigos que compõem a tese responderam de forma consistente a esses questionamentos. O primeiro evidenciou que a aplicação de herbicidas por

drones reduziu o volume de produto utilizado, mantendo a eficácia no controle de plantas daninhas. O segundo demonstrou que a pulverização com drones na soja assegura deposição uniforme, comparável ao método convencional, sem perdas na produtividade. O terceiro artigo mostrou que a associação entre bioestimulante e glifosato, aplicada por drones, favoreceu o desenvolvimento inicial das plantas, reforçando o potencial da tecnologia para otimizar o uso de insumos e ampliar os benefícios agronômicos.

Neste sentido, esta pesquisa, como um todo, demonstra que a integração de drones e tecnologias correlatas no manejo agrícola não apenas viabiliza uma agricultura mais sustentável, mas também oferece oportunidades concretas para melhorar a eficiência dos sistemas produtivos. Ao abordar diferentes dimensões — ambiental, econômica e técnica — essa pesquisa contribui diretamente para o avanço da agricultura de precisão e das práticas sustentáveis no setor, estabelecendo bases sólidas para futuras inovações.

Os resultados reforçam a relevância de investimentos contínuos em tecnologias agrícolas de ponta e pesquisa científica. A adoção dessas inovações tem o potencial de transformar a forma como os recursos são gerenciados no campo, promovendo práticas mais eficientes e menos impactantes ao meio ambiente.

7 ANEXOS

ANEXO I - METODOLOGIA DE PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA DE HERBICIDAS – PLH-AVANT

A PLH consiste, na geração de um mapa georreferenciado das plantas invasoras presentes na área de interesse, geolocalizando as plantas nas quais se deseja aplicar o herbicida, permitindo trabalhar com doses maiores em áreas com baixa infestação, tendo-se a garantia de controle na área. A seguir está descrito o passo a passo para a geração do mapa de aplicação localizada:

Verificação das condições de campo

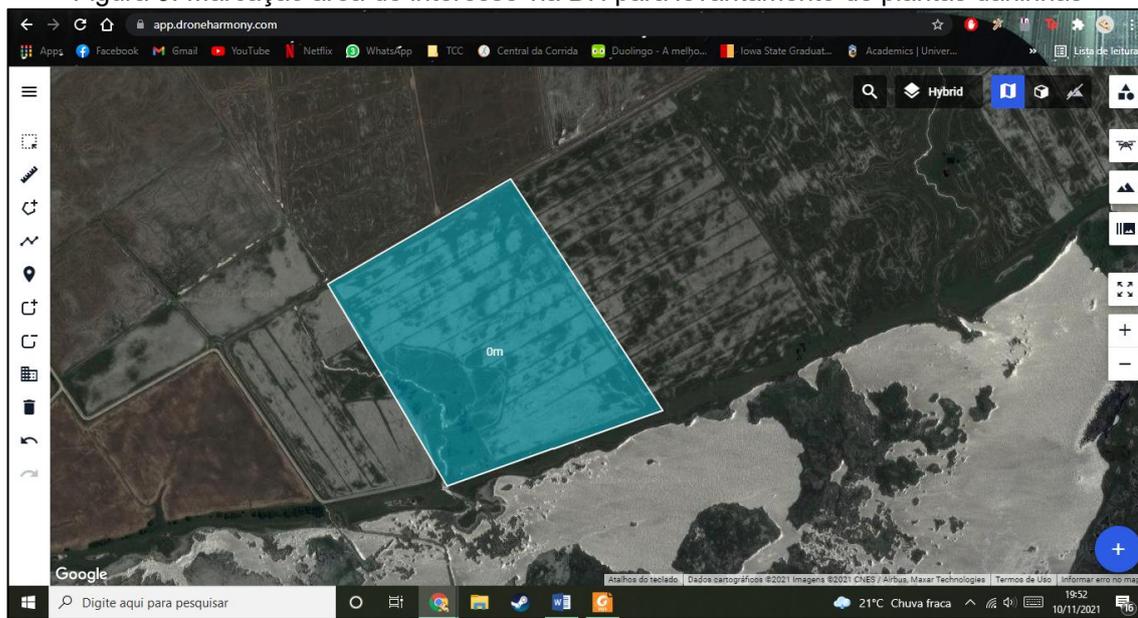
Primeiro, se verificam as condições da lavoura e, se possível, é realizado a identificação das plantas daninhas a partir de imagens de ARPs. Para a melhor identificação, deve-se ter um bom contraste do fundo com as plantas daninhas como palhada ou pastagem onde o gado se alimentou recentemente.

