UNIVERSIDADE PARANAENSE – UNIPAR

Recredenciada pela Portaria – MEC n.º 747, de 10/09/2020 – D.O.U. 11/09/2020

Mantenedora: UNIPAR – SOCIEDADE EMPRESARIAL LTDA.

Coordenação de Pós-Graduação *Stricto Sensu* e Pesquisa

Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Aplicada à Agricultura

Eduardo Goiano da Silva

Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina para monitoramento de *Diaphorina citri* em cultivo de citros

Umuarama

2026

Eduardo Goiano da Silva

Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina para monitoramento de *Diaphorina citri* em cultivo de citros

Tese apresentada como exigência para a obtenção do grau de doutor em Biotecnologia Aplicada à Agricultura pela Universidade Paranaense - UNIPAR.

Orientadora: Profª Drª Maiara Kawana Aparecida Rezende

Umuarama

2026

Ficha Catalográfica

S586i Silva, Eduardo Goiano da.
Internet das coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina para monitoramento de *Diaphorina citri* em cultivo de citros / Eduardo Goiano da Silva. – Umuarama : Universidade Paranaense - UNIPAR, 2026.
79 f.

Orientadora: Drª, Maiara Kawana Aparecida Rezende.
Tese (Doutorado) – Universidade Paranaense - UNIPAR.

1. Tecnologia de sensores. 2. Armadilhas inteligentes. 3. Internet das coisas. 4. Inovação tecnológica. 5. Visão computacional. 6. Citricultura. I. Universidade Paranaense - UNIPAR. II. Título.

(21 ed.) CDD: 634.3

Bibliotecária Responsável Regiane Luiza Campaneli CRB 9/2194

Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina para monitoramento de *Diaphorina citri* em cultivo de citros

Tese aprovada como requisito obrigatório para obtenção do Grau de Doutor no Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Aplicada à Agricultura da Universidade Paranaense – UNIPAR, pela seguinte banca examinadora:

Dra. Maiara Kawana Aparecida Rezende

Universidade Paranaense – UNIPAR

Dr. Odair Alberton

Universidade Paranaense – UNIPAR

Dra. Viviane Ruppenthal

Universidade Paranaense – UNIPAR

Dra. Silvia Graciele Hulse de Souza

Universidade Federal do Paraná - UFPR

Dr. Léo Mathias Miloca

Instituto Federal do Paraná - IFPR

Dr. Tarcisio Miguel Teixeira

Instituto Federal do Paraná – IFPR

Umuarama, 11 de agosto de 2026

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese representa muito mais do que o encerramento de uma pesquisa científica; simboliza a realização de uma jornada marcada por desafios, aprendizados, superação e crescimento pessoal e profissional. Ao longo desse percurso, enfrentei momentos difíceis, incluindo desafios familiares, problemas de saúde, que exigiram resiliência, determinação e perseverança.

Às minhas orientadoras, Prof.ª Dr.ª Silvia e Prof.ª Dr.ª Maiara, expresso minha sincera gratidão pela confiança, orientação, paciência e dedicação à minha formação acadêmica e científica. Agradeço também ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), à Universidade Paranaense (UNIPAR) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional, estrutura e incentivo fundamentais para a realização desta pesquisa.

Aos membros da banca examinadora e aos professores que contribuíram para minha formação, agradeço pelos ensinamentos, discussões e contribuições que enriqueceram este trabalho. Meu reconhecimento especial à Cleomilda Zacarias, pelo apoio indispensável durante as atividades de campo, e aos produtores rurais que compartilharam seu tempo, experiência e confiança.

À minha família, fundamento de todas as minhas conquistas, dedico um agradecimento especial. À minha esposa, Viviany, agradeço pelo amor, companheirismo, compreensão e incentivo constante. Ao meu filho, Gabriel, por ser fonte diária de inspiração, alegria e motivação.

Ao meu pai, agradeço pelos valores, ensinamentos e exemplo de honestidade, trabalho e perseverança. À memória de minha querida mãe, dedico esta conquista com profundo amor, saudade e gratidão. Embora não esteja presente fisicamente, sua influência permanece viva em cada valor que carrego e em cada realização alcançada. Esta vitória também lhe pertence.

A todos os familiares e amigos que compreenderam minhas ausências e me apoiaram ao longo desta caminhada, meu sincero agradecimento.

Que esta tese represente não apenas o encerramento de uma importante etapa, mas também o início de novas oportunidades para contribuir com a ciência, a agricultura e a sociedade.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL 9

ABSTRACT 10

CAPÍTULO I 11

Avanços tecnológicos e utilização da IoT no monitoramento de *Diaphorina citri* na cultura de citros 11

RESUMO 11

1 INTRODUÇÃO 12

1.1 Impacto dos métodos convencionais de controle e monitoramento do psilídeo 13

1.2 IoT e suas aplicações na agricultura 15

1.3 Agropecuária inteligente com IoT e monitoramento de pragas 17

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS 20

REFERÊNCIAS 21

CAPÍTULO II 26

Perfil dos Citricultores e Práticas de Monitoramento de *Diaphorina citri* no Noroeste do Paraná, Brasil 26

RESUMO 26

1 INTRODUÇÃO 27

2 MATERIAL E MÉTODOS 29

2.1 Delimitação geográfica dos municípios do Paraná com ocorrência da Huanglongbing-HLB (*Greening*) 29

2.2 Coleta de dados 30

2.3 Análise dos dados 32

3 RESULTADOS 33

3.1 Perfil do Produtor 33

3.2 Uso de Tecnologia e Monitoramento 34

4 DISCUSSÃO 39

5 CONSIDERACÕES FINAIS 41

REFERÊNCIAS 43

CAPÍTULO III 45

Desenvolvimento e validação de uma armadilha inteligente baseada em IoT e inteligência artificial para o monitoramento automatizado de *Diaphorina Citri* em pomares cítricos. 45

RESUMO 45

1 INTRODUÇÃO 46

2 MATERIAL E MÉTODOS 48

2.1 Arquitetura geral do sistema 48

2.2 Fluxograma de funcionamento do sistema de monitoramento 50

2.3 Modelo de Inteligência Artificial 50

2.3.1 Banco de dados de imagens (coleta, rotulagem e pré-processamento) 50

2.3.2 Modelo de rede neural adotado e parâmetros de treinamento 52

2.3.3 Métricas de avaliação 53

2.3.4 Espaço de Características e Identificação da Classe *D_CITRI* 54

2.4 Integração IoT e comunicação de dados 55

2.5 Validação da armadilha inteligente em condições de campo 57

2.5.1 Instalação das armadilhas em campo 57

2.5.2 Frequência de aquisição das imagens e captura dos dados 57

2.5.3 Procedimentos de validação 58

2.5.4 Comparação entre armadilha inteligente e armadilha convencional 58

2.5.5 Métricas agronômicas e operacionais 58

2.5.6 Critérios de funcionamento da armadilha 59

3 RESULTADOS 59

3.1. Desempenho do modelo de detecção.....59
3.2. Desempenho do sistema IoT.....60
3.3. Resultados da Validação em Campo 61
3.4. Comparação com métodos convencionais.....62
3.5. Análise de custo-benefício e aplicabilidade prática 64
4 DISCUSSÃO 65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 67
CONCLUSÃO GERAL 69
AGRADECIMENTOS 72
REFERÊNCIAS 73
ANEXOS 76

Eduardo Goiano da Silva

Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina para monitoramento de *Diaphorina citri* em cultivo de citros

RESUMO GERAL

A citricultura possui significativa importância econômica e enfrenta desafios fitossanitários relacionados ao Huanglongbing (HLB), ou greening dos citros, doença associada à bactéria *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), cujo principal vetor é o psilídeo-asiático-dos-citros, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). O monitoramento desse inseto é fundamental para o manejo integrado de pragas e a redução dos riscos de disseminação da doença. Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT), a inteligência artificial e a visão computacional apresentam potencial para aprimorar a detecção e o monitoramento de populações de insetos-praga. Este estudo foi desenvolvido em três etapas complementares: no cap. 1 foram abordados os aspectos relacionados à importância fitossanitária de *D. citri*, aos impactos do HLB e às estratégias convencionais de monitoramento e controle, com ênfase nas possibilidades de integração entre sensores, dispositivos conectados, visão computacional e algoritmos de inteligência artificial para aprimorar a detecção de pragas, no cap.2, foram aplicados questionários a produtores de 20 propriedades rurais localizadas nos municípios de Altônia, Cruzeiro do Oeste, Paranavaí, São Jorge do Patrocínio e Umuarama. Os resultados demonstraram predominância do monitoramento visual (65%), seguido pelo uso de armadilhas adesivas amarelas (20%), além da adoção generalizada de inseticidas químicos e da limitada utilização de tecnologias digitais no manejo agrícola. Os relatos dos produtores indicaram a ocorrência de erradicação de plantas atribuída ao HLB em 95% das propriedades, sem confirmação laboratorial no âmbito desta pesquisa. No cap. 3, desenvolveu-se uma armadilha inteligente composta por estrutura metálica, alimentação híbrida com energia solar e bateria recarregável, microcontrolador ESP32-CAM e sistema de visão computacional baseado em rede neural convolucional, desenvolvido na plataforma Edge Impulse. A comunicação sem fio, utilizando o protocolo MQTT, possibilitou a transmissão e o armazenamento remoto dos dados, enquanto o processamento embarcado permitiu o reconhecimento automatizado dos insetos. A validação em campo, realizada em pomar cítrico no noroeste do Paraná, demonstrou disponibilidade operacional de 90%, funcionamento integrado de aquisição e processamento de imagens e transmissão de dados. Os resultados evidenciam a relevância de soluções tecnológicas para aprimorar o monitoramento de *D. citri* e indicam a viabilidade técnica do protótipo nas condições avaliadas. Conclui-se que a integração entre o diagnóstico das práticas regionais de manejo e o desenvolvimento de uma armadilha inteligente constitui uma abordagem promissora para apoiar o monitoramento fitossanitário e o manejo integrado de pragas na citricultura.

Palavras-chave: Tecnologia de sensores. Armadilhas inteligentes. Internet das Coisas. Inovação tecnológica. Visão computacional. Citricultura.

Eduardo Goiano da Silva

Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina para monitoramento de *Diaphorina citri* em cultivo de citros

ABSTRACT

Citrus production is of significant economic importance and faces phytosanitary challenges related to Huanglongbing (HLB), also known as citrus greening, a disease associated with the bacterium *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), whose primary vector is the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). Monitoring this insect is essential for integrated pest management and reducing the risk of disease spread. In this context, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and computer vision have the potential to improve the detection and monitoring of pest insect populations. This study was conducted in three complementary stages. In Chapter 1, the phytosanitary importance of *D. citri*, the impacts of HLB, and conventional monitoring and control strategies were addressed, emphasizing the potential integration of sensors, connected devices, computer vision, and artificial intelligence algorithms to improve pest detection. In Chapter 2, questionnaires were administered to citrus growers from 20 rural properties located in the municipalities of Altônia, Cruzeiro do Oeste, Paranavaí, São Jorge do Patrocínio, and Umuarama, in the state of Paraná, Brazil. The results showed that visual monitoring was predominant (65%), followed by the use of yellow sticky traps (20%), as well as widespread adoption of chemical insecticides and limited use of digital technologies in agricultural management. Growers reported that plant eradication attributed to HLB had occurred on 95% of the properties, although the disease was not laboratory-confirmed in this study. In Chapter 3, an intelligent trap was developed, comprising a metal structure, a hybrid power supply using solar energy and a rechargeable battery, an ESP32-CAM microcontroller, and a computer vision system based on a convolutional neural network developed using the Edge Impulse platform. Wireless communication using the MQTT protocol enabled remote data transmission and storage, while embedded processing allowed automated insect recognition. Field validation, conducted in a citrus orchard in northwestern Paraná, demonstrated an operational availability of 90%, with integrated image acquisition and processing and data transmission. The results highlight the importance of technological solutions for improving *D. citri* monitoring and indicate the technical feasibility of the prototype under the evaluated conditions. It is concluded that integrating the assessment of regional management practices with the development of an intelligent trap represents a promising approach to supporting phytosanitary monitoring and integrated pest management in citrus production.

Keywords: Sensor technology. Smart traps. Internet of Things. Technological innovation. Computer vision. Citrus farming.

CAPÍTULO I

Avanços tecnológicos e utilização da IoT no monitoramento de *Diaphorina citri* na cultura de citros

*Artigo publicado na revista Brazilian Journal of Biology, 2025, vol. 85, e290263 | https://doi.org/10.1590/1519-6984.290263

RESUMO

O psilídeo cítrico asiático, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psylloidea: Liviidae), é uma praga de grande relevância para a indústria de citros, atuando como vetor da bactéria *Candidatus liberibacter asiaticus* (CLas), responsável pela doença conhecida como Huanglongbing (HLB) ou greening dos citros. A distribuição de *D. citri* abrange regiões tropicais e subtropicais, representando uma ameaça significativa à produção global de citros e causando perdas econômicas. A transmissão de CLas ocorre quando o psilídeo se alimenta do floema das plantas cítricas, espalhando a doença severamente. Portanto, a gestão de *D. citri* é essencial para a saúde dos pomares de citros, e entender seu habitat e padrões de dispersão é crucial para um controle eficaz. A tecnologia da Internet das Coisas (IoT) aparece como uma ferramenta promissora na agricultura, permitindo sistemas de monitoramento e controle em tempo real que aumentam a eficiência e sustentabilidade das práticas agrícolas. A integração da IoT facilita a detecção precoce de *D. citri* e o monitoramento contínuo de suas populações, melhorando a resposta a surtos de pragas e otimizando o uso de inseticidas. Sistemas baseados em IoT (Internet das Coisas) e visão computacional têm demonstrado alta precisão na identificação e ocorrência de pragas, permitindo um manejo rápido e eficiente. Esses avanços tecnológicos, combinados com estratégias biológicas e métodos tradicionais, como inseticidas e armadilhas físicas, criam uma abordagem multifacetada para o manejo de *D. citri*. Ao integrar dados de imagens de satélite, sensores de campo e algoritmos de aprendizado de máquina, é possível desenvolver um monitoramento mais abrangente e preditivo das condições agrícolas. Isso ajuda a mitigar os impactos da HLB e promove práticas agrícolas mais inteligentes e resilientes. A agricultura inteligente, apoiada pela IoT e tecnologias, oferece um caminho promissor para enfrentar os desafios da produção agrícola moderna, combinando monitoramento em tempo real, estratégias biológicas inovadoras e análises preditivas para criar um sistema agrícola mais sustentável e eficiente, essencial para enfrentar os desafios do futuro.

Palavras-chave: Sustentabilidade agrícola. Controle biológico. Algoritmos de aprendizado de máquina. Tecnologia de sensores. Gestão integrada de pragas.

1 INTRODUÇÃO

O psilídeo cítrico asiático, *Diaphorina citri* Kuwayama, 1908, (Hemiptera: Psylloidea: Liviidae) é uma praga significativa para a citricultura devido ao seu papel como vetor da bactéria "*Candidatus* Liberibacter asiaticus" (CLas), causadora da devastadora doença conhecida como Huanglongbing (HLB) ou greening dos citros (Grafton-Cardwell *et al*., 2013; Chu *et al*., 2016). Esta praga está amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais de cultivo de citros, representando uma ameaça à produção de citros em todo o mundo (Ullah *et al*., 2018; Tian *et al*., 2018; Nouri *et al*., 2016). A HLB tem impactos severos na produção global de citros, resultando em perdas econômicas substanciais (Vosburg *et al*., 2021). Estes estudos destacam a urgência de implementar estratégias eficazes para prevenir e gerenciar o impacto econômico do HLB na produção mundial de citros, uma vez que há registros de grandes perdas. No Brasil, o HLB causou danos econômicos significativos, com perdas estimadas de US$ 11,8 milhões a US$ 39,2 milhões na região de Paranavaí, no Paraná (Costa *et al.,* 2021). A introdução do HLB na Bahia resultou em perdas superiores a US$ 890 milhões em 20 anos (Oliveira *et al.,* 2013). No México, o HLB levou a perdas substanciais de empregos e ao aumento dos custos de produção, sem a implementação de estratégias de gestão eficazes (Villar-Luna *et al.,* 2024).

O manejo de *Diaphorina citri* é crucial para a produção de citros e compreender o uso de seu habitat e padrões de dispersão para um controle eficaz (Pelz-Stelinski *et al.,* 2016). Além disso, a suscetibilidade de *Diaphorina citri* infectada e não infectada por *Candidatus Liberibacter asiaticus* a fungos entomopatogênicos e suas atividades enzimáticas de desintoxicação sob diferentes temperaturas foi investigada (Hussain *et al.,* 2018). A fenologia de *D. citri* e seus parasitoides associados em diferentes espécies cítricas tem sido estudada em diversas regiões. Em Punjab, Paquistão, a flutuação populacional de *D.citri* foi monitorada em tangerina e laranja doce, com níveis mais elevados de infestação nesta última (Khan *et al.,* 2014). No sul da Califórnia, populações de *D. citri* estiveram presentes durante todo o ano, com as maiores densidades ocorrendo de julho a novembro (Kistner *et al.,* 2016). Um estudo no Brasil encontrou uma correlação positiva entre a fenologia das plantas cítricas e as pragas de insetos, mas não com seus predadores (Rocha *et al.,* 2017). Uma pesquisa molecular na Flórida identificou diferentes

espécies eubacterianas em *D. citri* e seus parasitoides, sugerindo uma falta de transferência horizontal estável (Meyer *et al.,* 2008).

O controle do HLB é um desafio significativo, uma vez infectada, a planta precisará ser erradicada, uma vez que não há tratamentos curativos para a doença. As estratégias de manejo incluem a erradicação de plantas infectadas, controle rigoroso do vetor por meio de inseticidas e armadilhas, e o uso de variedades cítricas resistentes. Os esforços de controle desta praga têm se concentrado no uso intensivo de inseticidas, que embora sejam eficazes a curto prazo, levantam preocupações quanto à resistência dos insetos e impactos ambientais (Patt *et al*., 2018). Alternativas biológicas, como o uso de fungos entomopatogênicos e parasitoides, também têm sido exploradas, oferecendo abordagens mais sustentáveis (Ullah *et al*., 2018; Tougeron *et al*., 2021). Adicionalmente, a tecnologia da Internet das Coisas (IoT) está emergindo como uma ferramenta promissora na agricultura de precisão, permitindo a implementação de sistemas de monitoramento e controle em tempo real que podem aumentar a eficiência e sustentabilidade das práticas agrícolas (Zhang *et al*., 2020; FaghihKhorasani & FaghihKhorasani, 2022).

A integração da IoT na agricultura pode facilitar a detecção precoce de *Diaphorina citri* e o monitoramento contínuo de suas populações, pode melhorar a resposta aos surtos da praga reduzindo a dependência de inseticidas químicos (Rehman *et al*., 2022). Essa tecnologia, combinada com estratégias tradicionais e biológicas, oferece um caminho promissor para mitigar os impactos da HLB na produção de citros e promover práticas agrícolas mais sustentáveis.

1.1 Impacto dos métodos convencionais de controle e monitoramento do psilídeo

O controle e monitoramento do *Diaphorina citri*, são fundamentais para o manejo da propagação da doença Huanglongbing e seu impacto devastador na indústria cítrica. Várias abordagens foram propostas e estudadas para resolver esse problema (Hall *et al*., 2012). A pesquisa está sendo conduzida em várias frentes, incluindo resistência das plantas à doença, interações ACP-LAS-planta e métodos moleculares de controle do psilídeo (Hall *et al.,* 2012). Estratégias sustentáveis também estão a ser exploradas, tais como a utilização de peptídeos antimicrobianos e nanoemulsões (Li *et al.,* 2021).

Para a implementação de um programa eficaz de manejo do HLB baseado em medidas de controle de *D. citri*, uma detecção precisa da presença do psilídeo é mais

importante do que uma estimativa precisa de suas populações, isto requer a utilização do método de monitoramento mais eficiente. Vários métodos de monitoramento da população de *D. citri*, incluindo observação visual (Sétamou *et al.,* 2008), o uso de armadilhas adesivas na coloração amarela (Hall *et al.,* 2010), amostragem por vácuo e sucção (Monzo *et al.,* 2015; Thomas *et al.,* 2012), foram estudadas, mas não houve consenso sobre qual método de amostragem é o melhor para detectar psilídeos em baixas densidades populacionais. Esta é uma consideração importante porque a eficiência e a precisão da amostragem podem ser afetadas pelas densidades populacionais de *D. citri* (Monzo *et al.,* 2015) e por se tratar de um inseto vetor, a detecção precoce da praga é essencial para garantir a sanidade das plantas.

A interferência de RNA (RNAi) tem sido explorada como uma potencial abordagem não transgênica para o controle do *D. citri* (Andrade & Hunter *et al.,* 2017; Marques *et al.,* 2021). Este método visa desenvolver estratégias de controle baseadas em RNAi para atingir o vetor responsável pela transmissão do HLB. Além disso, o desenvolvimento de resistência aos inseticidas nas populações asiáticas de psilídeos cítricos foi identificado como uma séria ameaça à indústria cítrica, enfatizando a necessidade de estratégias eficazes de monitoramento e manejo (Kanga *et al.,* 2015).

Compreender os padrões de dispersão de *D. citri* e suas interações com o manejo dos pomares de citros e fatores abióticos é crucial para o desenvolvimento de medidas de controle eficazes como influenciados pelo manejo dos pomares de citros e fatores abióticos (Ayre *et al.,* 2019). Além disso, o potencial de parasitoides, como *Trechnites insidiosus* (Crawford) (Hymenoptera: Encyrtidae), como agentes de controle biológico para pragas de psilídeos tem sido destacado, enfatizando a importância de explorar abordagens ecológicas para o manejo (Tougeron *et al.,* 2021).

No domínio dos avanços tecnológicos, a inteligência artificial e a aprendizagem de máquina têm sido utilizadas para desenvolver sistemas automatizados baseados em visão para monitorizar pragas, incluindo o *D. citri* (Ünal, 2020). Isto representa um caminho promissor para melhorar as técnicas de monitoramento.

Outros estudos investigaram o uso de inseticidas químicos, semioquímicos derivados de plantas e caulim para o controle de *D. citri*, destacando a diversidade de métodos que estão sendo explorados para o manejo de pragas (Pullock, 2024; Miranda *et al.,* 2018). Além disso, a eficácia dos métodos de monitoramento, como armadilhas adesivas amarelas e ensaios de PCR em tempo real, foi avaliada para rastrear populações

de psilídeos e identificar a presença do vetor (Miranda *et al.,* 2017; Sumner-Kalkun *et al.,* 2020).

Métodos de controle biológico, incluindo o uso de parasitoides e captura em massa, também foram investigados como estratégias potenciais para o manejo de populações de psilídeos (Beloti *et al.,* 2017; Bozkurt *et al.*, 2022). Estas abordagens oferecem alternativas ecológicas aos métodos tradicionais de controle baseados em inseticidas.

O controle e monitoramento do *D. citri*, requerem uma abordagem multifacetada que englobe estratégias baseadas em RNAi, gestão da resistência aos inseticidas, considerações ecológicas, inovações tecnológicas e métodos de controle biológico. Ao integrar estas diversas abordagens, é possível desenvolver estratégias abrangentes e sustentáveis para mitigar o impacto do HLB na produção de citrinos (Jurat-Fuentes *et al*., 2023).

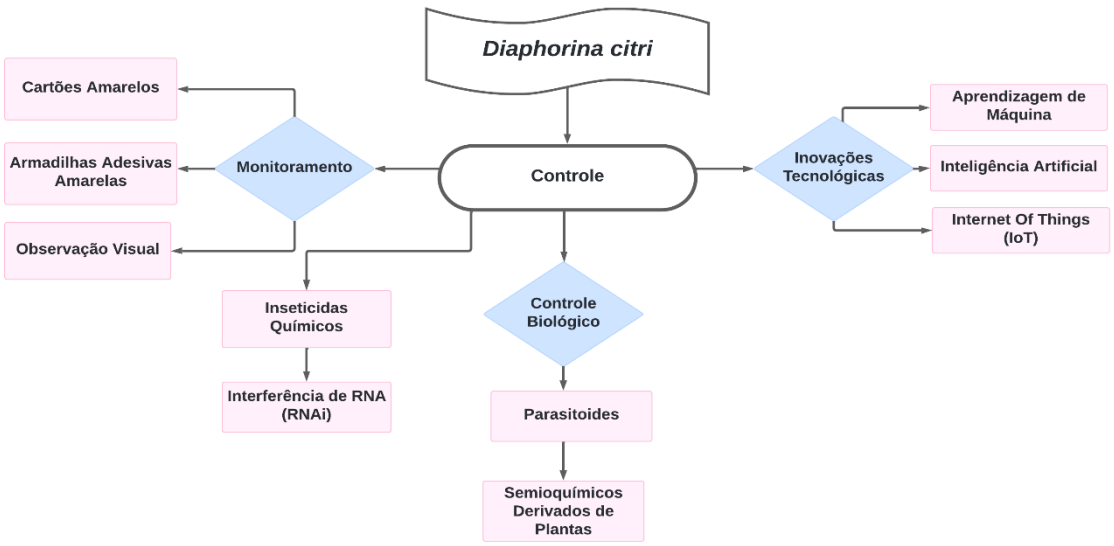


Figura 1. Fluxograma das estratégias de monitoramento, controle e inovações tecnológicas no manejo de *D. citri*.
Fonte. Elaborado pelo autor (2025).

1.2 IoT e suas aplicações na agricultura

A utilização da tecnologia IoT na agricultura inteligente tem sido reconhecida como um meio de melhorar as práticas agrícolas e envolver a geração mais jovem no setor agrícola (Mambang & Marleny, 2022). Além disso, a integração da IoT na agricultura

facilitou o desenvolvimento de sistemas agrícolas inteligentes, como estufas hidropônicas, levando a práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis (Zhang *et al*., 2023).

A tecnologia internet das coisas (IoT) é um conceito no qual um objeto tem a capacidade de transferir dados pela rede sem exigir interação de humano para humano ou de humano para computador, onde os dados são gerados a partir das ferramentas (sensores) anexadas ao objeto selecionado (Fan Tongke, 2013; Nikkilä *et al*., 2010; Mariana *et al*., 2018). Na agricultura, há muitas coisas que podem ser feitas na implementação da IoT, nomeadamente informação sobre água, sobre necessidades de fertilizantes ou sobre o desenvolvimento das plantas que estão a crescer (Gurugubelli *et al*., 2021).

A integração da Internet das Coisas (IoT) na agricultura trouxe avanços e desafios significativos (Tzounis *et al.,* 2017). As tecnologias IoT têm sido utilizadas para abordar questões como o aumento da procura de alimentos, a poluição ambiental e os custos laborais, promovendo assim práticas agrícolas de alta qualidade e alto rendimento (Zhang *et al.,* 2020). A rápida ascensão de ferramentas baseadas na IoT transformou vários setores, incluindo a agricultura, ao permitir estratégias de monitoramento e controle em tempo real (Rehman *et al.,* 2022). Além disso, a utilização de tecnologias IoT e de veículos aéreos não tripulados (UAV) melhorou a eficiência das operações agrícolas, levando ao conceito de agricultura inteligente (Alqarni *et al.,* 2022).

A tecnologia IoT tem sido aplicada para melhorar a eficiência do comércio de produtos agrícolas, com foco em sensores inteligentes e identificação por radiofrequência (RFID) como componentes centrais do sistema de informação de circulação de produtos agrícolas (Ping-da *et al.,* 2022). A IoT tem sido aproveitada para aumentar a produtividade agrícola e os serviços de valor acrescentado, contribuindo para a modernização do sector agrícola (Faghih Khorasani *et al*., 2022; Sadiku *et al.,* 2021). A aplicação da IoT na agricultura também se estendeu ao desenvolvimento de sistemas inteligentes de plantação agrícola, sistemas de gestão de sensores de efeito estufa e sistemas de monitoramento online baseados em computação em nuvem, contribuindo assim para a modernização da agricultura (Chen *et al.,*2018; Li *et al*, 2017). Além disso, a IoT tem desempenhado um papel crucial na gestão da cadeia de abastecimento agrícola verde, demonstrando o seu potencial para futuros sistemas de informação agrícola (Li *et al*., 2011). Globalmente, a integração da IoT na agricultura levou à modernização das

práticas agrícolas, permitindo o monitoramento remoto, a tomada de decisões baseada em dados e a implementação de técnicas agrícolas inteligentes para enfrentar vários desafios agrícolas.

A implementação de sistemas automatizados usando IoT pode ajudar a manter condições ideais para o crescimento das culturas. Esses sistemas podem automatizar a irrigação com base nos níveis de umidade do solo e nas condições climáticas, garantindo o uso eficiente dos recursos hídricos (Patil *et al*., 2019)

1.3 Agropecuária inteligente com IoT e monitoramento de pragas

Agricultura Inteligente é um conceito emergente que utiliza tecnologias modernas na produção agrícola e pecuária para aumentar a produção, quantidade e qualidade, aproveitando ao máximo os recursos e minimizando o impacto ambiental. Isto é demonstrado quando os agricultores e todas as partes interessadas relacionadas com a agricultura utilizam tecnologias modernas e dispositivos inteligentes para monitorar as suas explorações agrícolas e equipamentos. Usando estes dispositivos, também é possível obter estatísticas sobre a alimentação do gado e a produção de culturas (Walter *et al*., 2017; Pivoto *et al.,* 2018; Ayre *et al.,* 2019). Nos últimos anos, a agricultura inteligente tornou-se útil para todos os intervenientes agrícolas, de pequena a grande escala. A agricultura inteligente proporciona benefícios não apenas aos cientistas e agrônomos, mas também aos agricultores no acesso a tecnologias e dispositivos modernos que ajudam na maximização da qualidade e quantidade do produto, ao mesmo tempo que reduzem o custo da agricultura (Walter *et al.,* 2017).

Venkatesan *et al.* (2018) revelou que dispositivos inteligentes baseados em IoT, como sensores sem fio, robôs e drones, estão permitindo que os produtores reduzam significativamente o uso de pesticidas, detectando com precisão pragas e doenças. Em comparação com os procedimentos tradicionais de controle de pragas baseados em calendário ou prescrição, o gerenciamento moderno de pragas baseado em IoT fornece monitoramento, modelagem e previsão de doenças em tempo real, provando-se, portanto, mais eficaz.

Com o avanço da tecnologia e da agricultura, diversos são os investimentos realizados na área de monitoramento, como a criação de aplicativos e plataformas onde

conseguimos realizar a anotação de dados coletados no campo, e até mesmo alguns que utilizam imagens por satélite para orientar a tomada de decisão do produtor. Essas novas plataformas e aplicativos integram informações de clima, densidade de pragas e estádio fenológico da cultura, possibilitando o monitoramento de pragas de forma mais simples e ágil de cada talhão (Mesquita *et al*., 2022).

O sensoriamento remoto de doenças consegue realizar o monitoramento de uma lavoura sem o contato do técnico responsável com o campo, somente com dados obtidos através de imagens aéreas ou de satélite, identificando assim as áreas danificadas por pragas e sua gravidade, mapeando toda a área cultivada (Zhang *et al*., 2019).

Existem numerosos estudos demonstrando a periodicidade de capturas de armadilhas (Potamitis *et al*., 2017). Torrez (2022) avaliou a eficiência de diferentes armadilhas para captura do besouro *Xylosandrus compactus* (Eichhoff) (Coleoptera: Scolytidae), recomendando os modelos IAPAR e PET-SM com isca específica. Lemos (2023) analisou a eficiência de armadilhas de etanol na captura de besouros perfuradores de madeira, sendo a armadilha Roechiling a mais eficaz.

A literatura relatada sobre armadilhas eletrônicas para insetos que empregam sensores ópticos é escassa. Em Hendricks (1985) é relatada a primeira sinergia integrada de uma armadilha com elementos eletrônicos com o objetivo de transferir dados gravados para um computador. Em trabalhos conduzidos por Okuyama *et al*. (2011) e Jiang *et al*. (2008), os autores apresentaram um dispositivo autônomo que contaria e transmitiria contagens do campo de uma praga de frutas muito destrutiva, a mosca da fruta oriental, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae).

Os sistemas baseados em IoT permitem aos agricultores monitorizar remotamente as condições do campo e controlar equipamentos agrícolas através de smartphones ou aplicações web. Isto reduz a necessidade de presença física constante nos campos e ajuda na tomada de decisões oportunas (Raviteja *et al*., 2020; Ahmed *et al.,* 2022).

Os sistemas de Detecção com AIoT (Inteligência Artificial das Coisas) combinam inteligência artificial (IA) e reconhecimento de imagem com sensores ambientais para identificar pragas em tempo real. Utiliza redes neurais convolucionais (YOLOv3) para reconhecimento de imagem e modelos de aprendizado profundo (LSTM) para prever a ocorrência de pragas, alcançando alta precisão na identificação das mesmas (Chen *et al*., 2020).

Os sistemas de monitoramento em nuvem baseados em IoT integram dispositivos conectados a serviços de computação em nuvem para coletar, armazenar e analisar dados provenientes de campos agrícolas. Além disso, utilizam técnicas de aprendizado de máquina para prever surtos de pragas com elevada precisão (Materne *et al*., 2018).

Outra abordagem consiste no uso de armadilhas inteligentes equipadas com câmeras e técnicas de visão computacional para detectar e contabilizar pragas. Esses sistemas integram tecnologias de IoT a modelos de aprendizado profundo, como R-CNN e YOLO, permitindo a obtenção de dados mais precisos sobre a presença e a ocorrência de pragas nas áreas monitoradas (Cardoso *et al*., 2022).

A convergência de tecnologias para ambientes inteligentes e ecossistemas integrados de IoT foi investigada por Vermesan e Friess (2013). O monitoramento da umidade do solo, das vibrações e da densidade da terra para detectar respingos perigosos nas condições do solo foi alcançado pela tecnologia sem fio da IoT. Além destes, o monitoramento das variações do nível da água em barragens, rios e reservatórios também foi analisado utilizando a IoT de forma eficaz.

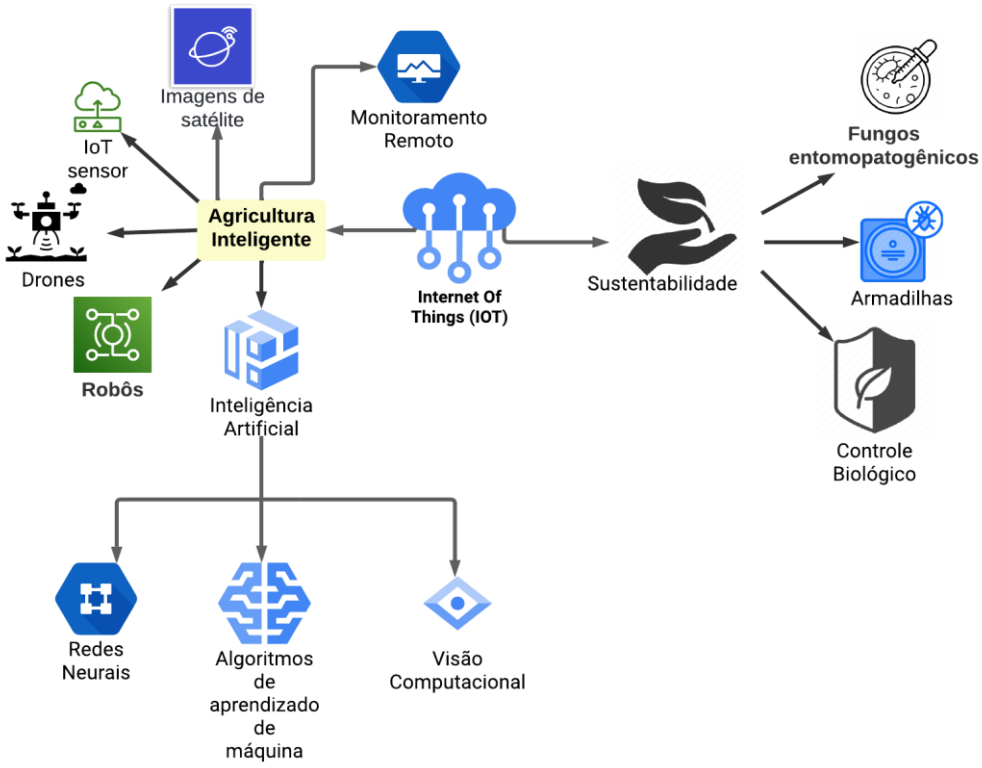


Figura 2. Fluxograma da integração de IoT, IA e Sustentabilidade na Agricultura Inteligente.
Fonte. Elaborado pelo autor (2025)

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração da tecnologia da Internet das Coisas (IoT) na agricultura inteligente tem demonstrado ser uma abordagem revolucionária para enfrentar os desafios da produção agrícola moderna. No manejo do *Diaphorina citri*, vetor da devastadora doença Huanglongbing (HLB) ou greening dos citros, a IoT se apresenta como uma ferramenta importante. A capacidade de monitorar remotamente e em tempo real as populações de pragas, utilizando dispositivos inteligentes como sensores sem fio, drones e robôs, proporciona aos agricultores uma precisão sem precedentes na detecção e controle de pragas. Esta tecnologia não só melhora a eficiência e a sustentabilidade das práticas agrícolas, mas também reduz a dependência de inseticidas químicos, mitigando os riscos de resistência das pragas e impactos ambientais.

Os métodos tradicionais de controle e monitoramento, como o uso de inseticidas e armadilhas físicas, embora ainda desempenhem um papel importante no manejo do *Diaphorina citri*, apresentam limitações diante dos desafios atuais, especialmente em situações de baixa densidade populacional do inseto.

A adoção de estratégias biológicas, como o uso de fungos entomopatogênicos e parasitoides, junto com técnicas de RNAi, oferecem soluções mais sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente. Entretanto, a verdadeira inovação reside na sinergia entre estas abordagens biológicas e as tecnologias avançadas de IoT.

A capacidade de integrar dados de diversas fontes, como imagens de satélite, sensores de campo e algoritmos de aprendizado de máquina, permite um monitoramento mais abrangente e preditivo das condições agrícolas. Sistemas baseados em AIoT (Inteligência Artificial das Coisas) e visão computacional têm demonstrado alta precisão na identificação e previsão de surtos de pragas, possibilitando respostas rápidas e eficientes. A convergência dessas tecnologias não só facilita o manejo de *Diaphorina citri*, mas também promove práticas agrícolas mais inteligentes e resilientes, adaptadas às exigências de um setor em constante evolução.

A agricultura inteligente, apoiada pela IoT e tecnologias emergentes, oferece um caminho promissor para mitigar os impactos do HLB e outras ameaças agrícolas. Ao combinar monitoramento em tempo real, estratégias biológicas inovadoras e análises preditivas, é possível desenvolver um sistema agrícola mais sustentável e eficiente, capaz de atender às demandas globais de produção de alimentos e preservar o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AHMED, Mohamed A. *et al*. 2022. LoRa Based IoT Platform for Remote Monitoring of Large-Scale Agriculture Farms in Chile. ***Sensors***, vol. 22, no. 8, pp. 2824.

ALQARNI, Kahlid S. *et al*. 2022. Authenticated Wireless Links between a Drone and Sensors Using a Blockchain: Case of Smart Farming. ***Wireless Communications and Mobile Computing***, vol. 2022, pp. 1-13.

AMMAR, El-Desouky *et al*. New Excised-Leaf Assay Method to Test Inoculativity of Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: psyllidae) with candidatus liberibacter asiaticus associated with citrus huanglongbing disease. **Journal Of Economic Entomology**, [S.L.], v. 106, n. 1, p. 25-35, 1 fev. 2013. Oxford University Press (OUP).

ANDRADE, Eduardo C. *et al*. RNAi feeding bioassay: development of a non **:**transgenic approach to control asian citrus psyllid and other hemipterans. **Entomologia Experimentalis Et Applicata**, [S.L.], v. 162, n. 3, p. 389-396, 23 fev. 2017. Wiley.

AYRE, Margaret *et al*. 2019. Supporting and practising digital innovation with advisers in smart farming. *NJAS:* ***Wageningen Journal of Life Sciences***, vol. 90-91, no. 1, pp. 1-12.

BELOTI, V. H. *et al*. 2017. Acute toxicity of fresh and aged residues of pesticides to the parasitoid tamarixia radiata and to the hlb-bacteria vector *Diaphorina citri*. ***Neotropical Entomology***, vol. 47, no. 3, pp. 403-411.

BOZKURT, Vildan *et al*. Using yellow sticky traps in control to Cacopsylla pyri (L.) (Hemiptera: psyllidae) on pear trees. Bitki Koruma Bülteni, [S.L.], v. 62, n. 2, p. 36-42, 30 jun. 2022. Plant Protection Bulletin.

BRITT, K. *et al*. 2020. The detection and surveillance of asian citrus psyllid (diaphorina citri)—associated viruses in florida citrus groves. ***Frontiers in Plant Science***, vol. 10.

CARDOSO, Bruno *et al*. 2022. Internet of Things Meets Computer Vision to Make an Intelligent Pest Monitoring Network. *Applied Sciences*, vol. 12, no. 18, pp. 9397.

CHEN, Ching-Ju *et al*. 2020. An AIoT Based Smart Agricultural System for Pests Detection. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 180750-180761.
CHEN, Yunsheng *et al*. 2018. Research on Intelligent Agricultural Planting System Based on Internet of Things Technology. ***Journal of Computer and Communications***, vol. 6, no. 6, pp. 54-60.

CHU, Chia-Ching *et al*. 2016. Inter-Population Variability of Endosymbiont Densities in the Asian Citrus Psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama). ***Microbial Ecology***, vol. 71, no. 4, pp. 999-1007.

COSTA, Gustavo Vaz da *et al*. 2021. Economic impact of Huanglongbing on orange production. ***Revista Brasileira de Fruticultura***, vol. 43, no. 3, pp. 100-159.

FAGHIHKHORASANI, Hanieh *et al*. 2022. Predicting the Impact of Internet of Things on the Value Added for the Agriculture Sector in Iran Using Mathematical Methods. ***Agris On-Line Papers in Economics and Informatics***, vol. 14, no. 3, pp. 17-25.

GRAFTON-CARDWELL, Elizabeth E. *et al*. 2013. Biology and Management of Asian Citrus Psyllid, Vector of the Huanglongbing Pathogens. ***Annual Review of Entomology***, vol. 58, no. 1, pp. 413-432.

GURUGUBELLI, Raja Venkatesh *et al*. 2021. Internet of Things Based Smart Agricultural System for Farmers. ***International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology***, pp. 535-540.

HALL, David G. *et al*. 2010. A comparison of sticky traps for monitoring Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama). ***Crop Protection***, vol. 29, no. 11, pp. 1341-1346.
HENDRICKS, D. E. *et al*. 1985. Portable Electronic Detector System Used with Inverted-Cone Sex Pheromone Traps to Determine Periodicity and Moth Captures. ***Environmental Entomology***, vol. 14, no. 3, pp. 199-204.

HUSSAIN, M. *et al*. 2018. Susceptibilities of *Candidatus* liberibacter asiaticus-infected and noninfected *Diaphorina citri* to entomopathogenic fungi and their detoxification enzyme activities under different temperatures. ***Microbiology Open***, vol. 7, no. 6.

JIANG, Joe-Air *et al*. 2008. A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, Bactrocera dorsalis (Hendel). ***Computers and Electronics in Agriculture***, vol. 62, no. 2, pp. 243-259.

KANGA, L. H. B. *et al*. 2015. Monitoring for insecticide resistance in Asian citrus psyllid (Hemiptera: psyllidae) populations in Florida. ***Journal of Economic Entomology***, vol. 109, no. 2, pp. 832-836.

KHAN, S. Z. *et al*. 2014. Phenology of Asian citrus psyllid (Hemiptera: liviidae) and associated parasitoids on two species of citrus, Kinnow mandarin and sweet orange, in Punjab Pakistan. ***Environmental Entomology***, vol. 43, no. 5, pp. 1145-1156.

KISTNER, Erica J. *et al*. 2016. Phenology of Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: liviidae), with special reference to biological control by Tamarixia radiata, in the residential landscape of southern California. ***Journal of Economic Entomology***, vol. 109, no. 3, pp. 1047-1057.
LI, Lin *et al*. Application of the Internet of Thing in Green Agricultural Products Supply Chain Management. **2011 Fourth International Conference On Intelligent Computation Technology And Automation**, [S.L.], p. 1022-1025, mar. 2011. IEEE.