Planejamento do voo

Havendo condições, é realizado o planejamento através de aplicativos para celulares, como o *PIX4Dcapture* e o *Drone Harmony (DH)*. Os mesmos, possibilitam a geração de uma rota de voo para a ARP, onde o mesmo automaticamente realiza o voo e captura as imagens, sendo este acompanhado pelo piloto para troca de baterias, desvio de obstáculos e outros problemas que possam ocorrer.

Estes aplicativos possuem um mapa-base que permite a identificação da área de interesse. Tendo-se este na tela, é possível criar-se a missão através da marcação dos vértices de um polígono na área desejada, conforme Figura 9.

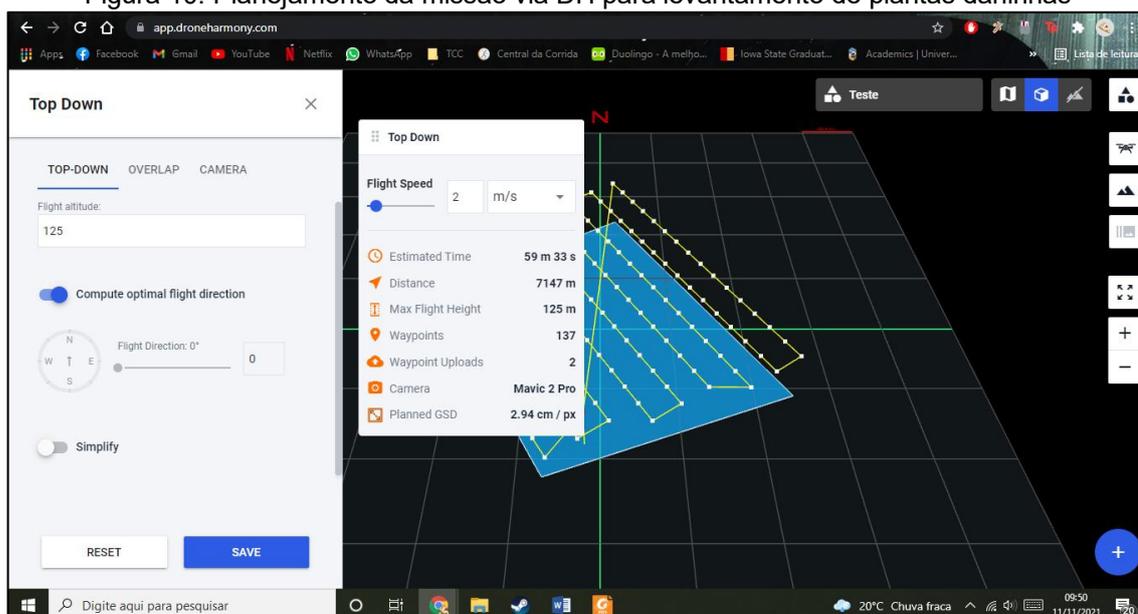
Figura 9. Marcação área de interesse via DH para levantamento de plantas daninhas



Em seguida, cria-se a missão efetivamente, selecionando o tipo de mapeamento (a função *mapping* é indicada para uso agrícola) e se tem o próximo passo como visualizado da Figura 10.