LI, Xue *et al*. Controlling Citrus Huanglongbing: green sustainable development route is the future. **Frontiers In Plant Science**, [S.L.], v. 12, p. 567-585, 15 nov. 2021.

M, Mambang *et al*. Platform Digital and Content Innovation to Increase Youth Interest in the Agricultural Sector. **Jurnal Resti (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 281-288, 29 abr. 2022. Ikatan Ahli Informatika Indonesia (IAII).

MARQUES, Viviani Vieira *et al*. Advances and Challenges in RNA Interference Technology for Citrus Huanglongbing Vector Control. **Horticulturae**, [S.L.], v. 7, n. 9, p. 277, 2 set. 2021. MDPI AG.

MATERNE, N., *et al*., 2018. Potential of IoT System and Cloud Services for Predicting Agricultural Pests and Diseases. ***IEEE Region Ten Symposium (Tensymp)***, vol. 5, no. 1, pp. 345-378.

MESQUITA, A. L. M., *et al*., 2022. Avaliação de métodos para estimar a infestação da Traça-da-castanha em estudo sobre a resposta de clones de cajueiro ao ataque da praga. ***Brazilian Journal of Development***, pp. 58795-58802.

MEYER, J. M., *et al*., 2008. Molecular Survey of Endosymbionts in Florida Populations of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) and its parasitoids *Tamarixia radiata* (Hymenoptera). ***Florida Entomologist***, vol. 91, no. 2, pp. 294-304.

MIRANDA, M. H. G. d., *et al*., 2017. Monitoring methods for *Diaphorina citri Kuwayama* (Hemiptera: Liviidae) on citrus groves with different insecticide application programmes. ***Journal of Applied Entomology***, vol. 142, no. 1-2, pp. 89-96.

MIRANDA, M. H. G. d., *et al*., 2018. Processed kaolin affects the probing and settling behavior of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). ***Pest Management Science***, vol. 74, no. 8, pp. 1964-1972.

MONZO, C., *et al*., 2015. Sampling Methods for Detection and Monitoring of the Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: Psyllidae). ***Environmental Entomology***, vol. 44, no. 3, pp. 780-788.

NAMANA, M., *et al*., 2022. Internet of Things for Smart Agriculture – State of the Art and Challenges. ***Ecological Engineering & Environmental Technology***, vol. 23, no. 6, pp. 147-160.

NOURI, S., *et al*., 2016. Diverse array of new viral sequences identified in worldwide populations of the Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri*) using viral metagenomics. ***Journal of Virology***, vol. 90, no. 5, pp. 2434-2445.

OLIVEIRA, J. M. C. d., *et al*., 2013. Estimativa dos impactos econômicos decorrentes de eventual introdução do huanglongbing (HLB) no estado da Bahia. ***Revista Brasileira de Fruticultura***, vol. 35, no. 3, pp. 755-762.

OKUYAMA, T., *et al*., 2011. Using automated monitoring systems to uncover pest population dynamics in agricultural fields. ***Agricultural Systems***, vol. 104, no. 9, pp. 666-670.

PATIL, S. N., *et al*., 2019. Smart Agriculture Monitoring System Using IOT. ***IJARCCE***, vol. 8, no. 4, pp. 116-120.

PATT, J. M., *et al*., 2018. Exogenous application of the plant signalers methyl jasmonate and salicylic acid induces changes in volatile emissions from citrus foliage and influences the aggregation behavior of Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri*), vector of huanglongbing. ***PLOS ONE***, vol. 13, no. 3, pp. e0193724.

PELZ-STELINSKI, K. S., *et al*., 2016. Patterns of habitat use by the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, as influenced by abiotic and biotic growing conditions. ***Agricultural and Forest Entomology***, vol. 19, no. 2, pp. 171-180.

PINGDA, W., *et al*., 2022. The Impact of Agricultural Information System on Agricultural Product Trading Efficiency Using Internet of Things Technology. ***Mathematical Problems in Engineering***, vol. 2022, pp. 1-11.

PIVOTO, D., *et al*., 2018. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. ***Information Processing in Agriculture***, vol. 5, no. 1, pp. 21-32.
POTAMITIS, I., *et al*., 2017. Automated Remote Insect Surveillance at a Global Scale and the Internet of Things. ***Robotics*****,** vol. 6, no. 3, pp. 19.

PULLOCK, D. A., *et al*., 2024. Addition of selected plant-derived semiochemicals to yellow sticky traps does not improve citrus psyllid captures. ***Journal of Chemical Ecology*****.**

QURESHI, J. A., *et al*., 2017. Single and Multiple Modes of Action Insecticides for Control of Asian Citrus Psyllid and Citrus Leafminer. ***HortScience***, vol. 52, no. 5, pp. 732-735.

RAVITEJA, K., *et al*., 2020. IoT-Based Agriculture Monitoring System. ***Advances in Intelligent Systems and Computing***, pp. 473-483.

REHMAN, A., *et al*., 2022. A Revisit of Internet of Things Technologies for Monitoring and Control Strategies in Smart Agriculture. ***Agronomy***, vol. 12, no. 1, pp. 127.

ROCHA, J. G. d., *et al*., 2017. Fenologia de tangerina cv. Ponkan (*Citrus reticulata Blanco*) correlacionada aos insetos-pragas em Anápolis-GO. ***Revista Agrogeoambiental***, vol. 9, no. 2, pp. 47-59.

RODRIGUES, L. L. S., *et al*., 2020. Fronteiras e conexões em *Economia e Gestão de Inovação* no Agronegócio. ***Organizações Rurais e Agroindustriais***, vol. 22, pp. 91-106.

SCHUTTE, M., *et al*., 2012. Dynamics of pathogens transmitted by the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). ***Entomologia Experimentalis et Applicata***, vol. 143, no. 1, pp. 104-110.
SILVA, S. D. S., *et al*., 2020. Simulação de sistemas de aquisição de dados para *Diaphorina citri* em campos de citros utilizando arduino. ***Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas***, vol. 14, no. 3, pp. 307-317.

SINGH, P., *et al*., 2022. Real-time IoT-based monitoring system for Citrus tristeza virus detection using the combination of multiplex PCR and biosensor technology. ***Journal of Plant Diseases and Protection***, vol. 129, no. 2, pp. 287-299.

SIVARAJ, G., *et al*., 2020. Automated smart agriculture monitoring system using IoT. *Materials Today:* ***Proceedings***, vol. 21, no. 3, pp. 1071-1074.

TAKIYA, D. M., *et al*., 2006. Phylogenetic analysis and molecular diagnosis of the huanglongbing (greening) in the Americas, Asia, and Africa. ***Phytopathology***, vol. 96, no. 11, pp. 1408-1414.

TAKEYAMA, N., *et al*., 2014. Prediction of Citrus Greening Disease in an Organic Orchard Using the Internet of Things (IoT) and Machine Learning. ***International Journal of Environmental Research and Public Health***, vol. 11, no. 1, pp. 121-136.

THAPA, S., *et al*., 2017. Insecticide resistance and the management of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). ***Pest Management Science***, vol. 73, no. 9, pp. 1985-1996.

VANACLOCHA, P., *et al*., 2019. Evaluating the use of white and yellow sticky traps for monitoring *Diaphorina citri* Kuwayama populations. ***Journal of Economic Entomology***, vol. 112, no. 2, pp. 794-801.

VÉLEZ, Ana M. *et al*. Insecticidal proteins and RNAi in the control of insects**.** ***Advances In Insect Physiology***, [S.L.], p. 1-54, 2023. Elsevier.

WANG, N., *et al*., 2017. Current understanding of citrus huanglongbing. ***Annual Review of Phytopathology***, vol. 55, no. 1, pp. 409-432.

WANG, Z., *et al*., 2018. The use of internet of things (IoT) technology to detect citrus greening disease (huanglongbing) in China. ***Computers and Electronics in Agriculture***, vol. 154, pp. 81-86.

WU, F., *et al*., 2022. A smart detection system for *Diaphorina citri* with the Internet of Things. ***IEEE Internet of Things Journal***, vol. 9, no. 12, pp. 9166-9175.

YANG, C., *et al*., 2016. Development of a smart agricultural monitoring system based on wireless sensor networks. ***Computers and Electronics in Agriculture***, vol. 124, pp. 88-99.

ZHANG, M. Q., *et al*., 2013. The genetic diversity and population structure of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) from China. ***Insect Science***, vol. 20, no. 3, pp. 347-355.

ZHU, Y., *et al*., 2020. Application of the Internet of Things (IoT) in monitoring and controlling diseases in plants and animals. ***Journal of Network and Computer Applications***, vol. 170, pp. 102809.

CAPÍTULO II

Perfil dos Citricultores e Práticas de Monitoramento de *Diaphorina citri* no Noroeste do Paraná, Brasil

*Artigo submetido à revista Brazilian Journal of Biology

RESUMO

A citricultura possui grande importância para a agricultura brasileira; entretanto, enfrenta desafios significativos relacionados ao controle de pragas e doenças, especialmente o Huanglongbing (HLB), ou greening, transmitido por *Diaphorina citri*, uma das pragas mais destrutivas da citricultura mundial. Por meio de entrevistas com produtores, este estudo buscou identificar os principais desafios enfrentados no manejo de pragas e reunir informações que possam contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de monitoramento e controle. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar o perfil dos citricultores e investigar as práticas utilizadas para o monitoramento de *D. citri*, buscando compreender os métodos de controle adotados e a frequência das estratégias empregadas. A pesquisa foi realizada na região noroeste do estado do Paraná, Brasil, envolvendo 20 propriedades rurais localizadas nos municípios de Altônia, Cruzeiro do Oeste, Paranavaí, São Jorge do Patrocínio e Umuarama. A coleta de dados foi realizada por meio de questionários aplicados aos produtores rurais locais, com o objetivo de investigar as práticas de manejo, o uso de tecnologias e as estratégias de controle de pragas. A maioria das propriedades é de pequeno porte (≤ 5 hectares), e o monitoramento visual de pragas é o método mais utilizado (65%), seguido pelo uso de armadilhas adesivas amarelas (20%). Os dados demonstram que o uso de tecnologias digitais ainda é limitado na região. A maioria dos produtores utiliza telefones celulares apenas para comunicação com fornecedores e acesso às redes sociais (75%), enquanto apenas 5% utilizam a internet para atividades integradas, como o monitoramento. O uso intensivo de produtos químicos foi relatado por todos os produtores, enquanto métodos sustentáveis, como o controle biológico, ainda são pouco explorados. De acordo com os relatos dos produtores, a erradicação de plantas atribuída ao HLB foi necessária em 95% das propriedades; ressalta-se que a ocorrência de HLB não foi confirmada por diagnóstico laboratorial no presente estudo. Com base nesses resultados, a limitada adoção de ferramentas digitais identificada neste estudo sugere que sistemas de monitoramento baseados em Internet das Coisas (IoT) podem representar uma linha de pesquisa promissora para futuros estudos sobre o monitoramento de pragas e doenças na citricultura. Entretanto, tais tecnologias não foram desenvolvidas nem avaliadas no presente estudo, e sua viabilidade nas condições de pequenas propriedades citrícolas do noroeste do Paraná ainda precisa ser investigada.

Palavras-chave: Automação. Armadilhas inteligentes. Manejo integrado de pragas. Inovação tecnológica.

1 INTRODUÇÃO

A citricultura é uma atividade agrícola de grande relevância para a economia global, desempenhando um papel essencial na produção de frutas e no desenvolvimento socioeconômico (Cabot et al., 2022). No entanto, enfrenta sérios desafios, especialmente no que diz respeito ao controle de pragas e doenças que afetam diretamente a produtividade e a qualidade dos frutos (Mokrini et al., 2025). Entre essas ameaças, destaca-se *D. citri*, vetor do Huanglongbing (HLB), também conhecido como greening, uma das doenças mais devastadoras que afetam a citricultura em todo o mundo (Li et al., 2020; Wang et al., 2025).

O HLB, ou greening, é causado pela bactéria gram-negativa não cultivável Candidatus Liberibacter asiaticus, que coloniza o floema das plantas e é naturalmente transmitida por vetores artrópodes, como o psilídeo-asiático-dos-citros, *D. citri*. Identificada há mais de um século no Sudeste Asiático (Zhang, 2021), essa doença apresenta elevada capacidade de disseminação e causa grandes perdas econômicas. No Brasil, a erradicação das fontes de inóculo é obrigatória devido ao potencial devastador da doença. Estima-se que o HLB cause perdas de aproximadamente US$ 1 bilhão por ano na Flórida, Estados Unidos, demonstrando seu impacto econômico (Li et al., 2020). A extensa literatura agronômica e fitopatológica evidencia o elevado potencial de danos causado pelo HLB (Li et al., 2021).

Estudos sobre a dispersão do vetor *D. citri* (Hemiptera: Psylloidea: Liviidae) indicam que seu deslocamento pode ocorrer em curtas distâncias, geralmente entre blocos de árvores ou talhões adjacentes, embora também possam ocorrer deslocamentos por distâncias maiores (Stelinski et al., 2019). Essas ocorrências esporádicas sugerem que o patógeno pode ter sido introduzido por mecanismos de transporte atmosférico ou pela atividade do vetor a longas distâncias, potencialmente contornando os padrões espaciais mais previsíveis de disseminação de propriedade para propriedade vizinha (Luchi et al., 2020). Essa dispersão a longa distância representa um desafio para o controle da doença, exigindo medidas preventivas rigorosas.

No Brasil, o controle do HLB envolve a eliminação obrigatória de plantas sintomáticas para reduzir as fontes de inóculo (Andrade et al., 2021). Esse processo deve ser realizado de forma rápida e contínua durante o monitoramento da cultura,

complementado pelo controle do vetor e pelo uso de mudas sadias provenientes de viveiros protegidos por telas de malha fina, a fim de impedir a entrada do psilídeo (Alves et al., 2021). A legislação brasileira estabelece que, uma vez identificados os sintomas de HLB, a erradicação das plantas infectadas torna-se obrigatória, reforçando a importância das medidas preventivas e da inspeção para o controle bem-sucedido da doença (Andrade et al., 2021).

O Estado do Paraná possui expressiva participação no setor citrícola, sendo seu clima favorável e seu solo fértil características que o tornam uma região adequada para o cultivo de diversas espécies cítricas (Costa et al., 2020). A produção de citros na região desempenha papel significativo no cenário agrícola e na economia do estado, contribuindo para o sustento de muitas comunidades locais (Carvalho et al., 2022). Em alguns municípios do noroeste do Paraná, a citricultura enfrenta limitações específicas, uma vez que predominam pequenas propriedades de até cinco hectares, representando aproximadamente 35% do total. Nessas áreas, métodos convencionais de monitoramento, como a inspeção visual, são comumente utilizados. Embora sejam eficazes na detecção de sintomas aparentes, esses métodos podem não identificar o HLB em seus estágios iniciais, comprometendo, dessa forma, o controle da disseminação da doença.

Nesse contexto, esta pesquisa buscou avaliar o perfil dos citricultores, a forma como lidam com as limitações tecnológicas e o potencial de otimização dos métodos de manejo.

O uso de tecnologias digitais na citricultura regional permanece limitado, refletindo uma lacuna na adoção de ferramentas e sistemas informatizados (Internet das Coisas - IoT) que poderiam melhorar a eficiência do monitoramento e do controle de pragas (Mendes et al., 2022). Apesar do crescente acesso a telefones celulares e à internet, apenas uma pequena parcela dos produtores utiliza esses recursos para operações avançadas, como o controle de equipamentos e o monitoramento digital. Essa limitação sugere a necessidade de políticas de incentivo e programas de capacitação voltados à inclusão digital dos produtores, o que é essencial para promover práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

O estudo também revelou a predominância do uso de agrotóxicos químicos, relatado em 100% das propriedades avaliadas. Esse resultado reforça a importância de iniciativas de capacitação e assistência técnica que promovam o conhecimento e a adoção de estratégias complementares de manejo, incluindo o controle biológico e a rotação de

culturas, como alternativas para fortalecer o manejo integrado de pragas (Olivera et al., 2026). Fatores como o aumento da resistência das pragas e a ausência de controle eficaz em propriedades vizinhas intensificam as dificuldades associadas ao manejo sustentável. O fortalecimento das práticas de manejo integrado de pragas e a criação de redes de cooperação entre produtores podem contribuir para reduzir a incidência de pragas e doenças, incluindo o HLB, promovendo, a longo prazo, uma citricultura mais saudável e competitiva.

Por meio da coleta e análise de dados detalhados, este estudo identificou oportunidades de intervenção destinadas a melhorar a sustentabilidade, a eficiência e o desenvolvimento tecnológico do setor citrícola no noroeste do Paraná, Brasil. Os resultados destacam a importância de fortalecer as práticas de monitoramento e adotar tecnologias inovadoras para apoiar uma produção citrícola mais eficaz e sustentável. Como hipótese a ser testada em pesquisas futuras, o desenvolvimento e a implementação de sistemas de monitoramento baseados em Internet das Coisas (IoT) poderiam, em princípio, contribuir para a automação da vigilância de pragas, a melhoria da coleta de dados e a identificação oportuna de *D. citri*, o inseto vetor associado ao HLB.

Considerando a complexidade do manejo do HLB e a necessidade de estratégias integradas envolvendo o patógeno, o hospedeiro e o vetor, soluções tecnológicas que aprimorem o monitoramento e apoiem a tomada de decisões fundamentadas podem representar um passo importante para um manejo mais eficiente da doença (Ghosh et al., 2022; Thakuria et al., 2023; Boa et al., 2023).

Assim, os resultados fornecem um diagnóstico de base que poderá orientar pesquisas futuras destinadas a avaliar se as tecnologias de monitoramento baseadas em IoT são viáveis e eficazes nas condições da citricultura da região.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delimitação geográfica dos municípios do Paraná com ocorrência da Huanglongbing- HLB (*Greening*)

A delimitação geográfica desta pesquisa compreendeu a Unidade Local de Sanidade da Citricultura da ADAPAR – Agência de Defesa Agropecuária do Paraná, em Umuarama, Paraná, que abrange os municípios de Altônia-PR, Cruzeiro do Oeste-PR, São Jorge do Patrocínio-PR, Umuarama-PR e Paranavaí-PR (Figura 1).

Os dados referentes às culturas cítricas no estado do Paraná, na região Noroeste e nos municípios selecionados, bem como as informações relativas às propriedades produtoras de citros, foram obtidos a partir de informações fornecidas pela Agência de Defesa Agropecuária do Paraná (ADAPAR) e pelo Departamento de Economia Rural (DERAL), ambos subordinados à Secretaria da Agricultura e do Abastecimento (SEAB).

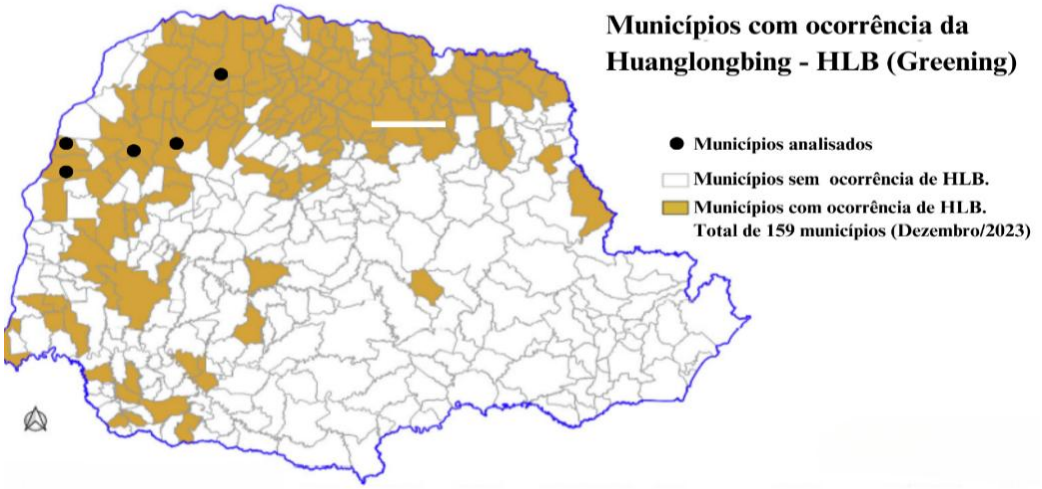


Figura 1. Municípios com ocorrência de HLB (Greening)

2.2 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada por meio de visitas a propriedades rurais situadas nos municípios de Altônia, São Jorge do Patrocínio, Paranavaí, Cruzeiro do Oeste e Umuarama, no Paraná, Brasil, sob a jurisdição da Unidade Local de Sanidade de Citros da ADAPAR em Umuarama. O número total de propriedades produtoras de citros registradas nos cinco municípios era de 20. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, que incluíam produção ativa de citros e histórico de inspeções sanitárias, todas as propriedades foram consideradas elegíveis para participação.

A seleção das propriedades não foi aleatória. Baseou-se em informações oficiais fornecidas pelo órgão, que mantém um cadastro completo de citricultores na região noroeste do Paraná. A partir dessa base de dados, foram selecionadas propriedades com produção ativa de citros, histórico de inspeções sanitárias e diferentes perfis de produção, levando-se em conta a área plantada e os sistemas de manejo.

A taxa de resposta foi calculada da seguinte forma:

$$RR = \left(\frac{Npp}{Niep}\right) x\ 100$$

Onde:

RR: Taxa de resposta (%)

Npp: Número de propriedades participantes

Niep: Número de propriedades elegíveis convidadas

O tamanho da amostra foi definido com base na disponibilidade de propriedades citrícolas cadastradas e na viabilidade de realização de visitas a campo e entrevistas. Visto que o estudo utilizou uma abordagem de amostragem intencional, os resultados visam descrever os citricultores participantes e suas práticas de manejo, em vez de fornecer estimativas estatisticamente generalizáveis para toda a população de citricultores.

Essa diversidade permitiu captar a heterogeneidade da citricultura local, proporcionando um panorama abrangente das práticas adotadas na região noroeste do Paraná, particularmente no contexto do manejo do HLB.

Durante as visitas, foram realizadas entrevistas presenciais e aplicados formulários eletrônicos, por meio dos quais os objetivos da pesquisa foram explicados aos agricultores. Esta pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (CEPEH) da Universidade Paranaense (Unipar), sob o Protocolo nº 76348523.3.0000.0109.

O instrumento de pesquisa consistiu em um questionário semiestruturado, desenvolvido especificamente para este estudo com base na literatura científica e em diretrizes técnicas relacionadas ao manejo de *D. citri*. O questionário foi composto predominantemente por perguntas fechadas, permitindo a quantificação e a comparação de dados, bem como por perguntas abertas destinadas a captar as percepções, dificuldades e experiências individuais dos produtores. As questões abordaram temas como práticas de manejo, métodos de monitoramento, controle de pragas, uso de tecnologia, custos operacionais e desafios enfrentados na citricultura.

As respostas obtidas foram posteriormente codificadas, organizadas em planilhas eletrônicas e transformadas em variáveis passíveis de análise, viabilizando tanto análises quantitativas quanto qualitativas. Além das entrevistas, foram realizadas observações diretas em campo para registrar as condições da cultura, a presença da praga e as práticas operacionais, com o objetivo de complementar e validar as informações fornecidas pelos produtores.

O questionário incluiu perguntas de múltipla escolha com resposta única e perguntas de múltipla escolha com múltiplas respostas, conforme a natureza de cada

variável. As perguntas de resposta única abrangeram variáveis de perfil do respondente e características da propriedade (município, tamanho da propriedade e método de monitoramento da praga). As perguntas de múltiplas respostas foram aplicadas a variáveis relacionadas a métodos de controle de pragas, fontes de informação sobre monitoramento e controle, causas de erradicação de plantas cítricas e práticas de prevenção de pragas, permitindo que cada produtor selecionasse todas as alternativas aplicáveis à sua propriedade. Para esses itens, as frequências apresentadas nos resultados correspondem à porcentagem de respondentes que citaram cada alternativa; portanto, a soma das porcentagens pode ultrapassar 100%.

A amostra do estudo incluiu propriedades dos cinco municípios e de diferentes escalas de produção. No entanto, como a seleção foi não probabilística e o tamanho da amostra limitou-se a 20 propriedades, os resultados devem ser interpretados como descritivos dos produtores participantes e das práticas de manejo por eles relatadas. As conclusões não devem ser consideradas estatisticamente representativas de todas as propriedades citrícolas do noroeste do Paraná.

Assim, as conclusões fornecem evidências contextuais sobre as práticas de monitoramento e manejo de pragas na área de estudo, em vez de estimativas em nível populacional. É importante ressaltar que os dados sobre a ocorrência de pragas e doenças, incluindo o HLB, foram obtidos exclusivamente a partir de relatos dos produtores, sem a realização de confirmação laboratorial (por exemplo, diagnóstico molecular via PCR ou testes sorológicos) no presente estudo. Na região noroeste do Paraná, o diagnóstico do HLB e a erradicação obrigatória de plantas sintomáticas são realizados e supervisionados por órgãos oficiais de fiscalização fitossanitária (ADAPAR); portanto, os relatos dos produtores foram considerados indicativos da ocorrência da doença conforme gerenciada pelo sistema oficial de fiscalização, não constituindo diagnósticos confirmados por este estudo.

2.3 Análise dos dados

A análise dos dados coletados foi realizada por meio de abordagens quantitativas e qualitativas, com base nas informações obtidas nas entrevistas com os citricultores e em observações diretas feitas durante visitas às propriedades rurais.

As informações coletadas foram apresentadas em formato de gráfico, permitindo uma visualização clara e objetiva dos padrões e tendências observados nas práticas de manejo, controle de pragas, monitoramento e uso de tecnologia.

Além disso, realizou-se uma análise interpretativa dos resultados, buscando identificar as principais práticas adotadas pelos produtores, suas dificuldades e as possíveis melhorias a serem implementadas. Esses dados foram discutidos à luz da literatura existente, visando embasar as conclusões e as propostas de ações voltadas ao fortalecimento da citricultura na região analisada.

3 RESULTADOS

3.1 Perfil do Produtor

A análise do tamanho das propriedades, em hectares, revelou a seguinte distribuição: menos de 5 hectares: 35%; entre 5 e 10 hectares: 25%; entre 10 e 20 hectares: 15%; mais de 20 hectares: 25% (Figura 2B). Esses dados indicam que a maioria das propriedades é de pequeno porte, com até 5 hectares, representando 35% do total analisado. O número significativo de propriedades com menos de 5 hectares sugere a predominância de pequenos produtores na região.

Os métodos de monitoramento de pragas adotados pelos produtores foram os seguintes: monitoramento visual regular: 65%; armadilhas adesivas amarelas: 20%; amostragem de frutos: 10%; inspeções com lupa: 5%. O monitoramento visual regular foi a técnica mais utilizada, adotada por 65% dos produtores. O uso de armadilhas adesivas amarelas, escolhido por 20% dos respondentes, foi o segundo método mais utilizado. Técnicas mais específicas, como a amostragem de frutos e as inspeções com lupa, apresentaram adoção mais limitada, correspondendo a 10% e 5%, respectivamente (Figura 2C). Os resultados refletem um cenário caracterizado pela predominância de pequenas propriedades produtoras de citros na região noroeste do Paraná. Essa configuração pode representar um fator limitante para a adoção de técnicas de monitoramento mais sofisticadas. A predominância do monitoramento visual regular, adotado por 65% dos respondentes, é consistente com a realidade das pequenas propriedades, que geralmente dispõem de menos recursos para implementar métodos mais avançados de manejo integrado de pragas.

O uso de armadilhas adesivas amarelas por 20% dos produtores pode indicar uma tendência inicial de adoção de práticas de monitoramento mais sustentáveis e precisas, embora essa técnica ainda seja considerada secundária na região. O baixo uso da

amostragem de frutos e das inspeções com lupa sugere que esses métodos podem ser percebidos como menos práticos ou economicamente viáveis pelos produtores locais.

Os dados apresentados são importantes para orientar políticas de apoio e extensão rural que possam incentivar a adoção de métodos de controle do HLB mais eficientes, tecnológicos e sustentáveis, especialmente em pequenas propriedades, onde os recursos para o uso de tecnologias de monitoramento são mais limitados.

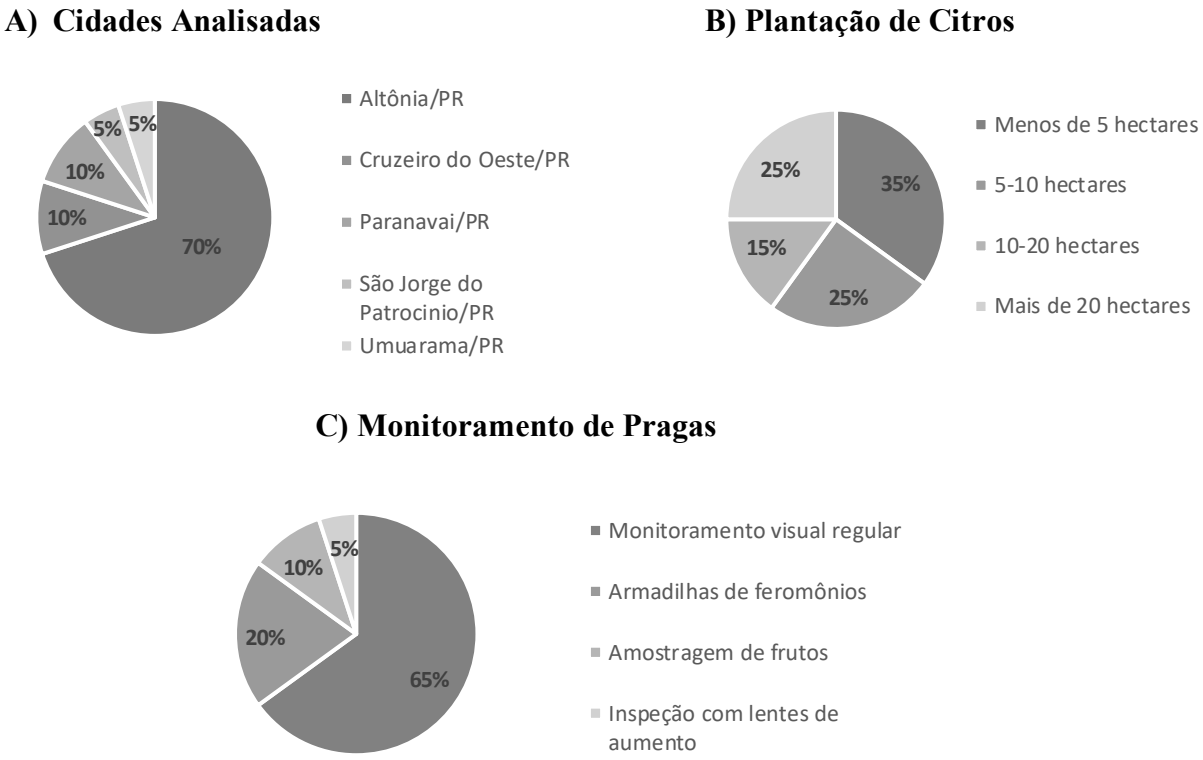


Figura 2. Conjunto de gráficos ilustrando dados sobre as plantações de citrus na região noroeste: A) Localização das Plantações de Citros: B) Tamanho das Plantações em Hectares: C) Métodos de Monitoramento das Plantações.

3.2 Uso de Tecnologia e Monitoramento

Quando questionados sobre o uso de telefones celulares nas propriedades rurais, os respondentes apresentaram as seguintes respostas: somente para ligações telefônicas ocasionais: 25%; para comunicação com compradores e fornecedores: 74%; para acesso à internet e controle de equipamentos agrícolas: 1%; não utiliza telefone celular: 0% (Figura 3A).

Em relação ao uso da internet, os respondentes indicaram: somente para acesso às redes sociais e entretenimento: 65%; para pesquisa de mercado, aquisição de insumos e

gestão financeira: 30%; para todas as atividades, desde o monitoramento até as vendas on-line: 5% (Figura 3B).

Quanto ao tipo de tecnologia considerado mais útil nas propriedades rurais: equipamentos agrícolas básicos sem conectividade: 10%; máquinas agrícolas com algum nível de automação: 15%; sensores e equipamentos para monitoramento e manejo de precisão: 5%; não utiliza tecnologia na propriedade rural: 70% (Figura 3C).

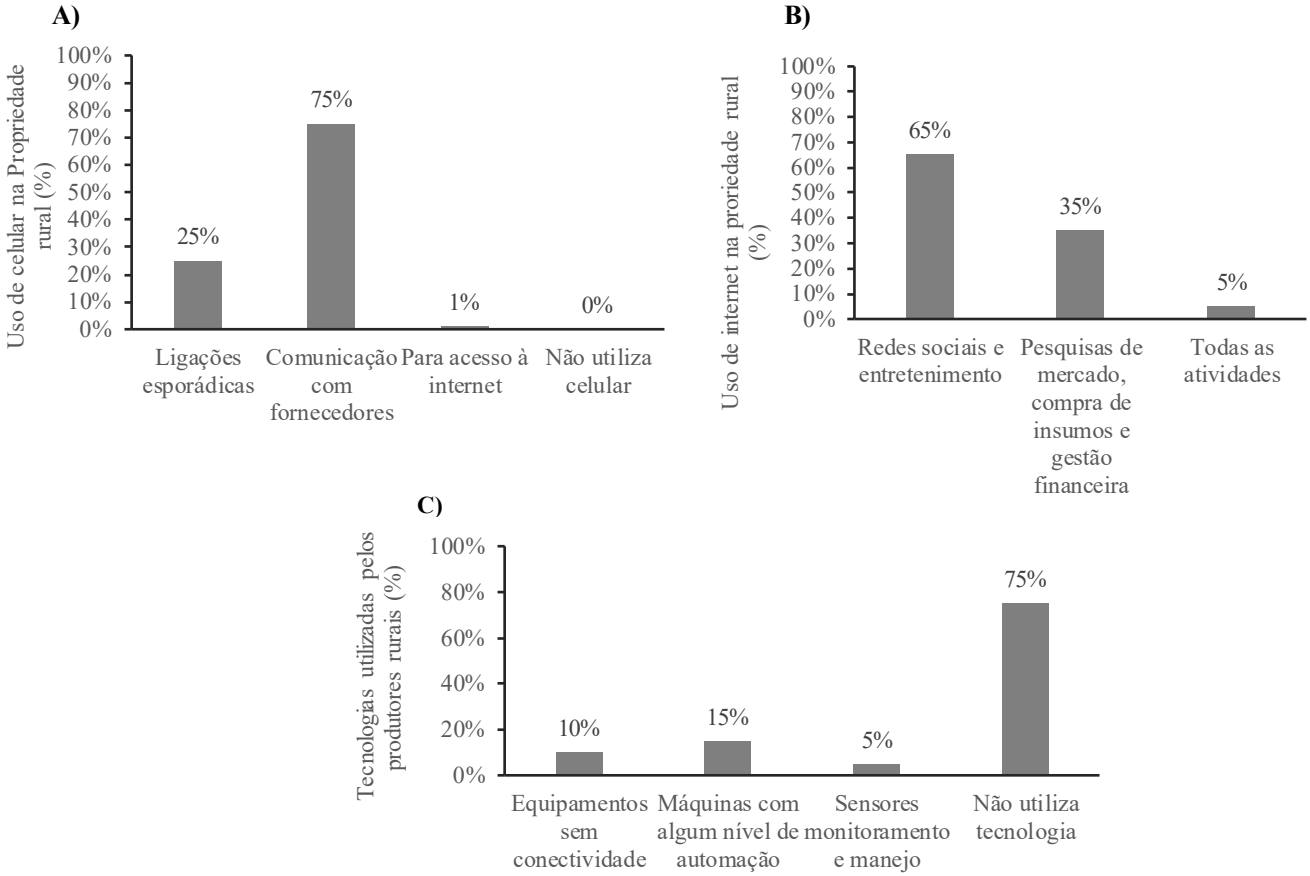


Figura 3. **A)** Uso de celular na propriedade rural; **B**) Uso da internet na propriedade rural; **C**) Tecnologias utilizadas pelos produtores rurais.

Os métodos de controle de pragas aplicados são: uso de agrotóxicos químicos: 100%; controle biológico: 15%; uso de armadilhas: 80%; rotação de culturas: 25%. Todos os produtores entrevistados utilizam herbicidas e já tiveram que realizar a erradicação de plantas cítricas devido a infestações severas (Figura 4).

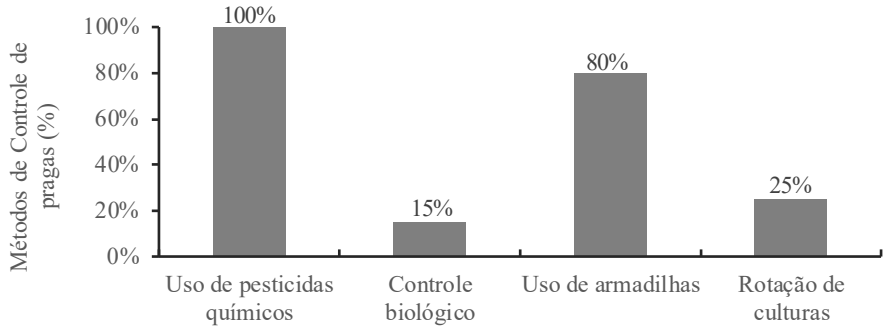


Figura 4. Métodos de controle de pragas utilizados pelos agricultores

De acordo com os relatos dos produtores, as causas mais frequentes de erradicação de plantas foram: HLB (Greening), relatado por 95% dos produtores; cancro cítrico: 10%; moscas-das-frutas: 15%; cochonilhas: 10% (Figura 5).

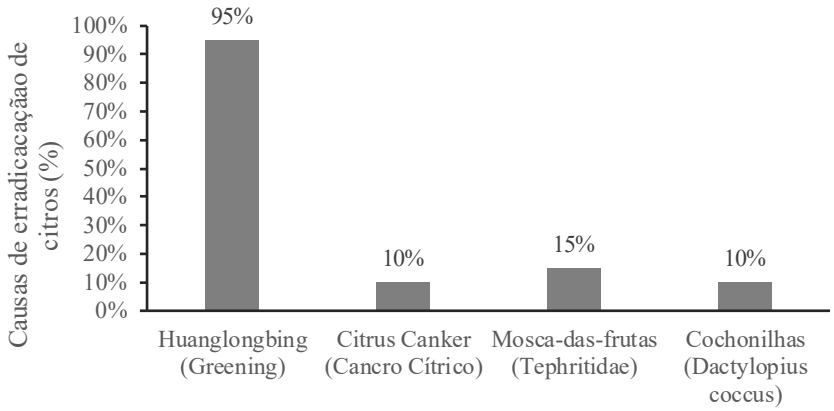


Figura 5. Causas da erradicação de plantas cítricas (com base nas informações autorrelatadas pelos produtores; sem confirmação laboratorial)

Destaca-se uma das áreas de cultivo de citros erradicada no município de Altônia-PR em decorrência da incidência de Huanglongbing (HLB), doença associada à bactéria *Candidatus Liberibacter asiaticus* e transmitida pelo psilídeo asiático dos citros, *Diaphorina citri*. A imagem evidencia os impactos fitossanitários e econômicos causados pela doença, que frequentemente exige a eliminação de plantas infectadas como medida para reduzir a disseminação do patógeno nos pomares. A erradicação de áreas produtivas representa uma das principais consequências do avanço do HLB, resultando em redução da produtividade, aumento dos custos de manejo e comprometimento da sustentabilidade da cadeia citrícola regional (Figura 6).



Figura 6. Imagem de uma plantação de laranjeiras erradicada em Altônia-PR devido ao avanço da doença Huanglongbing (HLB).
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para prevenir a ocorrência de pragas, os produtores usam as seguintes práticas: uso de mudas certificadas: 100%; implementação de boas práticas agrícolas: 35%; inspeções regulares: 65%; treinamento de pessoal: 15%. Todos os entrevistados afirmaram compreender a importância do monitoramento sustentável na redução do uso de agrotóxicos e na proteção do meio ambiente (Figura 7).

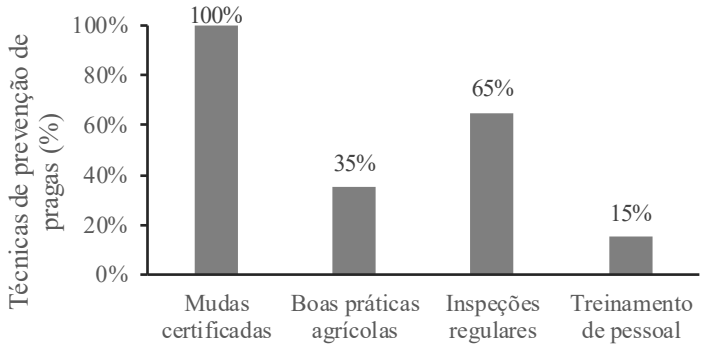


Figura 7. Técnicas de prevenção de pragas

As principais fontes de informação sobre o monitoramento e o controle de pragas foram: técnicos agrícolas: 95%; publicações científicas: 10%; produtores vizinhos: 5%; internet: 10%; Fundecitrus: 5%; consultores: 5%. Além disso, todos os entrevistados já haviam participado de algum treinamento ou curso relacionado ao monitoramento de pragas em pomares cítricos (Figura 8).

Os principais desafios identificados pelos produtores incluem: diversidade de pragas e seu monitoramento; detecção precoce e identificação precisa das pragas; propriedades vizinhas que não realizam o controle de pragas; resistência aos agrotóxicos; falta de mão de obra qualificada e confiável; e o custo e o tempo necessários para a inspeção dos pomares.

Em relação à percepção sobre o setor da citricultura, os produtores relataram que o nível tecnológico do setor é baixo, especialmente no que se refere ao monitoramento de pragas, ao uso de tratores e aos implementos agrícolas.

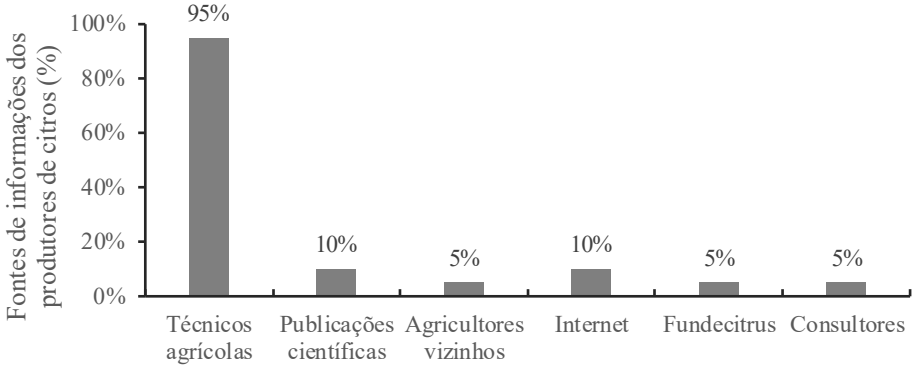


Figura 8. Fontes de informações dos produtores de citros

Os resultados indicam que o uso de tecnologia na citricultura regional é limitado, com forte dependência de práticas manuais e tradicionais. O uso de telefones celulares, por exemplo, ainda está principalmente voltado à comunicação com compradores e fornecedores (74%), enquanto apenas 1% dos produtores utiliza os telefones celulares para atividades mais avançadas, como o controle de equipamentos agrícolas via internet. Isso reflete uma lacuna significativa na adoção de tecnologias digitais mais sofisticadas, que poderiam aumentar a eficiência e a sustentabilidade do manejo agrícola.

Da mesma forma, a internet é utilizada principalmente para entretenimento e redes sociais (65%), enquanto uma parcela minoritária a utiliza para pesquisa de mercado e gestão financeira (35%) ou para atividades mais integradas, como monitoramento e vendas on-line (5%). Essa limitação no uso da internet para atividades agrícolas avançadas sugere um campo ainda pouco explorado na região, possivelmente devido à falta de conhecimento e de recursos para a aquisição de equipamentos adequados.

Em relação aos métodos de controle de pragas, os defensivos químicos são utilizados universalmente (100%), enquanto o controle biológico é menos frequente (15%). Embora o uso de armadilhas seja significativo (80%), a dependência de defensivos químicos sugere a necessidade de capacitação e de incentivos voltados à adoção de métodos de controle sustentáveis e integrados. A elevada frequência de relatos de erradicação atribuída ao HLB (Greening), mencionada por 95% dos produtores, indica que a doença é percebida como o principal problema fitossanitário na região, embora não tenha sido realizada confirmação laboratorial neste estudo.