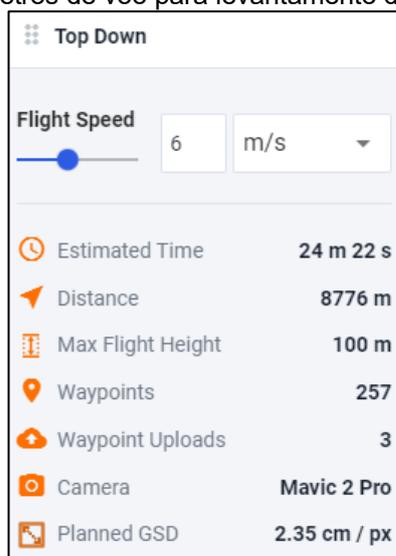
A altura de voo é definida a partir de análise da área e das condições para realização deste (obstáculos, vento, nuvens), entretanto, convencionalmente, adota-se a altitude de 100 metros, a qual fornece um bom *Ground Sample Distance* - GSD, em um número adequado de imagens. A direção de voo é indicada automaticamente pelo aplicativo, porém pode-se efetuar alteração, se necessário. Na aba *overlap* é definida a sobreposição das imagens nas duas direções, sendo utilizados normalmente 70% para sobreposição lateral e frontal. A aba câmera é alterada conforme a ARP utilizada para o mapeamento. Outro parâmetro desta aba é a angulação da câmera, sendo utilizado sempre 90° para este tipo de mapeamento.

Figura 10. Planejamento da missão via DH para levantamento de plantas daninhas



Os outros parâmetros de voo variam com base nos critérios mencionados anteriormente, bem como com a velocidade deste, conforme exposto na Figura 11.

Figura 11. Parâmetros de voo para levantamento de plantas daninhas



O tempo estimado de voo considera a missão total, entretanto não leva em conta as trocas de baterias necessárias durante a execução, por isso se tem um tempo maior ao final de execução da missão.

A distância de voo tem influência direta da sobreposição lateral das imagens. Com uma maior sobreposição, mais linhas serão adicionadas no voo e, conseqüentemente, uma maior distância percorrida ao final da missão. Os *waypoints* marcam os pontos em que serão capturadas as imagens, tendo-se mais pontos conforme se aumentam as sobreposições. O parâmetro mais importante para a

execução da missão é o GSD, que basicamente representa a distância de amostra do solo, ou seja, o tamanho do *pixel* nas imagens capturadas. Este parâmetro é o que vai determinar se é possível ou não identificar as plantas daninhas da área. Ressalta-se ainda a importância da câmera da ARP estar bem configurada, para não haver excesso ou falta de luz, influenciando na qualidade das imagens a serem adquiridas.

Execução do voo

Tendo-se a missão planejada, é hora de ir a campo executar o voo de captura de imagens, prezando por boas condições, como baixa velocidade do vento e sem chuva, conforme indicações do fabricante da ARP. Para a captura das imagens, o ideal é um dia nublado, para que não se tenha influência de luz e sombra nas imagens capturadas. Porém o voo pode ser realizado mesmo com tempo aberto, dependendo-se das necessidades do produtor e do tempo disponível para atendê-las.

Durante o voo, o piloto deve estar atento as informações que aparecem no controlador e no aplicativo de voo, para resolver qualquer problema que possa surgir. Além disso, o mesmo deve monitorar o nível de bateria da ARP, sendo indicado pelo fabricante uso até 30%, devendo ser realizado a troca das baterias abaixo disso. As baterias duram em torno de 20 minutos capturando imagens, variando com as condições de vento e altitude de voo.

Pontos de controle

Enquanto a ARP está capturando as imagens, o segundo componente da equipe deve realizar o levantamento dos pontos de controle no campo para duas finalidades: correção da posição do ortomosaico e identificação de plantas daninhas.