A pesquisa também destaca o uso de mudas certificadas e a realização de inspeções regulares como outras medidas amplamente adotadas, correspondendo a 100% e 65%, respectivamente. Nesse sentido, esses fatores revelam um ambiente caracterizado pela adoção de boas práticas agrícolas, embora ainda exista carência de conhecimento e de acesso a tecnologias mais avançadas e mão de obra qualificada, fatores que contribuiriam, respectivamente, para um manejo de pragas mais eficiente em termos de custos e mais preciso. De modo geral, os relatos dos produtores sobre a diversidade de pragas, a resistência aos defensivos, a escassez de mão de obra disponível e o uso limitado de tecnologias reforçam a importância de políticas que incentivem o avanço tecnológico e a capacitação contínua na citricultura. A percepção dos produtores de que o nível tecnológico é baixo em comparação com outros setores agrícolas também sugere a necessidade de um desenvolvimento mais contínuo e de maiores investimentos, a fim de manter a competitividade no longo prazo.

4 DISCUSSÃO

O uso observado de telefones celulares e dos serviços de internet fornece uma perspectiva adicional sobre a relação entre o acesso digital e a adoção de tecnologias. O acesso a dispositivos de comunicação não se traduz necessariamente no uso de ferramentas digitais para a tomada de decisões agrícolas. Essa distinção sugere que a principal barreira pode estar relacionada à disponibilidade de aplicativos adequados, ao conhecimento técnico e à percepção de utilidade, e não apenas ao acesso a dispositivos móveis. Um padrão semelhante foi observado em outros contextos: em uma pesquisa com agricultores alemães, 95% utilizavam um smartphone, mas apenas 71% utilizavam um aplicativo de proteção de cultivos, sendo a percepção de utilidade um fator determinante para a adoção (Michels et al., 2020). No Brasil, uma pesquisa nacional com 504 produtores rurais mostrou que 84% utilizavam pelo menos uma tecnologia digital, enquanto os principais fatores limitantes eram os custos de equipamentos, softwares e conectividade; além disso, 95% dos entrevistados demonstraram interesse em aprender mais sobre novas tecnologias (Bolfe *et al*., 2020).

Consequentemente, iniciativas que envolvam aplicativos para o mapeamento do HLB, registros digitais de campo e rastreamento de equipamentos por meio da Internet das Coisas (IoT) devem priorizar a usabilidade e a integração às rotinas de manejo já

existentes. Essas ferramentas podem se tornar mais úteis quando transformam as informações coletadas em indicadores compreensíveis que auxiliem nas decisões relacionadas ao monitoramento, ao controle de pragas e ao planejamento da propriedade. Nesse sentido, a inclusão digital na agricultura deve ser compreendida como um processo que envolve infraestrutura, capacitação e desenvolvimento de soluções adaptadas às necessidades dos produtores.

Essa perspectiva é consistente com evidências de que a adoção e a difusão de tecnologias digitais na agricultura dependem tanto das características das propriedades rurais quanto das interações em níveis mais amplos do sistema (Shang *et al*., 2021). Também é relevante considerar que a oferta de soluções agrícolas digitais é, em grande parte, impulsionada por empresas privadas e desenvolvedores de tecnologia (Birner *et al*., 2021), o que reforça a necessidade de garantir que as ferramentas disponibilizadas sejam compatíveis com a realidade dos produtores locais, como aqueles das regiões citrícolas do noroeste do Paraná.

Sob uma perspectiva mais ampla, os resultados indicam que a melhoria da sustentabilidade da produção citrícola no noroeste do Paraná requer coordenação entre inovação tecnológica, extensão rural e manejo integrado de doenças. Isso é particularmente relevante porque, desde o primeiro relato no Brasil, em 2004, o HLB se disseminou para diversos estados produtores de citros, incluindo o Paraná, e seu manejo depende de ações coordenadas, como inspeções regulares, controle do vetor e remoção de plantas sintomáticas, as quais dependem do envolvimento dos produtores e da qualidade das informações disponíveis para eles (Bassanezi *et al*., 2020).

É importante enfatizar que nenhuma tecnologia de monitoramento foi implementada ou testada no presente estudo; portanto, a possível contribuição dessas ferramentas para uma vigilância mais sistemática e intervenções mais direcionadas permanece especulativa e deve ser avaliada em futuras investigações que envolvam o desenvolvimento e os testes de protótipos em condições de campo locais. Estudos sobre a detecção de HLB utilizando imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados e aprendizado de máquina ilustram o potencial técnico do monitoramento digital (Lan *et al*., 2020); entretanto, o valor prático dessas abordagens para os produtores dependerá do custo, da facilidade de uso e de sua integração às rotinas de campo e aos serviços de extensão rural existentes. A adoção de boas práticas de manejo tem sido analisada em diversos estudos e revisões, destacando a importância de compreender a disposição dos

produtores em adotar inovações e os fatores contextuais que influenciam suas decisões (Liu et al., 2018; Prokopy et al., 2019). Da mesma forma, Garcia-Figuera *et al*. (2021) enfatizam a relevância de pesquisas, oficinas participativas e entrevistas para avaliar os fatores relacionados à adoção e compreender as práticas de prevenção do HLB.

Dessa forma, os resultados deste estudo fornecem uma base para o desenvolvimento de intervenções que combinem tecnologias de monitoramento acessíveis, capacitação dos produtores e iniciativas colaborativas de extensão rural. Pesquisas futuras devem avaliar se essas abordagens podem melhorar a eficiência do monitoramento, apoiar decisões de manejo em tempo oportuno e reduzir a carga operacional associada ao controle do HLB nas condições específicas da citricultura do noroeste do Paraná.

5 CONSIDERACÕES FINAIS

O presente estudo caracterizou o perfil dos citricultores e as práticas de monitoramento e controle de *D. citri* na região noroeste do Paraná, Brasil, com base em entrevistas realizadas em 20 propriedades rurais e em observações de campo complementares. Como estudo descritivo, sua contribuição limita-se a retratar o cenário atual do setor na região analisada, sem avaliação experimental da eficácia das estratégias empregadas, confirmação laboratorial da ocorrência da doença ou desenvolvimento e teste de tecnologias.

Os resultados demonstram a predominância de pequenas propriedades e a dependência de métodos tradicionais de manejo de pragas, com uso limitado de tecnologias. Em 65% das propriedades, predomina a prática de monitoramento visual, o que reflete as restrições financeiras e a infraestrutura limitada enfrentadas pelos pequenos produtores na adoção de metodologias mais modernas. O uso de telefones celulares e da internet está concentrado principalmente em atividades básicas de comunicação, como o contato com compradores e atividades de lazer, indicando baixa incorporação de ferramentas digitais ao manejo agrícola.

O uso intensivo de defensivos químicos (100% das propriedades), associado à baixa adoção do controle biológico (15%), caracteriza o atual modelo de manejo fitossanitário na região. A erradicação de plantas atribuída ao HLB foi relatada em 95% das propriedades, indicando a magnitude do problema conforme percebida pelos produtores, embora esses dados sejam provenientes de relatos dos próprios produtores e

não tenham sido confirmados por diagnóstico laboratorial neste estudo. O uso generalizado de mudas certificadas (100%) e a realização de inspeções regulares (65%) demonstram a conscientização quanto à importância de práticas agrícolas seguras, embora essa conscientização ainda não tenha se traduzido em um sistema de manejo integrado de pragas mais abrangente.

Esses resultados fornecem um diagnóstico de base que pode subsidiar a formulação de políticas públicas, ações de extensão rural e programas de capacitação técnica adaptados à realidade dos pequenos produtores de citros. Além disso, as lacunas identificadas, adoção limitada de tecnologias digitais, baixo uso de métodos sustentáveis e dependência da inspeção visual indicam temas a serem abordados em futuras investigações, incluindo estudos com confirmação laboratorial da ocorrência de HLB e avaliação em campo de tecnologias de monitoramento acessíveis.

Por fim, os resultados apresentados não permitem conclusões sobre a eficácia das práticas descritas ou sobre o desempenho de qualquer tecnologia, uma vez que nenhuma intervenção foi implementada ou testada. Portanto, são necessários estudos de natureza aplicada e experimental para verificar se estratégias como sistemas de monitoramento baseados em IoT são viáveis e eficazes nas condições específicas da citricultura do noroeste do Paraná.

REFERÊNCIAS

ADAPAR – Agricultural Defense Agency of Paraná. ***Manual of Procedures for Sanitary Control in Paraná***. Curitiba: ADAPAR, 2023.

ALVES, Mônica N. *et al*. Resistance to 'Candidatus Liberibacter asiaticus,' the Huanglongbing Associated Bacterium, in Sexually and/or Graft-Compatible Citrus Relatives. ***Frontiers In Plant Science***, [S.L.], v. 11, p. 305-312, 8 jan. 2021. Frontiers Media SA.

ANDRADE, Eduardo Chumbinho de *et al*. Citrus Huanglongbing (HLB) and the Brazilian Efforts to Overcome the Disease. ***Outlooks On Pest Management***, [S.L.], v. 32, n. 5, p. 189-194, 1 out. 2021. Research Information Ltd

BASSANEZI, Renato Beozzo *et al*. Overview of citrus huanglongbing spread and management strategies in Brazil. ***Tropical Plant Pathology***, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 251-264, 6 maio 2020. Springer Science and Business Media LLC.

BIRNER, Regina *et al*. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. ***Applied Economic Perspectives And Policy***, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 1260-1285, 15 mar. 2021. Wiley.

BOA, Eric *et al*. Citrus Huanglongbing (Greening) Disease. ***Plant Health Cases***, [S.L.], p. 189-194, 25 abr. 2023. CABI Publishing.

BOLFE, Édson Luis *et al*. Precision and Digital Agriculture: adoption of technologies and perception of brazilian farmers. ***Agriculture***, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 653, 21 dez. 2020. MDPI AG.

BRAZIL. Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply. ***Secretariat of Agricultural Defense, Department of Plant Health, Present Quarantine Pests***. Annex table to Normative Instruction No. 38, of October 1, 2018. Official Gazette of the Union (D.O.U.), No. 190, Section 1, p. 14, Oct. 2, 2018.

CABOT, María Inés *et al*. Towards harmonised and regionalised life cycle assessment of fruits: a review on citrus fruit. ***Sustainable Production And Consumption***, [S.L.], v. 33, p. 567-585, set. 2022. Elsevier BV.

CARVALHO, Deived Uilian de *et al*. Late-Season Sweet Orange Selections Under Huanglongbing and Citrus Canker Endemic Conditions in the Brazilian Humid Subtropical Region. ***Frontiers In Plant Science***, [S.L.], v. 13, p. 3107-3123, 31 maio 2022. Frontiers Media SA.

COSTA, Gustavo Vaz da *et al*. Spatial dynamics of orange production in the state of Paraná, Brazil. ***Revista Brasileira de Fruticultura***, [S.L.], v. 42, n. 2, p. 210-225, 2020. FapUNIFESP (SciELO).

GARCIA-FIGUERA, Sara *et al*. Perceived Vulnerability and Propensity to Adopt Best Management Practices for Huanglongbing Disease of Citrus in California. ***Phytopathology®***, [S.L.], v. 111, n. 10, p. 1758-1773, out. 2021. Scientific Societies.

GHOSH, Dilip *et al*. Huanglongbing Pandemic: current challenges and emerging management strategies. ***Plants***, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 160, 29 dez. 2022. MDPI AG.

LAN, Yubin *et al*. Comparison of machine learning methods for citrus greening detection on UAV multispectral images. ***Computers And Electronics In Agriculture***, [S.L.], v. 171, p. 105234, abr. 2020. Elsevier BV.

LI, Sheng *et al*. Citrus Greening: management strategies and their economic impact. ***Hortscience***, [S.L.], v. 55, n. 5, p. 604-612, maio 2020. American Society for Horticultural Science.

LI, Xue *et al*. Controlling Citrus Huanglongbing: green sustainable development route is the future. ***Frontiers In Plant Science***, [S.L.], v. 12, p. 305-312, 15 nov. 2021.

LIU, Tingting *et al*. Factors Influencing Farmers' Adoption of Best Management Practices: a review and synthesis. ***Sustainability***, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 432, 7 fev. 2018. MDPI AG.

LUCHI, Nicola *et al*. Fast and reliable molecular methods to detect fungal pathogens in woody plants. ***Applied Microbiology And Biotechnology***, [S.L.], v. 104, n. 6, p. 2453-2468, 31 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

MENDES, Bruno *et al*. Coverage Characterization of LoRaWAN Sensor Networks for Citrus Orchard Monitoring. ***2022 International Young Engineers Forum (Yef-Ece)***, [S.L.], p. 86-91, 1 jul. 2022. IEEE.

MICHELS, Marius *et al*. Understanding the adoption of smartphone apps in crop protection. ***Precision Agriculture***, [S.L.], v. 21, n. 6, p. 1209-1226, 15 abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

MOKRINI, Fouad *et al*. Major pests and diseases threatening the future of Moroccan citrus cultivation and their potential management strategies. ***Cabi Reviews***, [S.L.], p. 567-585, 6 maio 2025. CABI Publishing.

OLIVERA, Elías Rodríguez *et al*. Pesticides, Biopesticides and Biological Control Agents in Agriculture. ***Official Newsletter Of Biobive Project***, [S.L.], n. 1, p. 3-4, 2026. University of Leon.

PROKOPY, L.s. *et al*. Adoption of agricultural conservation practices in the United States: evidence from 35 years of quantitative literature. ***Journal Of Soil And Water Conservation***, [S.L.], v. 74, n. 5, p. 520-534, set. 2019. Informa UK Limited.

SHANG, Linmei *et al*. Adoption and diffusion of digital farming technologies - integrating farm-level evidence and system interaction. ***Agricultural Systems***, [S.L.], v. 190, p. 103074, maio 2021. Elsevier BV.

STELINSKI, Lukasz L. *et al*. Ecological Aspects of the Vector-Borne Bacterial Disease, Citrus Greening (Huanglongbing): dispersal and host use by asian citrus psyllid, diaphorina citri kuwayama. ***Insects***, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 208, 16 jul. 2019. MDPI AG.

THAKURIA, Dwipendra *et al*. Citrus Huanglongbing (HLB): diagnostic and management options. ***Physiological And Molecular Plant Pathology***, [S.L.], v. 125, p. 102016, maio 2023. Elsevier BV.

ZHANG, Li-He *et al*. Impact of Huanglongbing Pathogen Infection on the Amino Acid Composition in Both Citrus Plants and the Asian Citrus Psyllid. ***Frontiers In Physiology***, [S.L.], v. 12, p. 777908, 10 dez. 2021. Frontiers Media SA.

WANG, X.L. *et al*. CITRUS ROOTSTOCK SELECTION FOR ENHANCED HUANGLONGBING RESISTANCE: a strategic disease management paradigm. ***Applied Ecology And Environmental Research***, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 3107-3123, 2025. ALOKI Ltd.

CAPÍTULO III

Desenvolvimento e validação de uma armadilha inteligente baseada em IoT e inteligência artificial para o monitoramento automatizado de *Diaphorina Citri* em pomares cítricos.

RESUMO

O avanço tecnológico impulsionou soluções de automação e monitoramento inteligente na agricultura, destacando-se a Internet das Coisas (IoT) como ferramenta para integração entre componentes físicos e digitais. No contexto fitossanitário, as perdas causadas por pragas e doenças atingem entre 20% e 40% da produtividade global. O psilídeo *Diaphorina citri*, vetor do Huanglongbing (HLB), representa ameaça crítica à citricultura. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver uma armadilha automatizada com monitoramento remoto e reconhecimento inteligente de psilídeos, baseada em redes neurais, inteligência artificial e conectividade IoT. A armadilha foi estruturada em haste de alumínio de 2 metros, com corpo triangular em chapa de zinco e face interna pintada de amarelo, cor comprovadamente mais atrativa para *D. citri*. Na porção superior, instalou-se placa solar fotovoltaica de 6 W e 6 V, conectada a bateria recarregável e, alternativamente, a adaptador de energia, configurando sistema híbrido de alimentação. O processamento central utilizou microcontrolador ESP32-CAM, protegido por carcaça impressa em 3D em ABS, responsável pela aquisição de imagens e comunicação sem fio. O modelo de inteligência artificial foi desenvolvido na plataforma Edge Impulse, empregando rede neural convolucional (CNN) otimizada para dispositivos embarcados. A comunicação IoT operou via Wi-Fi, com possibilidade de expansão para 5G, ou GSM/GPRS, utilizando protocolo MQTT para transmissão de dados compactos à nuvem. As informações foram integradas a servidores compatíveis com a tecnologia, permitindo dashboards interativos. Em situações de baixa energia, o sistema ativava modo *deep sleep*, retomando operações com a recarga solar. A validação em campo ocorreu em pomar de aproximadamente 2000 pés de laranja do tipo folha murcha, na região noroeste do Paraná, durante período de calor e ausência de chuvas, condições de maior atividade do inseto. A armadilha foi posicionada na borda do pomar, a 2,0 m de altura, conforme recomendação técnica de que 70% dos psilídeos concentram-se nas bordas dos talhões. O sistema manteve disponibilidade operacional de 90%, com aquisição automática de imagens, processamento local contínuo, identificação automática, transmissão e armazenamento corretos dos dados. A comparação com contagem manual realizada por profissional especializado indicou elevada concordância, com baixa ocorrência de falsos positivos. A análise comparativa com o método convencional evidenciou vantagens operacionais da armadilha inteligente: informação em tempo real, redução de deslocamentos, monitoramento remoto contínuo e custo de produção inferior. A autonomia energética solar garantiu operação ininterrupta durante o experimento. Conclui-se que o sistema proposto demonstrou viabilidade técnica e econômica para o monitoramento automatizado de *D. citri*, integrando conceitos de Agricultura 4.0 e contribuindo para o Manejo Integrado de Pragas. Limitações incluem o período relativamente curto de coleta de dados e condições ambientais específicas, sugerindo a necessidade de validações longitudinais e em diferentes estações para consolidação da tecnologia em larga escala.

Palavras-chave: Dispositivo Embarcado. Entomologia Aplicada. Computação de Ponta. Protótipo de campo. Visão Computacional.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras voltadas à automação e ao monitoramento inteligente em diversos setores produtivos. Entre essas inovações, os sistemas de monitoramento remoto surgem como uma técnica emergente capaz de ampliar a eficiência operacional e a precisão na coleta de dados em tempo real. No contexto desses sistemas, a Internet das Coisas (IoT) destaca-se como um método amplamente utilizado em diferentes aplicações de inspeção (MARQUES *et al*., 2019).

A IoT representa uma tecnologia disruptiva que permite a conexão e o controle remoto de dispositivos, favorecendo a integração entre componentes físicos e digitais. Essa abordagem tem promovido avanços significativos na agricultura inteligente, ao possibilitar o monitoramento automatizado de variáveis ambientais e biológicas (PATIL *et al*., 2016). A influência da IoT tem se expandido para diversos setores, como saúde, comércio, energia e comunicações, contribuindo para o aprimoramento da eficiência, da produtividade e da sustentabilidade em escala global (SISINNI *et al*., 2018).

No campo agrícola, diferentes métodos e arquiteturas têm sido propostos por pesquisadores para o monitoramento e a transmissão de informações sobre o desenvolvimento das culturas em distintas fases fenológicas. Para isso, são utilizados múltiplos dispositivos, como sensores, robôs, drones e maquinários automatizados, que coletam e distribuem dados de forma integrada. Além disso, organizações de alimentos e agricultura, em parceria com entidades governamentais, vêm estabelecendo diretrizes e políticas regulatórias para assegurar o uso responsável dessas tecnologias, visando preservar a segurança alimentar e ambiental (KING *et al*., 2017).

A incorporação de sensores e tecnologias baseadas em IoT tem demonstrado ganhos expressivos na produtividade e qualidade das culturas quando comparadas aos processos agrícolas convencionais. Essas soluções tecnológicas, sobretudo quando aplicadas em ambientes controlados, desempenham papel essencial na otimização dos recursos e no aumento da eficiência dos sistemas de produção agrícola (DHANARAJU *et al*., 2022).

Entretanto, um dos principais desafios enfrentados pela agricultura moderna está relacionado às perdas causadas por pragas e doenças. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), essas perdas podem atingir entre 20% e 40% da produtividade agrícola global (NEWLANDS *et al*., 2018).

Tradicionalmente, o controle desses agentes tem sido realizado por meio da aplicação de produtos sintéticos (KHATTAB *et al*., 2019), os quais, embora eficazes, acarretam sérios riscos à saúde humana, animal e ao meio ambiente, resultando em contaminação de ecossistemas e desequilíbrio ambiental (RAMALINGAM *et al*., 2020).

Nesse cenário, os dispositivos baseados em IoT, como sensores sem fio, drones e robôs agrícolas, emergem como alternativas sustentáveis para o manejo e monitoramento de pragas e doenças. Esses sistemas possibilitam a localização e o controle precisos dos agentes nocivos às culturas por meio do monitoramento em tempo real, de modelagens preditivas e de análises automatizadas de imagens, resultando em maior eficácia e menor impacto ambiental (KIM *et al*., 2018).

O manejo integrado baseado em IoT depende fortemente de técnicas de detecção e processamento de imagens, nas quais sensores e câmeras de sensoriamento remoto coletam dados sobre a saúde das plantas e a presença de pragas ao longo de todo o ciclo produtivo. Nesse contexto, armadilhas automatizadas baseadas em IoT têm se destacado como ferramentas eficientes para capturar, contar e identificar insetos de forma autônoma, enviando posteriormente os dados para armazenamento e análise em nuvem (ENNOURI *et al*., 2019). Aliadas a isso, as inovações em robótica agrícola incorporam sistemas de visão multiespectral e bicos de pulverização de precisão, ampliando a capacidade de detecção e controle localizado de pragas, o que representa um avanço significativo no escopo dos sistemas de gerenciamento agrícola baseados em IoT (MARINELLI *et al*., 2019).

Dessa forma, a integração entre tecnologias de IoT, sensores inteligentes e visão computacional representa um marco na modernização do monitoramento agrícola, contribuindo para práticas mais eficientes, seguras e ambientalmente sustentáveis. A presente pesquisa, portanto, teve como objetivo o desenvolvimento de uma armadilha automatizada com monitoramento remoto e reconhecimento inteligente de psilideos, baseada em redes neurais, inteligência artificial e conectividade IoT, visando otimizar a detecção e monitoramento do psilídeo *D. citri* vetor do Huanglongbing (HLB).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Arquitetura geral do sistema

A armadilha inteligente foi projetada com o objetivo de aliar robustez estrutural, eficiência na captura de insetos e viabilidade operacional em campo. A base da armadilha consiste em uma haste de alumínio de 2 metros de altura, utilizada para garantir estabilidade mecânica e sustentação dos componentes eletrônicos e ópticos. A estrutura principal da armadilha foi confeccionada em chapas de zinco conformadas no formato triangular, proporcionando resistência às intempéries e durabilidade em ambiente agrícola (Figura 11).

A face interna da estrutura triangular recebeu pintura na cor amarela, uma vez que essa tonalidade apresenta comprovada capacidade de atração visual para o psilídeo *Diaphorina citri*, vetor do Huanglongbing (HLB), Allan et al. (2020) demonstraram em ensaios de laboratório e de campo que a cor amarela é a mais atrativa para *D. citri* quando comparada a outras cores (verde, verde iridescente e branco). No estudo, a tinta amarela "decoy yellow" capturou 44,2% dos psilídeos, contra 25,2% para o verde e 15,3% para o branco, com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$). O estudo também confirmou que as armadilhas amarelas ou amarelo/verde são as mais eficazes relatadas até o momento, pois imitam a reflectância do tecido de brotações novas (flush) dos citros, que são naturalmente amarelo/verde intenso, justamente o alvo preferido para alimentação e oviposição das fêmeas. Portanto, a superfície amarela atua como elemento atrativo primário, facilitando o pouso e a detecção dos insetos pelo sistema de visão embarcado (Figura 1).

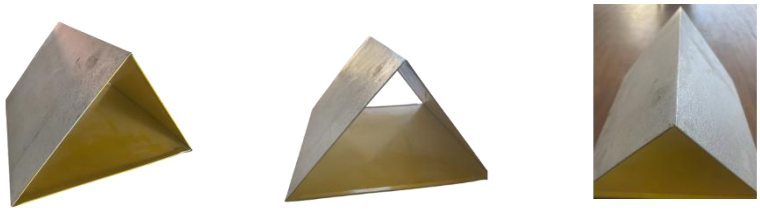


Figura 1. Estrutura de zinco com pintura interna na cor amarela

Na porção superior da armadilha foi instalado um suporte metálico destinado ao acoplamento de um módulo de placa solar fotovoltaica, responsável pela alimentação energética do sistema eletrônico. A placa solar empregada possui potência nominal de 6 W, tensão de operação de 6 V, corrente elétrica de 1 A, tensão de circuito aberto de 7,2 V, e dimensões de 276 × 197 × 17 mm. Essa configuração permite geração contínua de

energia elétrica suficiente para o funcionamento do sistema, mesmo sob condições de luminosidade variável.

Ao sistema eletrônico central é composto por um microcontrolador ESP32-CAM, que integra processamento, conectividade Wi-Fi e módulo de câmera para aquisição de imagens em tempo real. O conjunto foi protegido por uma carcaça impressa em 3D utilizando filamento ABS (acrilonitrila butadieno estireno), material escolhido por sua resistência térmica e mecânica, conferindo proteção contra umidade e radiação solar direta (Figura 2).

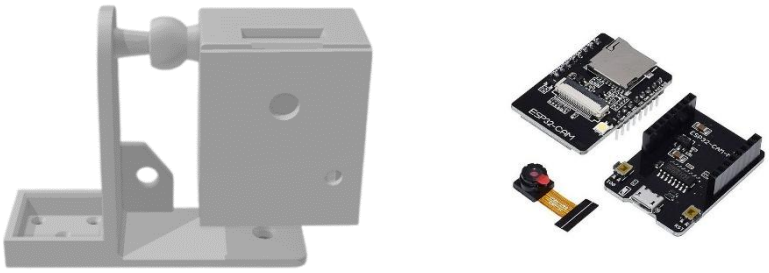


Figura 2. Suporte de proteção do microcontrolador ESP32-CAM impresso em impressora 3D e microcontrolador.

O sistema de alimentação é composto por uma bateria recarregável conectada à placa solar e, alternativamente, por um adaptador de energia para situações em que a recarga solar seja insuficiente. Essa configuração híbrida garante operação contínua e autônoma da armadilha, possibilitando o monitoramento prolongado em áreas agrícolas remotas (Figura 3).

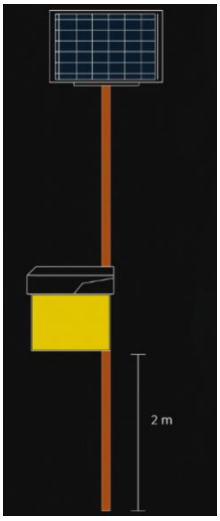


Figura 3. Armadilha para monitoramento de psilideo

2.2 Fluxograma de funcionamento do sistema de monitoramento

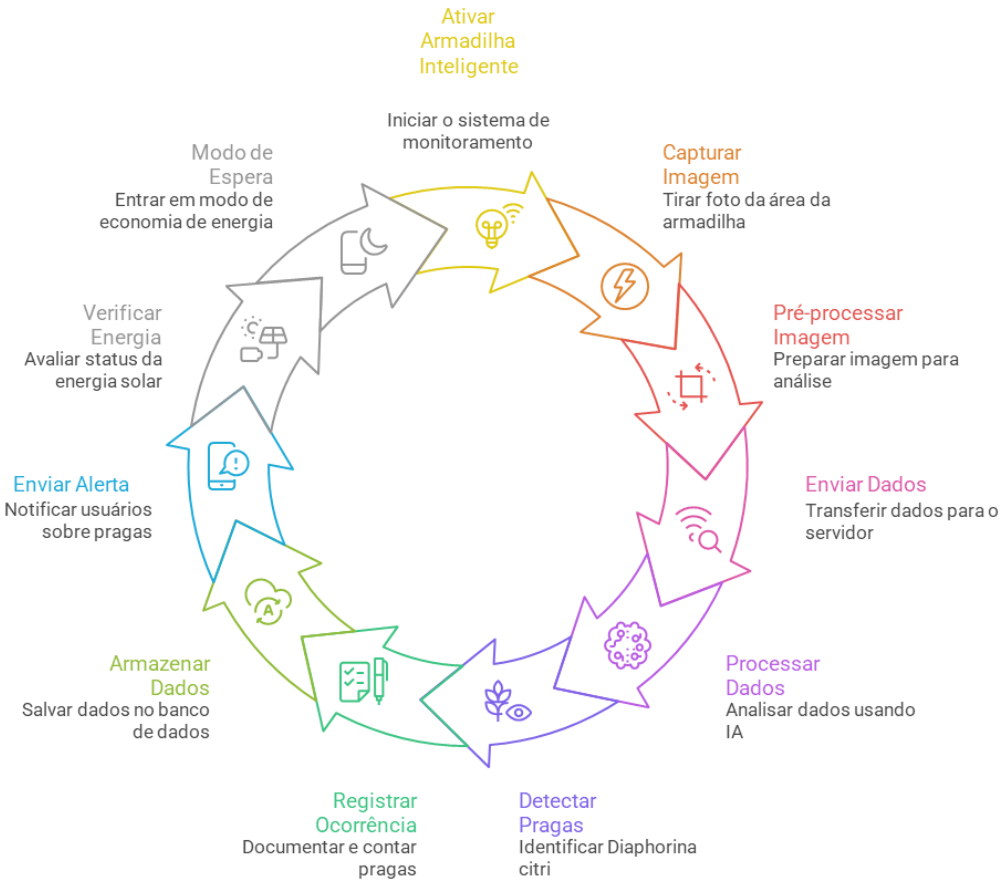


Figura 4: Fluxograma do funcionamento da armadilha inteligente para monitoramento de *Diaphorina citri*

2.3 Modelo de Inteligência Artificial

O desenvolvimento e a validação do modelo de inteligência artificial foram conduzidos utilizando a plataforma *Edge Impulse*, um ambiente de aprendizado de máquina projetado para aplicações embarcadas (*edge AI*), permitindo a criação, o treinamento e a implantação de modelos otimizados diretamente em dispositivos com capacidade de processamento limitada, como o microcontrolador ESP32-CAM.

2.3.1 Banco de dados de imagens (coleta, rotulagem e pré-processamento)

As imagens utilizadas no treinamento foram coletadas diretamente em armadilhas adesivas para insetos de 30cm x 10cm, contendo exemplares do psilídeo *Diaphorina*

citri, vetor da doença Huanglongbing (HLB). A base de dados foi composta por imagens capturadas em diferentes condições de iluminação, posicionamento e concentração de insetos, buscando representar a variabilidade natural encontrada em campo.

As amostras foram enviadas e organizadas na plataforma *Edge Impulse*, onde foi realizada a rotulagem manual das regiões de interesse (ROI) contendo o psilideo alvo. Esse processo foi essencial para garantir a qualidade do conjunto de dados e reduzir erros de classificação durante o treinamento (Figura 5).

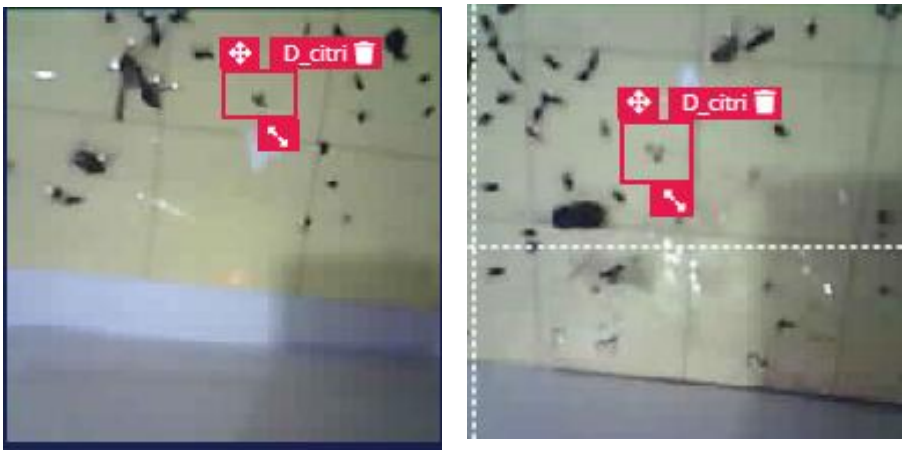


Figura 5. Rotulagem das áreas de interesse

O pré-processamento das imagens envolveu redimensionamento automático para 96 × 96 pixels, conversão de cores para o formato RGB e normalização dos valores de pixel, conforme exigido pela *pipeline* de visão computacional da plataforma. Além disso, aplicou-se *data augmentation* (espelhamento, rotação, alteração de brilho e contraste) para aumentar a robustez do modelo e mitigar possíveis sobreajustes (*overfitting*) (Figura6).

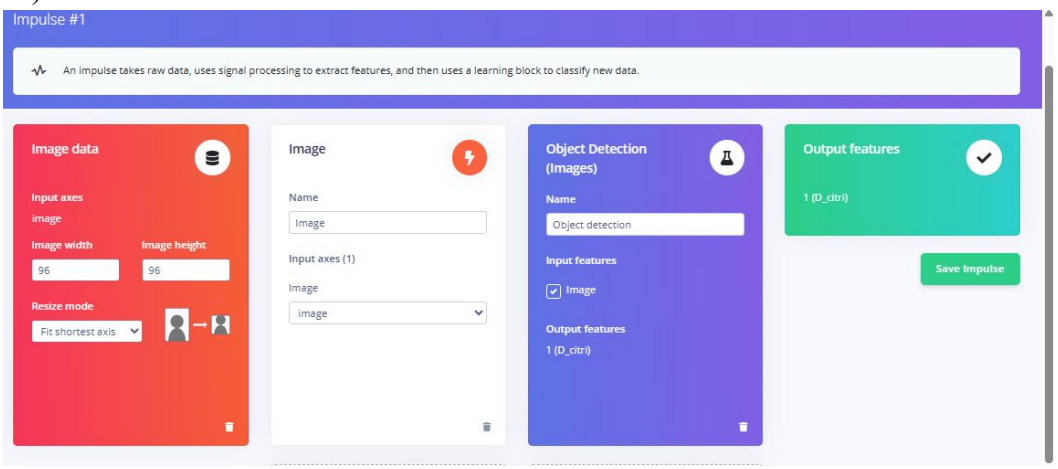


Figura 16. Configuração do modelo de detecção de objetos na plataforma *Edge Impulse*, evidenciando as etapas de entrada de dados de imagem, processamento, detecção de objetos e geração das saídas classificadas referentes ao *D. citri*

2.3.2 Modelo de rede neural adotado e parâmetros de treinamento

A arquitetura de rede neural adotada foi baseada em uma CNN (*Convolutional Neural Network)* otimizada para execução em dispositivos embarcados, gerada automaticamente pelo módulo de visão da plataforma *Edge Impulse*(HYMEL *et al*., 2022). O modelo foi configurado com camadas convolucionais sequenciais para extração de características, seguidas por camadas de pooling e normalização, e finalizado por camadas totalmente conectadas (*fully connected layers*) com função de ativação *Softmax*, responsável pela classificação das imagens entre a categoria *Diaphorina citri*.

Durante o treinamento, foram definidos número de ciclos de treinamento (épocas) = 60, taxa de aprendizado inicial = 0,001. O otimizador utilizado foi o Adam, por sua eficiência em convergência em redes de baixa complexidade (REYAD *et al*., 2023). O treinamento foi executado em uma Unidade Central de Processamento (CPU), o que, para a arquitetura e o volume de dados em questão, mostrou-se computacionalmente viável e suficiente para atingir os resultados desejados. A opção de "*Data augmentation*" encontra-se ativada, evidenciando a aplicação de técnicas para expandir artificialmente o conjunto de dados de treinamento. Esta estratégia é crucial para melhorar a generalização do modelo e aumentar sua robustez a variações nos dados de entrada. O treinamento foi realizado integralmente na nuvem da plataforma *Edge Impulse* (Figura 7).

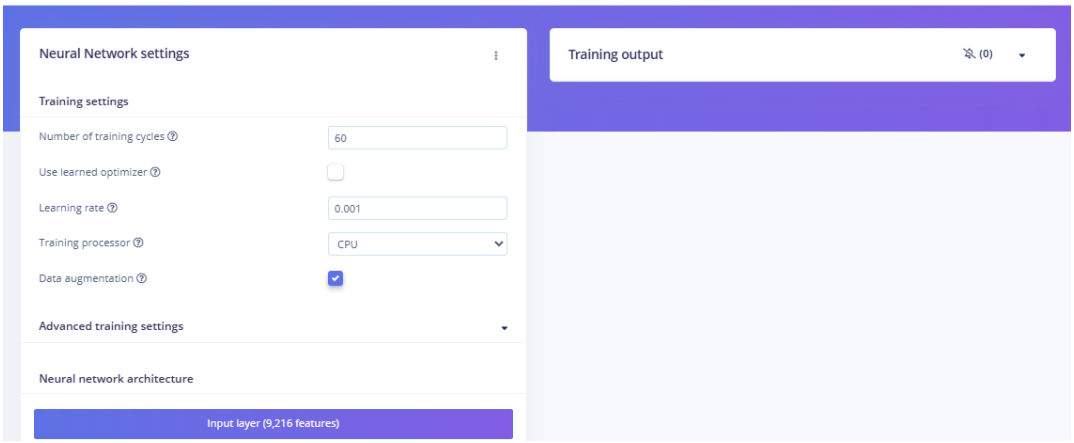


Figura 7. Configurações da Rede Neural e Parâmetros de Treinamento

A plataforma gerou automaticamente o modelo quantizado em *formato EON-TensorFlow Lite*, garantindo baixo consumo de memória e processamento no ESP32-CAM, sem comprometer a acurácia do reconhecimento (David, Robert *et al*., 2021).

2.3.3 Métricas de avaliação

O modelo foi exportado na versão Quantizada (int8). Esta é uma etapa crítica para o *deployment* em dispositivos de borda, pois reduz significativamente a *footprint* computacional e de memória do modelo ao converter os pesos de ponto flutuante (FP32) para inteiros de 8 bits (int8), mantendo uma alta precisão de inferência. O modelo alcançou um F1-Score de 100,0% no conjunto de validação, um resultado excepcional que indica um desempenho de classificação perfeito dentro das condições testadas (AHN *et al*., 2023).

A matriz de confusão, construída sobre o conjunto de validação, confirma o desempenho ideal do modelo. Para as duas classes analisadas, *BACKGROUND* e *D_CITRI*, a rede neural classificou corretamente 100% das amostras, sem quaisquer falsos positivos ou falsos negativos. Os valores do *F1-Score* por classe são, consequentemente, 1.00 para ambas (Figura 8).

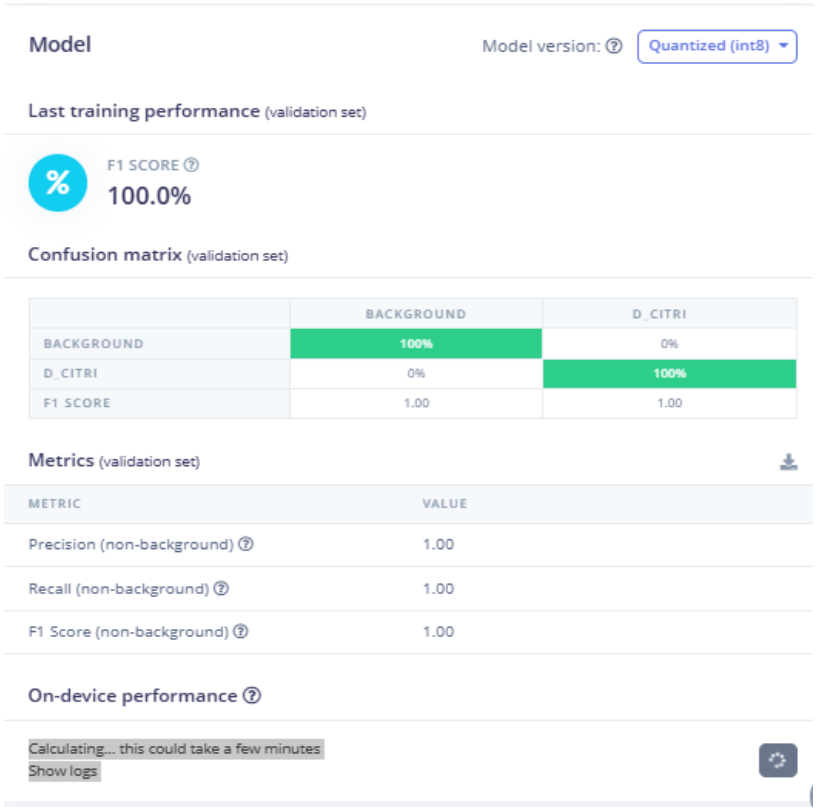


Figura 8: Desempenho do Modelo Treinado e Métricas de Validação

As métricas de avaliação específicas para a classe de interesse não-background (*D_CITRI*) corroboram a análise da matriz de confusão:

Precisão (*Precision*): 1.00 – Indica que todas as amostras classificadas como *D_CITRI* eram efetivamente desta classe (ausência de falsos positivos).

Revocação (*Recall*): 1.00 – Indica que o modelo foi capaz de identificar todas as amostras existentes da classe *D_CITRI* no conjunto de validação (ausência de falsos negativos).

***F1-Score*:** 1.00 A média harmônica entre Precisão e Revocação, consolidando a performance perfeita do modelo para a classe alvo.

Desempenho no Dispositivo (*On-device Performance*): A interface indica a etapa de cálculo do desempenho no dispositivo, um procedimento essencial para validar a eficiência e a velocidade de inferência do modelo quantizado quando executado no hardware de borda alvo.

Os resultados obtidos indicaram que o modelo apresentou elevada taxa de acerto na identificação do psilídeo *Diaphorina citri*, com baixa ocorrência de falsos positivos, demonstrando viabilidade para aplicação em campo e integração com o sistema IoT desenvolvido.

2.3.4 Espaço de Características e Identificação da Classe *D_CITRI*

Conforme evidenciado na figura 9, a amostra em questão está devidamente indexada como "*D.citri2* (14)", onde o número entre parâmetros indica um identificador único ou a posição no *dataset*. A etiqueta *(Label)* atribuída "*D. citri*" confirma sua classe de origem, que se alinha com o fenômeno ou condição experimental de interesse neste estudo.

A ferramenta oferece duas opções de análise para cada amostra:

View sample: Permite a visualização direta do dado bruto facilitando a inspeção visual dos padrões originais.

View features: Possibilita a análise detalhada do vetor de características extraído pela rede neural, permitindo a investigação dos atributos que o modelo utiliza para tomar sua decisão.

A correta identificação e localização desta amostra no *feature space* valida a eficácia do processo de extração de características e sugere que o modelo é capaz de aprender representações discriminativas que separam eficientemente a classe *D_CITRI* das demais. Esta visualização é fundamental para corroborar, de forma qualitativa, as excelentes métricas quantitativas de desempenho reportadas anteriormente.