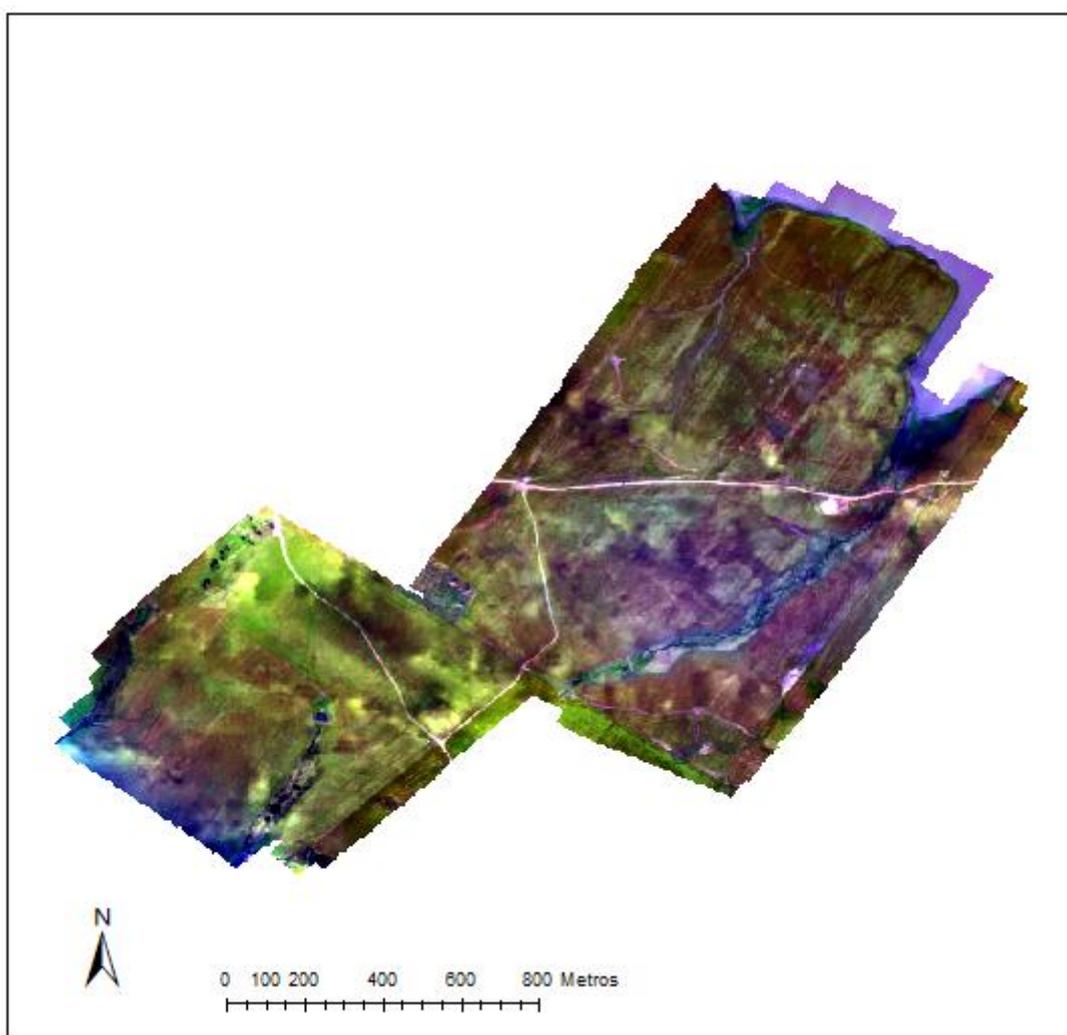
Os pontos de controle são associados a imagem. Se houver um erro, mesmo que mínimo, de coordenadas, por exemplo por ação do vento, será possível realizar a ortorretificação. Por isso são coletados pontos de referência para identificar em outras imagens georreferenciadas, como portões, cercas e cruzamentos de estrada, para que se possa corrigir o posicionamento do ortomosaico e não ocorrer erros na aplicação. A coleta de pontos representando plantas daninhas é de extrema importância para facilitar o trabalho de escritório, uma vez que se tenham dados para comparar com as outras invasoras existentes no campo, facilitando sua comparação.