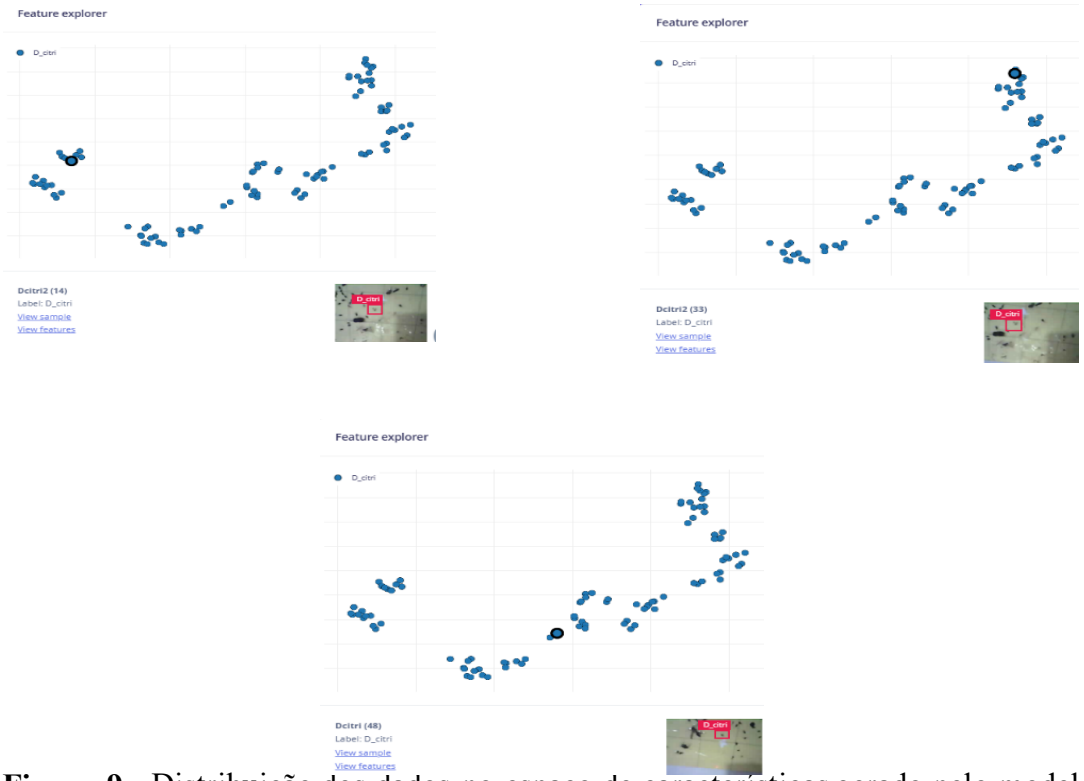


Figura 9. Distribuição dos dados no espaço de características gerado pelo modelo de rede neural.

2.4 Integração IoT e comunicação de dados

A arquitetura de integração IoT da armadilha inteligente foi desenvolvida com base no microcontrolador ESP32-CAM, que atua como unidade central de processamento, captura de imagens e comunicação sem fio. O ESP32-CAM integra um microprocessador *dual-core* Tensilica LX6, conectividade Wi-Fi 802.11 b/g/n, módulo de câmera OV2640 de 2 MP, e interface para cartão microSD (DIETZ *et al*., 2022), características que o tornam adequado para aplicações de monitoramento remoto em ambientes agrícolas.

O funcionamento do sistema segue um fluxo cíclico automatizado, no qual o ESP32-CAM realiza a captura periódica de imagens da superfície adesiva da armadilha. Essas imagens do psilídeo, capturadas pelo ESP32-CAM, foram utilizadas para criar o conjunto de dados que foi inserido na plataforma *Edge Impulse*, onde o modelo de aprendizado de máquina foi treinado e otimizado para a identificação específica do psilideo. Uma vez desenvolvido, o modelo foi implantado no dispositivo, permitindo que as imagens obtidas sejam processadas localmente para classificação e análise por meio do modelo embarcado (*edge inference*). Esse processo, suportado pelo modelo previamente treinado, permite a identificação em tempo real do psilídeo *Diaphorina citri*,

reduzindo a dependência de conexão constante com servidores externos e otimizando o consumo de energia.

A comunicação entre a armadilha e o sistema de monitoramento remoto ocorre por meio de protocolo *Wi-Fi* ou podendo utilizar o padrão de rede móvel de quinta geração, operando principalmente por meio de 5G Standalone (SA) e 5G Non-Standalone (NSA), baseados no espectro de frequências de 3,5 GHz e mmWave (bandas milimétricas), configurado em modo cliente para conexão direta com a rede local ou *hotspot* de campo. Em aplicações de longa distância, o sistema pode ser expandido para uso de módulos LoRa (*Long Range*) ou GSM/GPRS, permitindo a transmissão de dados em regiões sem cobertura *Wi-Fi* (ALDHAHERI *et al*., 2025). O protocolo de transmissão MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é utilizado para envio de informações compactas e confiáveis à plataforma IoT, garantindo eficiência e baixo consumo de largura de banda, fatores essenciais em ambientes com conectividade limitada (MISHRA *et al*., 2020).

As informações coletadas (imagens, registros de detecção, data, hora e status energético) são enviadas para um servidor em nuvem, hospedado em ambiente compatível com *Node-RED* (ferramenta de programação visual para conectar dispositivos e serviços), *ThingSpeak* (plataforma IoT para análise e visualização de dados em tempo real) e *Blynk* (plataforma para criar interfaces para aplicativos IoT) (THOMAS *et al*., 2024; ZACHARIAH *et al*., 2022; HAILAN *et al*., 2023), que atua como *middleware* de integração entre o dispositivo físico e o painel de visualização. Nessa etapa, os dados são armazenados, processados e exibidos em dashboards interativos, permitindo que o usuário acompanhe o número de detecções, histórico de capturas e o estado operacional da armadilha.

A alimentação elétrica do sistema é proveniente de uma placa solar de 6 W e 6 V, associada a uma bateria recarregável, o que possibilita operação autônoma e contínua. O ESP32-CAM realiza periodicamente a leitura do nível de carga da bateria e do estado da placa solar, enviando essas informações à nuvem para o monitoramento energético remoto. Em situações de baixa energia, o sistema entra automaticamente em modo de economia de energia (*deep sleep*), retomando as operações normais quando a recarga solar é restabelecida.

A integração entre os componentes físicos (ESP32-CAM, sensores e placa solar) e a infraestrutura digital (*Edge Impulse*, protocolo MQTT e servidor IoT) estabelece uma rede ciberfísica de monitoramento agrícola, caracterizando o conceito de Agricultura 4.0.

Esse ecossistema digital permite a detecção automatizada do *D. citri*, a análise instantânea dos dados e a emissão de alertas em tempo real, contribuindo para a resposta rápida e eficaz no monitoramento do vetor do HLB.

2.5 Validação da armadilha inteligente em condições de campo

A validação da armadilha inteligente foi conduzida em um pomar de citros localizado na região noroeste do estado do Paraná, Brasil, área caracterizada pela ocorrência natural do psilídeo *Diaphorina citri*. O experimento foi realizado durante o período de atividade populacional do inseto (calor). Esse aumento é impulsionado pelo calor e pelo início do período de chuvas, que estimulam a emissão de brotações novas essenciais para a alimentação e reprodução do pslideo sob condições naturais de infestação (Fundecitrus, 2023), visando avaliar o desempenho do sistema em ambiente agrícola.

2.5.1 Instalação das armadilhas em campo

A armadilha inteligente foi instalada nas bordas do pomar pois os psilídeos são encontrados com maior frequência nas bordas dos pomares, por serem os primeiros locais de instalação ao migrarem de um pomar para outro, sendo que, 70% dos psilídeos são encontrados na borda dos talhões (Fundecitrus, 2025). A armadilha foi fixada em haste metálica de aproximadamente 2,0 m de altura, posicionando-se a superfície próxima ao terço superior da copa das plantas, altura considerada adequada para o monitoramento de adultos de *D. citri*.

A alimentação energética ocorreu exclusivamente por meio do sistema fotovoltaico composto por painel solar de 6 W e bateria recarregável, permitindo operação contínua durante todo o período experimental.

2.5.2 Frequência de aquisição das imagens e captura dos dados

O sistema embarcado foi programado para realizar automaticamente a aquisição de imagens da superfície adesiva em intervalos regulares, processando cada imagem localmente por meio do modelo de inteligência artificial.

Para cada aquisição foram registrados automaticamente:

- data e horário da captura;
- número de indivíduos detectados;
- imagem correspondente;
- nível de carga da bateria;
- estado de funcionamento do sistema;

Todas as informações foram transmitidas à plataforma IoT para armazenamento em banco de dados e posterior análise.

2.5.3 Procedimentos de validação

A validação do sistema consistiu na comparação entre as detecções automáticas realizadas pelo modelo de inteligência artificial e a contagem manual efetuada por pragueiro.

As armadilhas adesivas foram inspecionadas periodicamente e todas as imagens capturadas pelo sistema foram confrontadas com a contagem visual dos insetos presentes na superfície adesiva.

Cada indivíduo identificado manualmente foi considerado o padrão de referência (ground truth – verdade fundamental) para avaliação do desempenho do algoritmo.

2.5.4 Comparação entre armadilha inteligente e armadilha convencional

O desempenho da armadilha inteligente foi comparado com o método tradicional de monitoramento baseado em armadilhas adesivas amarelas.

Para ambas as metodologias foram avaliados:

- número total de psilídeos capturados;
- número médio de indivíduos por armadilha;
- tempo necessário para obtenção das informações;
- frequência de atualização dos dados;
- necessidade de deslocamento da equipe técnica;
- capacidade de monitoramento remoto em tempo real.

2.5.5 Métricas agronômicas e operacionais

Para avaliar a eficiência agronômica do sistema foram consideradas as seguintes variáveis:

- taxa de detecção de *Diaphorina citri*;
- número médio de insetos detectados por armadilha;
- tempo médio entre a captura e a disponibilização da informação ao usuário;
- disponibilidade operacional do sistema;
- autonomia energética proporcionada pelo conjunto painel solar–bateria;
- estabilidade da comunicação IoT durante o período experimental.

Esses indicadores permitiram verificar a aplicabilidade da armadilha como ferramenta de monitoramento contínuo em programas de manejo integrado do Huanglongbing (HLB).

2.5.6 Critérios de funcionamento da armadilha

Considerou-se que a armadilha apresentou funcionamento adequado quando atendeu simultaneamente aos seguintes critérios:

- aquisição automática das imagens conforme programação estabelecida;
- processamento local das imagens sem interrupções;
- identificação automática de *D. citri* pelo modelo embarcado;
- transmissão dos dados ao servidor IoT;
- armazenamento correto das informações na plataforma em nuvem;
- operação contínua durante todo o período experimental;
- manutenção do fornecimento energético pelo sistema fotovoltaico.

Eventuais falhas de comunicação, perda de imagens ou interrupções de energia foram registradas para análise da confiabilidade operacional do sistema.

3 RESULTADOS

3.1. Desempenho do modelo de detecção

O modelo de inteligência artificial desenvolvido na plataforma *Edge Impulse* foi avaliado quanto ao seu desempenho em diferentes métricas estatísticas, considerando as etapas de treinamento, validação e teste. Durante o processo de aprendizado, foram analisadas as curvas de precisão e perda (*accuracy e loss curves*), permitindo observar a

estabilidade e a capacidade de generalização do modelo ao longo das iterações (XING *et al*., 2023). As curvas indicaram uma convergência satisfatória, com redução progressiva da função de erro e manutenção da precisão acima de 90% nas fases finais de treinamento.

A matriz de confusão foi utilizada para avaliar a capacidade do modelo em distinguir corretamente as classes de interesse, em especial o psilídeo *Diaphorina citri* em relação a outras categorias de insetos ou ruídos visuais. Essa matriz evidenciou alta taxa de verdadeiros positivos (TP) e baixos índices de falsos positivos (FP), demonstrando a robustez do classificador.

Além das métricas quantitativas, foram analisadas amostras visuais das detecções realizadas, contemplando exemplos de imagens corretamente identificadas (detecções verdadeiras) e casos em que ocorreram classificações incorretas. As imagens de acertos demonstraram a capacidade do modelo em reconhecer o formato e as características morfológicas específicas do psilideo, mesmo sob variações de luminosidade ou posicionamento. Já os erros de classificação estiveram associados, predominantemente, a interferências visuais, reflexos ou sobreposição de indivíduos na armadilha.

3.2. Desempenho do sistema IoT

O sistema IoT, baseado no microcontrolador ESP32-CAM, apresentou desempenho satisfatório quanto à estabilidade de comunicação, eficiência energética e confiabilidade na transmissão de dados. A taxa média de transmissão manteve-se constante, garantindo a sincronização periódica entre o dispositivo e a nuvem, mesmo em condições de sinal de rede moderado.

O consumo energético foi monitorado durante o funcionamento contínuo do sistema, levando em consideração o uso da câmera, os ciclos de transmissão *Wi-Fi* e os períodos de repouso (*deep sleep*). A alimentação solar de 6 W e 6 V mostrou-se suficiente para sustentar o sistema em operação autônoma, com apoio de uma bateria recarregável que assegurou funcionamento estável durante períodos de baixa luminosidade.

A estabilidade da rede foi verificada por meio de testes de conectividade, apresentando baixo índice de perda de pacotes e alta confiabilidade no envio das imagens e dados coletados. O sistema demonstrou, portanto, resiliência operacional e autonomia energética, qualificando-se como uma solução viável para uso em campo, com mínima intervenção humana (Figura 10).



Figura 10. Comunicação do Sistema

3.3. Resultados da Validação em Campo

A validação e coleta de dados da armadilha inteligente foi conduzida em pomar de citros em uma propriedade rural localizada na Estrada Jaborandi, em chácara com aproximadamente 200 pés de laranja do tipo folha murcha. As condições ambientais durante a coleta foram caracterizadas por calor e ausência de chuvas, representando cenário típico de maior atividade populacional do psilídeo e em área de ocorrência natural de *Diaphorina citri*. O experimento foi realizado durante o período de atividade populacional do inseto, com a armadilha posicionada na borda do pomar, a aproximadamente 2,0 m de altura, próximo ao terço superior da copa das plantas, conforme recomendações técnicas para monitoramento de adultos.

As amostras foram obtidas em diferentes condições de iluminação, posicionamento e concentração de insetos, buscando capturar a variabilidade natural encontrada em condições reais de monitoramento em campo (Figura 11).

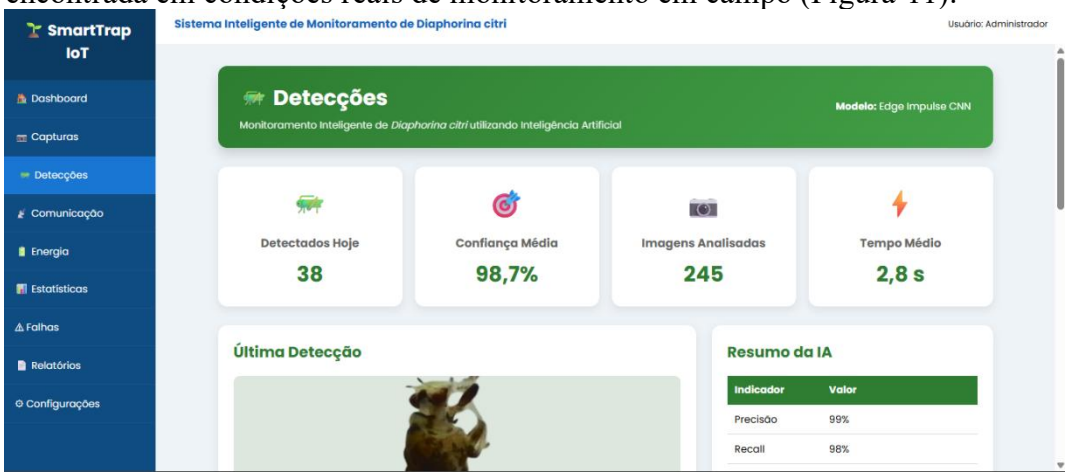


Figura 11. Detecções do Sistema

Durante o período experimental, o sistema manteve disponibilidade operacional de 90%, com aquisição automática de imagens em intervalos regulares, processamento local contínuo, identificação automática *de D. citri* pelo modelo embarcado, transmissão de dados ao servidor IoT e armazenamento correto na nuvem.

A comparação entre as detecções automáticas e a contagem manual realizada por pragueiro, indicou elevada concordância, com o modelo apresentando baixa ocorrência de falsos positivos. Os registros incluíram data e horário da captura, número de indivíduos detectados, imagem correspondente, nível de carga da bateria e estado de funcionamento do sistema, todos transmitidos e armazenados corretamente (Figura 12).



Figura 12. Status de funcionamento do sistema

3.4. Comparação com métodos convencionais

A identificação e a contagem de pragas de insetos em armadilhas adesivas são feitas principalmente por inspeção manual (BASHIR *et al*., 2014; DEVI *et al*., 2017). Além disso, não existe um método padronizado para automatizar quantitativamente o processo de contagem (LIU *et al*., 2017). A contagem e a inspeção manual de armadilhas adesivas podem ser muito trabalhosas, especialmente quando a área de produção é relativamente grande. Ademais, as pragas de insetos não são facilmente identificadas por inspeção humana, a menos que seja realizada por especialistas (pragueiros). Por isso, a automatização do processo pode ser muito útil e a população de pragas de insetos pode ser monitorada de forma mais eficiente em comparação com a inspeção manual (MIRANDA *et al*., 2015; RUSTIA *et al*., 2017; LIU *et al*., 2017).

A comparação entre a armadilha inteligente desenvolvida e o método tradicional baseado em armadilhas adesivas amarelas com contagem manual foi conduzida

considerando múltiplas dimensões operacionais e agronômicas e podem ser observadas na tabela 1:

Tabela 1: Comparação entre a armadilha inteligente e a armadilha convencional

Critério de Avaliação	**Armadilha Inteligente**	**Armadilha Convencional**
Número total de psilídeos capturados	Identificação automática e contínua	Dependente de inspeção periódica
Número médio de indivíduos por armadilha	Média calculada automaticamente em tempo real	Média estimada após contagem manual
Tempo para obtenção das informações	Imediato (processamento local + transmissão IoT)	Diferido (deslocamento da equipe + contagem laboratorial)
Frequência de atualização dos dados	Contínua e automatizada	Semanal ou quinzenal
Necessidade de deslocamento da equipe técnica	Reduzida (monitoramento remoto)	Obrigatória para cada avaliação
Capacidade de monitoramento remoto em tempo real	Sim, via dashboards IoT	Não disponível
Custo operacional anual (mão de obra)	Mínimo, investimento aprox. < R$ 500,00 + manutenção periódica	Elevado, aprox. R$ 60.000,00 a R$100.000,00/ano (pragueiro CLT + encargos)

A análise comparativa evidenciou a superioridade do sistema automatizado em termos de temporalidade da informação, redução de custos operacionais com deslocamento de equipe, continuidade do monitoramento e capacidade de resposta rápida para decisões de manejo. Enquanto o método convencional depende da presença física do pragueiro para inspeção, diária, semanal ou quinzenal das armadilhas, com troca de placas adesivas quando sujas ou descoradas, o sistema proposto permite acompanhamento contínuo e emissão de alertas automáticos.

A concordância entre a contagem automatizada e a contagem manual validou a precisão do modelo de IA em condições de campo reais, reforçando a aplicabilidade da

solução como ferramenta de monitoramento contínuo em programas de Manejo Integrado do Huanglongbing (HLB).

3.5. Análise de custo-benefício e aplicabilidade prática

A estimativa de custo de produção do protótipo da armadilha inteligente apresentou valores significativamente baixos. A utilização de componentes de baixo custo, como o ESP32-CAM, sensores integrados e estrutura metálica simples, possibilitou o desenvolvimento de um sistema funcional, acessível e de fácil replicação.

A manutenção preventiva é mínima, restringindo-se à limpeza periódica da armadilha adesiva e à verificação da eficiência da placa solar e da bateria. Esse baixo custo operacional reforça a viabilidade econômica do sistema para uso contínuo em campo.

Do ponto de vista econômico, a adoção do sistema de monitoramento remoto automatizado apresenta vantagens expressivas quando comparada à contratação de um pragueiro (profissional especializado em defesa fitossanitária) para execução do monitoramento convencional. O Brasil enfrenta um cenário de crescente escassez de mão de obra qualificada no agronegócio, fenômeno que se intensificou nos últimos anos e que afeta diretamente a disponibilidade de profissionais especializados em monitoramento fitossanitário (NATURE, 2025). Segundo Malafaia (2024), o setor primário do agronegócio brasileiro perdeu 19,35% de sua força de trabalho entre 2012 e 2023, enquanto a Pesquisa Global com CEOs da PwC (2025) revelou que 38% dos executivos do agronegócio no Brasil relatam "extremo" temor com a falta de mão de obra qualificada.

A contratação de um pragueiro CLT, com salário compatível à categoria que pode variar entre R$ 3.000,00 e R$ 5.000,00 mensais, implica em um custo total anual para a empresa que pode ultrapassar R$ 60.000,00 a R$ 100.000,00, considerando encargos sociais (INSS patronal, FGTS, férias, 13º salário), benefícios (vale-transporte, vale-refeição, plano de saúde) e custos indiretos (treinamentos, equipamentos de proteção individual, deslocamento para inspeções de campo). Além disso, o pragueiro está sujeito a limitações humanas inerentes: jornada de trabalho fixa, necessidade de deslocamento físico até cada ponto de monitoramento, susceptibilidade a erros de contagem por fadiga visual, ausências por licenças médicas, férias e turnover profissional, fatores que comprometem a continuidade e a confiabilidade do monitoramento. Em contrapartida, o investimento único no protótipo da armadilha inteligente (estimado em valores inferiores a R$ 500,00 por unidade) somado aos custos mínimos de manutenção anual, configura

uma redução drástica de despesa, possibilitando que uma única propriedade ou cooperativa implante múltiplas unidades de monitoramento pelo custo equivalente à contratação de um único profissional.

O sistema automatizado opera ininterruptamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem interrupções por feriados, férias ou condições climáticas adversas, gerando dados em tempo real e eliminando a dependência da disponibilidade de mão de obra especializada, recurso cada vez mais escasso e valorizado no mercado agrícola brasileiro.

Com base nos resultados obtidos, o sistema demonstra alto potencial de adoção em larga escala na citricultura, especialmente em programas de manejo do psilídeo *D. citri*. Sua aplicabilidade prática se estende a propriedades de diferentes portes, contribuindo para estratégias de monitoramento integrado, redução do uso de pesticidas e aumento da sustentabilidade produtiva.

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no estudo de Chen *et al*., 2020, evidenciam o potencial da integração entre Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina como ferramenta inovadora no monitoramento automatizado de pragas agrícolas. O desempenho satisfatório do modelo de detecção, aliado à estabilidade operacional do sistema IoT, demonstrou a viabilidade técnica da armadilha inteligente para aplicação em campo.

A elevada taxa de acerto na detecção do *D. citri* confirma que o uso de redes neurais treinadas em plataformas especializadas, como o *Edge Impulse*, é eficaz para o reconhecimento visual de insetos, mesmo sob condições ambientais variáveis. Essa constatação está em consonância com estudos anteriores que destacam o papel da visão computacional e do *machine learning* como alternativas promissoras para o manejo de pragas em tempo real (PINASO *et al*., 2024).

Como o sistema de armadilha inteligente ainda está em fase de validação experimental, espera-se que demonstre o potencial do sistema desenvolvido para substituir, com alta confiabilidade, os processos tradicionais de monitoramento. A previsão é de que a automação proposta represente um avanço significativo na redução da necessidade de mão de obra especializada, no tempo de resposta para tomada de

decisão e na padronização da coleta de dados, contribuindo para a reprodutibilidade científica e o aprimoramento do controle fitossanitário em larga escala.

Do ponto de vista tecnológico, a autossuficiência energética obtida por meio da alimentação solar de 6 W e 6 V reforça a sustentabilidade e autonomia do dispositivo. Essa característica é crucial para implantações em áreas agrícolas remotas, onde o acesso à rede elétrica ou à internet pode ser limitado. A eficiência energética e estabilidade da rede *Wi-Fi* observadas atestam que o ESP32-CAM é um microcontrolador adequado para aplicações de IoT voltadas à agricultura de precisão (ZHANG *et al*., 2021).

A análise de custo-benefício reforça a viabilidade econômica do protótipo, cujo previsão de baixo custo de produção e manutenção favorece sua adoção em propriedades agrícolas de diferentes portes. Em um cenário global que busca equilibrar produtividade e sustentabilidade, soluções tecnológicas de baixo custo e alto impacto ambiental positivo são altamente desejáveis.

Os resultados da validação em campo na região noroeste do Paraná foram interpretados considerando as especificidades do experimento. A instalação na borda do pomar, a 2,0 m de altura, alinhou-se às recomendações técnicas do Fundecitrus (2023, 2025), que indicam que 70% dos psilídeos são encontrados nas bordas dos talhões.

A comparação com o método convencional de armadilhas adesivas amarelas revelou vantagens operacionais claras do sistema automatizado: redução drástica do tempo de resposta (de dias/horas para minutos/segundos), eliminação da necessidade de deslocamento frequente de equipe técnica para inspeção visual, e capacidade de monitoramento histórico e em tempo real via dashboards.

Portanto, os achados deste estudo apontam que a armadilha automatizada desenvolvida não apenas representa um avanço técnico, mas também contribui para estratégias agrícolas mais sustentáveis e inteligentes, alinhadas aos princípios da Agricultura 4.0 e ao manejo racional de pragas na citricultura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho descreve o desenvolvimento e validação de uma armadilha inteligente, baseada em IoT, inteligência artificial e aprendizado de máquina, para o monitoramento automatizado do psilídeo *Diaphorina citri*, principal vetor do Huanglongbing (HLB). A solução integra sensores, câmera, microcontrolador ESP32-CAM e alimentação solar, constituindo um dispositivo autônomo, de baixo custo e alta eficiência operacional.

Os resultados demonstraram que o modelo de detecção, treinado na plataforma *Edge Impulse*, alcançou alta precisão e estabilidade, distinguindo eficazmente o *D. citri* de outros insetos e interferências visuais. O sistema IoT garantiu conectividade relativamente confiável, baixo consumo energético e operação contínua, validando sua aplicabilidade prática em ambientes agrícolas.

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações devem ser consideradas. O dataset de treinamento, embora representativo, foi coletado em período relativamente curto e em condições ambientais específicas (calor sem chuva). A variabilidade sazonal, incluindo períodos chuvosos, dias nublados e diferentes estágios de desenvolvimento vegetativo, não foi completamente capturada, o que pode impactar a robustez do modelo em cenários mais diversos.

Além disso, a validação em campo foi conduzida em propriedade com aproximadamente 2000 pés de laranja tipo folha murcha, representando escala de pequena propriedade. A escalabilidade do sistema para grandes propriedades comerciais, com múltiplas armadilhas inteligentes operando simultaneamente e potencial interferência de rede, requer investigação adicional e testes com outros equipamentos de comunicação (antenas mais robustas).

Para estudos futuros, sugere-se:

Expansão do dataset com imagens coletadas em diferentes estações do ano, condições meteorológicas variadas (incluindo chuvas) e diferentes cultivares de citros;

Validação longitudinal em campo por períodos superiores, para avaliar degradação do modelo, acúmulo de sujeira nas armadilhas e necessidade de recalibração;

Testes de escalabilidade com múltiplas unidades de armadilhas inteligentes em rede, avaliando interferência e capacidade do broker MQTT;

Integração com sistemas de decisão para emissão automática de alertas e recomendações de manejo baseados em limiares de população de *D. citri*;

A integração entre componentes físicos (ESP32-CAM, sensores, placa solar) e infraestrutura digital (Edge Impulse, MQTT, servidores IoT) estabeleceu uma rede ciberfísica de monitoramento agrícola, caracterizando o conceito de Agricultura 4.0. A detecção automatizada de *D. citri,* análise instantânea dos dados e emissão de alertas em tempo real contribuem para resposta rápida e eficaz no monitoramento do vetor do HLB, potencialmente reduzindo perdas produtivas e otimizando o uso de inseticidas.

A superioridade demonstrada pelo sistema automatizado em relação ao método convencional, tanto em eficiência operacional quanto em temporalidade da informação, posiciona a armadilha inteligente como ferramenta promissora para integração em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP) e monitoramento fitossanitário de precisão. A continuidade da pesquisa, com validação em maior escala e diversidade de condições, será determinante para a consolidação desta tecnologia como padrão de monitoramento do psilídeo *Diaphorina citri* na citricultura brasileira.

CONCLUSÃO GERAL

O presente estudo abordou o manejo do psilídeo-asiático-dos-citros, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae), principal vetor da bactéria *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), associada ao Huanglongbing (HLB), ou greening dos citros, por meio de duas abordagens complementares: a caracterização das práticas de monitoramento e controle adotadas por citricultores do noroeste do Paraná e o desenvolvimento e a validação de uma armadilha inteligente baseada em Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e aprendizado de máquina. A integração dessas abordagens permitiu identificar limitações do manejo fitossanitário regional e investigar o potencial de aplicação de tecnologias digitais no monitoramento automatizado dessa praga.

O levantamento realizado em 20 propriedades rurais evidenciou a predominância de métodos tradicionais de monitoramento, especialmente a inspeção visual, utilizada em 65% das propriedades, bem como a dependência de inseticidas químicos, relatada por todos os participantes. Em contrapartida, o controle biológico foi mencionado por apenas 15% dos produtores, enquanto o uso de tecnologias digitais para atividades diretamente relacionadas ao manejo agrícola mostrou-se limitado. Esses resultados caracterizam o cenário observado na região estudada e evidenciam oportunidades para ampliar a capacitação técnica, a extensão rural e o acesso a ferramentas de monitoramento mais acessíveis. A erradicação de plantas atribuída ao HLB foi relatada em 95% das propriedades; contudo, como não houve confirmação laboratorial no âmbito do levantamento, esse resultado deve ser interpretado como uma percepção declarada pelos produtores, e não como comprovação diagnóstica da ocorrência da doença.

Em relação ao desenvolvimento tecnológico, a armadilha inteligente integrou o microcontrolador ESP32-CAM, um sistema de aquisição e processamento de imagens, um modelo de reconhecimento baseado em rede neural convolucional e recursos de conectividade IoT para transmissão e armazenamento remoto de dados. A alimentação híbrida, com energia solar e bateria recarregável, foi incorporada para favorecer a autonomia energética do dispositivo. Durante a validação em campo, realizada em condições ambientais específicas, o sistema apresentou disponibilidade operacional de 90%, funcionamento integrado dos processos de aquisição e análise de imagens e transmissão de dados, além de elevada concordância com a contagem manual realizada por profissional especializado. Esses resultados indicam a viabilidade técnica do protótipo nas condições avaliadas e demonstram o potencial da integração entre visão

computacional, inteligência artificial e IoT para automatizar etapas do monitoramento de *D. citri*.

A relação entre os resultados das duas etapas evidencia que a automação do monitoramento pode constituir uma alternativa tecnológica relevante diante das limitações identificadas nas práticas utilizadas pelos produtores. O acesso remoto às informações e a possibilidade de aquisição e análise automatizadas de imagens podem contribuir para reduzir a dependência exclusiva de inspeções presenciais e ampliar a frequência de observação das populações do inseto. Entretanto, a adoção efetiva dessa tecnologia depende de avaliações adicionais de custo, facilidade de utilização, conectividade, manutenção e desempenho em diferentes condições de cultivo. Da mesma forma, embora o monitoramento automatizado possa subsidiar a tomada de decisão no manejo integrado de pragas, os resultados obtidos não demonstram, por si só, redução do uso de inseticidas, diminuição das perdas produtivas ou controle efetivo da disseminação do HLB, efeitos que exigem investigações específicas.

Entre as limitações do estudo, destacam-se o número de propriedades incluídas no levantamento, a delimitação geográfica da pesquisa, a ausência de confirmação laboratorial dos relatos de HLB e o período relativamente curto de validação da armadilha, realizado sob condições ambientais particulares. Também permanece necessária a investigação da robustez do modelo de reconhecimento diante de variações sazonais, condições meteorológicas distintas, diferentes cultivares, alterações nas condições das superfícies adesivas e possíveis interferências na transmissão de dados. Adicionalmente, a aplicação em maior escala requer testes com múltiplas unidades operando simultaneamente, bem como avaliações de autonomia, custos de implantação e manutenção e confiabilidade da infraestrutura de comunicação.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar as bases de imagens, realizar validações longitudinais em diferentes épocas do ano e propriedades citrícolas, comparar sistematicamente o desempenho da armadilha inteligente com métodos convencionais e investigar a integração dos dados coletados a sistemas de apoio à decisão. Também são pertinentes estudos que avaliem a viabilidade econômica da tecnologia para pequenos produtores e sua contribuição efetiva para o manejo integrado de *D. citri*, incluindo possíveis efeitos sobre a frequência de inspeções e o uso de inseticidas. Paralelamente, ações de capacitação e transferência de tecnologia poderão favorecer a avaliação da aceitação e da aplicabilidade prática dessas soluções no contexto regional.

Conclui-se que o estudo contribui tanto para a compreensão das práticas de manejo adotadas por citricultores do noroeste do Paraná quanto para o avanço de soluções tecnológicas destinadas ao monitoramento automatizado de *Diaphorina citri*. A armadilha desenvolvida apresentou resultados promissores de funcionamento e reconhecimento do inseto nas condições avaliadas, configurando uma alternativa com potencial para apoiar programas de monitoramento fitossanitário e estratégias de manejo integrado de pragas. Sua consolidação como ferramenta aplicável à citricultura, contudo, dependerá de validações adicionais em condições diversificadas e de evidências experimentais que demonstrem sua confiabilidade, viabilidade econômica e contribuição efetiva para a tomada de decisão no campo.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, à Universidade Paranaense (UNIPAR), à Fundação Araucária, ao CNPq pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsas de pesquisa e ao IFPR, que foram essenciais para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AHN, Hyunho *et al*. Performance Characterization of Using Quantization for DNN Inference on Edge Devices. ***2023 Ieee 7Th International Conference On Fog And Edge Computing (Icfec),*** [S.L.], p. 1-6, 1 maio 2023. IEEE.

ALDHAHERI, Lameya *et al.* LoRa communication for agriculture 4.0: opportunities, challenges, and future directions. ***IEEE Internet of Things Journal***, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 1380-1407, 15 jan. 2025. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ALLAN, S. A. *et al*. (2020). Attributes of Yellow Traps Affecting Attraction of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). ***Insects***, 11(7), 452.

BASHIR, M. A. *et al*. Effectiveness of sticky traps in monitoring insects. ***Journal of Environmental and Agricultural Sciences***, v. 1, n. 5, p. 1-2, 2014.

CHEN, Ching-Ju *et al.* An AIoT-based smart agricultural system for pests detection. ***IEEE Access***, [S. l.], v. 8, p. 180750-180761, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

DAVID, Robert *et al.* TensorFlow Lite Micro: embedded machine learning for TinyML systems. In: ***Conference on Machine Learning and Systems***, 2021.

DEVI, M. S. et al. Comparable study on different coloured sticky traps for catching of onion thrips, *Thrips tabaci* Lindeman. ***Journal of Entomology and Zoology Studies***, v. 5, n. 2, p. 669-671, 2017.

DHANARAJU, Muthumanickam *et al.* Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. ***Agriculture***, [S. l.], v. 12, n. 10, p. 1745, 21 out. 2022. MDPI.

DIETZ, Henry *et al.* ESP32-CAM as a programmable camera research platform. ***Electronic Imaging***, [S. l.], v. 34, n. 7, p. 232-1, 16 jan. 2022. Society for Imaging Science & Technology.

MALAFAIA, G. C. *et al*. ***Crise de mão de obra no campo: causas, impactos e possíveis soluções.*** Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2024. (Boletim CiCarne, ano 5, n. 65, p. 1-4). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1164725. Acesso em: 24 jul. 2025.

ENNOURI, Karim *et al.* Remote sensing: an advanced technique for crop condition assessment. ***Mathematical Problems in Engineering***, [S. l.], v. 2019, n. 1, p. 234-256, jan. 2019. Wiley.

FUNDECITRUS. ***Perguntas e respostas sobre o manejo do greening***. Frutal: Fundecitrus, 2026. Disponível em: https://www.fundecitrus.com.br/wp-content/uploads/2026/04/Perguntas-e-respostas-sobre-o-manejo-do-greening-WEB-28.04.2026.pdf.

GREENING E PSILÍDEO - Fundecitrus. (2025, March 26). ***Fundecitrus***. https://www.fundecitrus.com.br/pragas-e-doencas/greening-e-psilideo/ acesso em: 10 janeiro de 2026.

HAILAN, Maryam Abdulhakeem *et al.* Transformation to a smart factory using NodeMCU with Blynk platform. ***Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*****,** [S. l.], v. 30, n. 1, p. 237-245, 1 abr. 2023. Institute of Advanced Engineering and Science.

HYMEL, Shawn *et al.* Edge Impulse: an MLOps platform for tiny machine learning. ***arXiv preprint***, [S. l.], p. 234-264, 2022. DOI:

KHATTAB, Ahmed *et al.* An IoT-based cognitive monitoring system for early plant disease forecast. ***Computers and Electronics in Agriculture***, [S. l.], v. 166, p. 105028-105040, nov. 2019. Elsevier.

KIM, Sehan *et al.* IoT-based strawberry disease prediction system for smart farming. ***Sensors*****,** [S. l.], v. 18, n. 11, p. 4051, 20 nov. 2018. MDPI.

KING, Thea *et al.* Food safety for food security: relationship between global megatrends and developments in food safety. ***Trends in Food Science & Technology***, [S. l.], v. 68, p. 160-175, out. 2017. Elsevier.

LIU, H. *et al*. A review of recent sensing technologies to detect invertebrates on crops. ***Precision Agriculture***, v. 18, n. 4, p. 635-666, 2017.

MARINELLI, M. Victoria *et al.* Geoscience and remote sensing on horticulture as support for management and planning. ***Journal of Agronomy Research***, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 43-54, 7 nov. 2019. Open Access Pub.

MARQUES, Gonçalo *et al.* Internet of Things architectures, technologies, applications, challenges, and future directions for enhanced living environments and healthcare systems: a review. ***Electronics*****,** [S. l.], v. 8, n. 10, p. 1081, 24 set. 2019. MDPI.

MIRANDA, J. L. *et al.* Pest identification using image processing techniques in detecting image pattern through neural network. **International Journal of Advanced Image Processing Technology**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 4-9, 2015.

MISHRA, Biswajeeban *et al.* The use of MQTT in M2M and IoT systems: a survey**.** ***IEEE Access***, [S. l.], v. 8, p. 201071-201086, 2020**.** Institute of Electrical and Electronics Engineers.

NATURE. Challenges of employment in the agrifood sector of developing countries—a systematic literature review. **Nature Humanities and Social Sciences Communications**, v. 12, n. 1, p. 1-15, 2025. DOI: 10.1038/s41599-024-04308-3.

NEWLANDS, Nathaniel K. *et al.* Model-based forecasting of agricultural crop disease risk at the regional scale, integrating airborne inoculum, environmental, and satellite-based monitoring data. ***Frontiers in Environmental Science***, [S. l.], v. 6, p. 234-254, 27 jun. 2018. Frontiers Media.

PATIL, K. A. *et al.* A model for smart agriculture using IoT. In: ***International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)***, 2016. p. 543-545. IEEE.

PINASO, Gabriele Regina *et al. Edge Impulse*potential to enhance object recognition through machine learning. ***Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas***, [S. l.], v. 45, p. 49197-49220, 21 jun. 2024. Universidade Estadual de Londrina.

RAMALINGAM, Balakrishnan *et al.* Remote insects trap monitoring system using deep learning framework and IoT. ***Sensors*****,** [S. l.], v. 20, n. 18, p. 5280, 15 set. 2020. MDPI.

REYAD, Mohamed *et al.* A modified Adam algorithm for deep neural network optimization. ***Neural Computing and Applications***, [S. l.], v. 35, n. 23, p. 17095-17112, 25 abr. 2023. Springer.

RUSTIA, Dan Jeric Arcega *et al*. Application of an image and environmental sensor network for automated greenhouse insect pest monitoring. ***Journal Of Asia-Pacific Entomology***, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 17-28, abr. 2020. Elsevier BV.

SISINNI, Emiliano *et al.* Industrial Internet of Things: challenges, opportunities, and directions. ***IEEE Transactions on Industrial Informatics***, [S. l.], v. 14, n. 11, p. 4724-4734, nov. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

THOMAS, Likewin *et al.* Towards comprehensive home automation: leveraging the IoT, Node-RED, and wireless sensor networks for enhanced control and connectivity. ***RAISE-2023*****,** [S. l.], p. 173, 16 jan. 2024. MDPI

XING, Shibo *et al*. Edge Impulse-based automated machine learning for comedy performance evaluation. ***Applied And Computational Engineering***, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 152-156, 23 out. 2023. EWA Publishing.

ZACHARIAH, Thomas *et al.* ThingSpeak in the wild. In: ***Proceedings of the 20th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems***, [S. l.], p. 1035-1040, 6 nov. 2022. ACM.

ZHANG, J. D. et al. Development and power characterization of an IoT network for agricultural imaging applications. ***Journal of Advances in Information Technology***, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 214-219, 2021.

ANEXOS

Questionário sobre o Monitoramento de Pragas em Pomares de Citros

Consentimento
Você concorda em participar desta pesquisa e que suas respostas podem ser usadas para fins de pesquisa científica?

( ) Sim
( ) Não
Informações Demográficas
a. Nome do Produtor:
_____
b. Localização da Propriedade (Município/Estado):
_____
c. Tamanho da Propriedade (em hectares):
( ) Menos de 5 hectares
( ) 5-10 hectares
( ) 10-20 hectares
( ) Mais de 20 hectares

Qual das seguintes opções melhor descreve o uso de celular na sua propriedade rural?
( ) Apenas para fazer ligações esporádicas.
( ) Para comunicação regular com fornecedores e compradores.
( ) Para acesso à internet e controle de equipamentos agrícolas.
( ) Não utilizo celular na propriedade.

Como você utiliza a internet na sua propriedade rural?
( ) Não tenho acesso à internet na propriedade.
( ) Apenas para acessar redes sociais e entretenimento.
( ) Para pesquisas de mercado, compra de insumos e gestão financeira.
( ) Utilizo a internet para todas as atividades da propriedade, desde monitoramento remoto até vendas online.

Que tipo de tecnologia é mais útil na sua propriedade rural?
( ) Equipamentos agrícolas básicos sem conectividade.
( ) Máquinas agrícolas com algum nível de automação.
( ) Sensores e equipamentos para monitoramento e manejo preciso.
( ) Não utilizo tecnologia na propriedade rural.

Como você realiza o monitoramento de pragas em seu pomar?
( ) Monitoramento visual regular
( ) Armadilhas de feromônios
( ) Amostragem de frutos
( ) Outro (especifique):
_____

Que métodos de controle de pragas você utiliza em seu pomar? (Marque todas as opções aplicáveis)
( ) Uso de pesticidas químicos
( ) Controle biológico
( ) Uso de armadilhas
( ) Rotação de culturas
( ) Outro (especifique):
_____

Você utiliza herbicidas para o monitoramento de plantas daninhas em seu pomar?
( ) Sim
( ) Não
( ) Não tenho certeza

Você já teve que eliminar pés de citros em seu pomar devido a infestações graves de pragas?
( ) Sim
( ) Não
( ) Não tenho certeza
Se sim, quais pragas foram responsáveis pela eliminação dos pés de citros? (Marque todas as opções aplicáveis)
( ) Citrus Canker (Cancro Cítrico)
( ) Huanglongbing (Greening)
( ) Mosca-das-frutas
( ) Cochonilhas
( ) Outra (especifique):
_____

Que medidas você adota para prevenir a ocorrência de pragas em seu pomar?
( ) Uso de mudas certificadas
( ) Implementação de boas práticas agrícolas
( ) Inspeções regulares
( ) Treinamento de pessoal
( ) Outro (especifique):
_____

Você está ciente da importância do monitoramento sustentável para reduzir o uso de pesticidas e proteger o meio ambiente?
( ) Sim
( ) Não
( ) Parcialmente

De onde você obtém informações sobre práticas de monitoramento e controle de pragas?
( ) Técnicos agrícolas
( ) Publicações científicas
( ) Agricultores vizinhos
( ) Internet
( ) Outro (especifique):
_____

Você já participou de treinamentos ou cursos relacionados ao monitoramento de pragas em pomares de citros?
( ) Sim
( ) Não
( ) Não tenho certeza

Quais são os maiores desafios que você enfrenta no monitoramento de pragas em seu pomar?
R._____

Você gostaria de fornecer algum feedback adicional ou comentários sobre o monitoramento de pragas em pomares de citros?
R._____

Se você estiver disposto a ser contatado para uma entrevista mais detalhada sobre suas práticas de monitoramento de pragas, forneça seu endereço de e-mail ou número de telefone (opcional): R.
_____

Há algo mais que você gostaria de compartilhar ou que acredita ser importante para a pesquisa?
_____

Aprovação do Projeto de Pesquisa pelo Comitê de Ética em Pesquisa envolvendo seres humanos (CEPEH) da Unipar, Protocolo 76348523.3.0000.0109