Processamento das imagens

Após as imagens adquiridas e armazenadas em cartão de memória pela ARP, pode-se partir para o trabalho de escritório. Através de *softwares* especializados, as imagens são associadas em um ortomosaico variando parâmetros para atingir a melhor qualidade da imagem, levando-se em conta o tempo de processamento.

Na Figura 12 tem-se o ortomosaico de uma área levantada de invasoras de um campo para exemplificação, bem como a indicação de onde estão localizadas essas ervas daninhas.

Figura 12. Ortomosaico da imagem de campo de produção Moinho para levantamento de plantas daninhas.



Geolocalização das plantas daninhas

Nesta etapa são identificadas e marcadas as plantas daninhas presentes na área, conforme Figura 13, para que a partir desta marcação possa ser gerado o mapa

de aplicação localizada de herbicidas. Esta marcação foi feita no ortomosaico da figura anterior (figura 12), na parte mais ao norte da área.

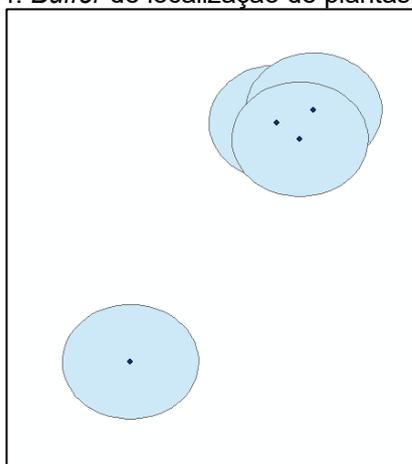
Figura 13. Geolocalização de espécie de *Conyza bonariensis*.



Mapa de aplicação localizada

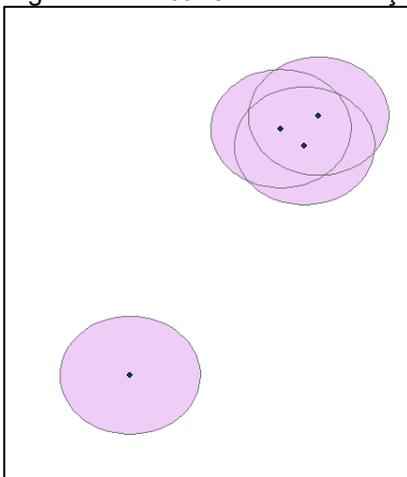
A partir dos pontos marcados no ortomosaico, pode-se trabalhar apenas com arquivos vetoriais, tornando o processamento bem mais leve e rápido. Assim, executa-se uma sequência de comandos que tem por objetivo transformar os pontos marcados em polígonos que possam ser reconhecidos pelo sistema dos pulverizadores como áreas de aplicação. Para isso, é aplicado um *buffer* (Figura 14), com uma distância fixa, nesse caso de 1 metro, variando de acordo como nível de precisão desejado. Quanto maior a quantidade de polígonos menor será a distância, e vice-versa.

Figura 14. *Buffer* de localização de plantas daninhas



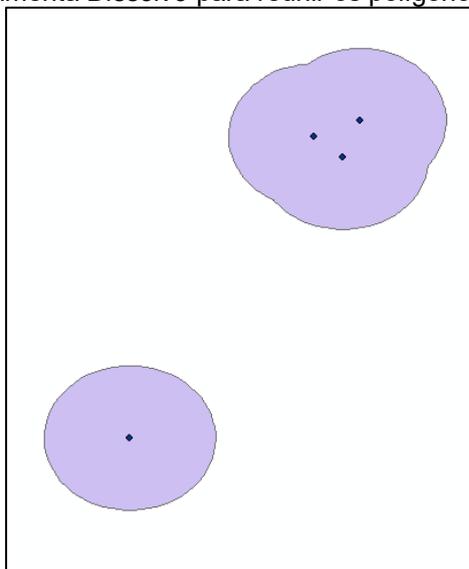
Tendo-se esta área delimitada, é realizada a união dos polígonos gerados. Isso é necessário para os polígonos serem unidos em um mesmo arquivo, e não sobrepostos, conforme Figura 15.

Figura 15. União dos polígonos com *buffer* de identificação das plantas daninhas



A seguir são dissolvidas as linhas que estejam contidas na mesma área. Para isso se utiliza a função de dissolução do QGIS, a qual reúne todos os polígonos que possuem o mesmo atributo em um só, como visualizado na Figura 16.

Figura 16. Uso da ferramenta *Dissolve* para reunir os polígonos com o mesmo atributo



Como todos os polígonos possuíam o mesmo atributo, por serem originados do mesmo arquivo, ficam todos registrados em um único polígono, conforme a tabela de atributos, necessitando separar estes em vários polígonos. Para isto utiliza o comando *multipart to singlepart*, ficando com cada polígono separado conforme a Figura 17.

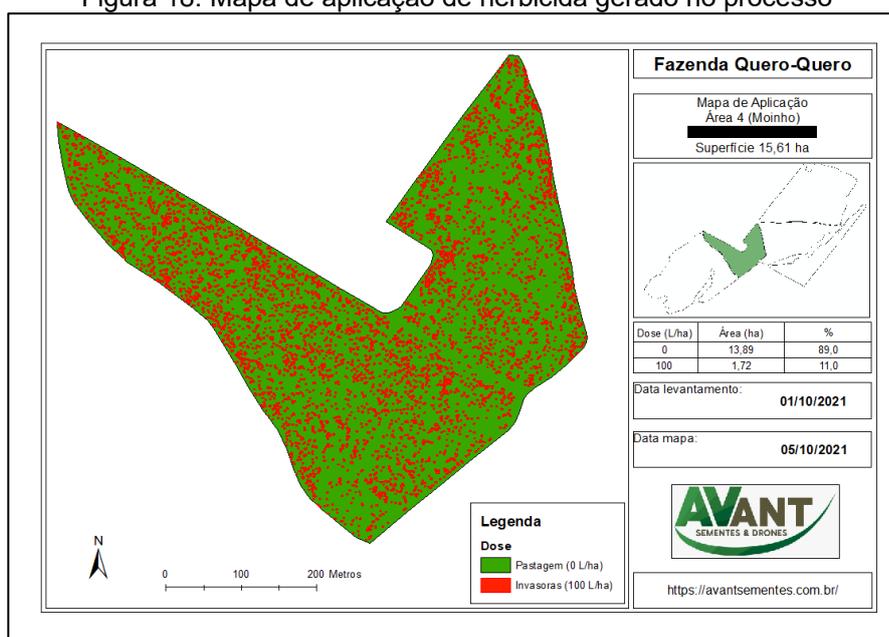
Figura 17. Atributos, formatos, comprimento e área em m²

invasoras_1_Buffer_Union_Dis			
OBJECTID *	Shape *	Shape Length	Shape Area
1	Polygon	1,518269	0,00001

invasoras_1_Buffer_Union_Dis1			
OBJECTID *	Shape *	Shape Length	Shape Area
1	Polygon	0,000062	0
2	Polygon	0,00016	0
3	Polygon	0,000062	0
4	Polygon	0,000062	0
5	Polygon	0,000062	0

Tendo-se estes polígonos separados, é inserida uma coluna “dose” para que o mapa possa ser utilizado na aplicação. Também, é enviado ao produtor uma versão em .PDF do mapa para que o mesmo possa ter informações localizadas das áreas de aplicação e qual o tamanho da mesma em relação a área total, conforme Figura 18.

Figura 18. Mapa de aplicação de herbicida gerado no processo

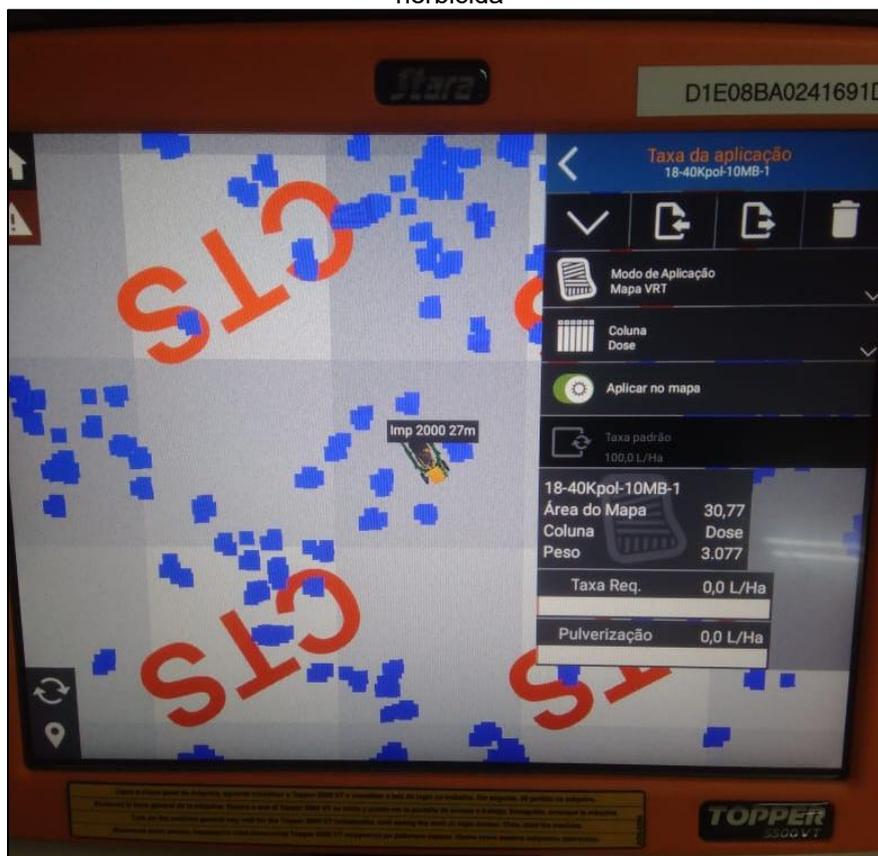


Percebe-se que a área de aplicação, nesse caso com aplicação de calda de 100 L/ha⁻¹, é de apenas 11% da área total, portanto vê-se que é muito vantajoso fazer a aplicação localizada, ao invés da aplicação em área total.

Uso do mapa de aplicação no aparelho pulverizador

Tendo-se o mapa pronto, verifica-se o formato de arquivo a ser lido pelo monitor do pulverizador que será utilizado. A inserção é feita através do monitor do máquina, por meio de um *pen-drive* ou por acesso remoto (se a máquina aceitar). Na Figura 19, pode-se ver o mapa de aplicação em um monitor Topper 5500 da Stara.

Figura 19. Monitor de pulverizador modelo Topper 5500, Stara, com dados de aplicação localizada de herbicida



Ao longo do período desde a concepção da metodologia de PLH-AVant até o momento foi possível o desenvolvimento de muitas melhorias, tanto de processos como de especificações no arquivo, para serem melhor identificados pelos monitores. Foram realizadas alterações no formato dos polígonos, trocando da forma circular para quadrada, assim reduzindo drasticamente o tamanho do arquivo a ser inserido. Com isso, houve uma simplificação nos processos executados para gerar o mapa, deixando o processamento mais ágil, pois o *buffer* quadrado demanda menos tempo que o redondo para ser executado, em função do número de vértices para sua formação ser menor.