USO DE DRONES COM SENSORES MULTIESPECTRAIS PARA O MONITORAMENTO PRECOCE DE DOENÇAS EM CULTURAS

Júlia Aparecida Botelho Paulucio, Isabele Andrade Garcia, João Victor Gomes Ramos, Leonardo Peres Moreira, Ingo Hoffmann Curti, Samuel de Assis Silva.

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitário, s/n, Guararema, 29500-000 – Alegre – ES, Brasil, pauluciojulia@gmail.com, isabeleandradegarcia@gmail.com, Joaogomesr12@gmail.com, leo.peres.moreira@hotmail.com, ingo.curti@edu.ufes.br, samuel.silva@ufes.br.

Resumo

A agricultura de precisão tem incorporado tecnologias que aprimoram o manejo das culturas, destacando-se os drones equipados com sensores multiespectrais. Esses dispositivos permitem a obtenção de imagens de alta resolução, possibilitando a detecção precoce de alterações fisiológicas associadas a doenças, mesmo antes da manifestação de sintomas visíveis. Este trabalho teve como objetivo revisar a literatura sobre a utilização dessa tecnologia no monitoramento de doenças em culturas agrícolas. Os estudos analisados demonstram que índices espectrais, como NDVI, GNDVI e NDRE, apresentam elevada eficiência na identificação de estresses bióticos. Conclui-se que o uso de drones com sensores multiespectrais representa uma ferramenta promissora para aumentar a produtividade, reduzir perdas econômicas e contribuir para uma agricultura mais sustentável.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Sensoriamento remoto. Inteligência artificial. Fitopatologia. Manejo fitossanitário.

Área do Conhecimento: Engenharia agronômica - Agronomia

Introdução

A agricultura mundial enfrenta desafios relacionados ao crescimento da demanda por alimentos, às mudanças climáticas e à necessidade de ampliar a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Nesse contexto, doenças causadas por fungos, bactérias, vírus e outros fitopatógenos representam uma das principais limitações à produtividade agrícola, podendo ocasionar perdas entre 20% e 40% (Mahlein, 2016; Embrapa Café, 2023) quando não há monitoramento e manejo adequados. Dessa forma, o diagnóstico precoce torna-se essencial para reduzir prejuízos econômicos e otimizar o manejo fitossanitário (Fundação Procafé, 2025) e minimizar impactos ambientais, consolidando-se como uma das principais estratégias da Agricultura de Precisão.

Entre as tecnologias empregadas para o monitoramento de doenças em culturas agrícolas, destacam-se as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), ou drones, que possibilitam o levantamento rápido e detalhado de extensas áreas. Equipados com sensores multiespectrais, esses drones registram a refletância da vegetação em diferentes bandas do espectro eletromagnético (azul, verde, vermelho, red edge e infravermelho próximo – NIR), permitindo a identificação de alterações fisiológicas antes mesmo da manifestação visual dos sintomas (Hunt Junior et al., 2020; MicaSense, 2024). A partir desses dados, podem ser calculados índices espectrais, como NDVI, GNDVI e NDRE, amplamente utilizados para detectar reduções no vigor vegetativo associadas a doenças, deficiências nutricionais e estresse hídrico.

Na cafeicultura, estudos têm demonstrado que o sensoriamento multiespectral possibilita a detecção precoce de doenças como ferrugem e cercosporiose (Bento et al., 2023; Fundação Procafé, 2025). Resultados semelhantes também foram observados em culturas como soja, milho, trigo, algodão e cana-de-açúcar (Mahlein, 2016; Mahlein et al., 2018). Além disso, a integração entre drones, inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquina tem elevado significativamente a precisão na identificação automática de doenças (Zhang et al., 2023). Essa combinação tecnológica permite

intervenções localizadas, reduz o uso de defensivos agrícolas, diminui os custos de produção e contribui para maior sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Apesar do elevado potencial, a adoção dessa tecnologia ainda enfrenta desafios relacionados ao custo dos equipamentos, à calibração dos sensores, ao processamento das imagens e à capacitação técnica dos profissionais. Nesse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura científica acerca da utilização de drones equipados com sensores multiespectrais para o monitoramento precoce de doenças em culturas agrícolas, abordando seus princípios de funcionamento, principais aplicações, vantagens, limitações e perspectivas para o avanço da agricultura de precisão.

Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura, de natureza qualitativa e exploratória, com o objetivo de reunir, analisar e discutir evidências científicas sobre a utilização de drones equipados com sensores multiespectrais no monitoramento precoce de doenças em culturas agrícolas.

A pesquisa bibliográfica foi realizada entre junho e julho de 2026, utilizando as bases de dados Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, SciELO e Google Scholar, além de documentos técnicos da Embrapa, universidades e instituições de pesquisa agrícola. Foram empregados, de forma isolada e combinada, os descritores: Agricultura de Precisão, Drones, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), Sensoriamento Remoto, Sensores Multiespectrais, Detecção de Doenças em Plantas (Plant Disease Detection), monitoramento de doenças e cultivo de café.

Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos publicados entre 2018 e 2026 que abordassem aplicações de drones e sensoriamento remoto na detecção de doenças em culturas agrícolas, bem como estudos clássicos relevantes para a fundamentação dos conceitos de sensoriamento remoto e índices espectrais. Foram excluídos trabalhos voltados exclusivamente ao uso de imagens de satélite, sensores hiperespectrais de laboratório ou tecnologias sem aplicação agrícola direta.

Após a seleção, os estudos foram submetidos à leitura integral e organizados em categorias temáticas relacionadas ao funcionamento dos sensores multiespectrais, índices de vegetação, culturas agrícolas, doenças monitoradas, vantagens, limitações e perspectivas futuras. A análise foi conduzida de forma descritiva e comparativa, buscando identificar convergências, divergências e lacunas na literatura, além de sintetizar o estado da arte e discutir perspectivas para o avanço das pesquisas na área, conforme os pressupostos de uma revisão integrativa da literatura.

Resultados

A agricultura de precisão e o uso de drones, nas últimas duas décadas, consolidaram-se como uma das principais estratégias para aumentar a eficiência produtiva das propriedades rurais. O princípio fundamental dessa abordagem consiste no manejo localizado das lavouras, levando em consideração a variabilidade espacial e temporal existente dentro de uma mesma área agrícola.

Nesse contexto, os drones representam uma importante evolução tecnológica, pois permitem a obtenção de imagens com resolução espacial muito superior à fornecida por satélites, além de possibilitarem levantamentos em qualquer momento do ciclo da cultura.

Outra vantagem relevante refere-se à rapidez na aquisição dos dados. Enquanto uma inspeção convencional pode demandar várias horas de caminhada em campo, os drones possibilitam levantamentos rápidos e detalhados de extensas áreas agrícolas, produzindo ortomosaicos e mapas temáticos que auxiliam na tomada de decisão (Zhang; Kovacs, 2012; Embrapa, 2022).

Além disso, os drones permitem monitoramentos frequentes, favorecendo a identificação de alterações fisiológicas ainda nos estágios iniciais das infecções.

Sensores multiespectrais. Os sensores multiespectrais capturam a energia refletida pelas plantas em diferentes comprimentos de onda, possibilitando a detecção de alterações fisiológicas antes mesmo do surgimento de sintomas visíveis (Mahlein, 2016; Hunt Junior et al., 2020). Enquanto o olho humano enxerga apenas a faixa visível do espectro (aproximadamente entre 400 e 700 nm), esses sensores registram bandas adicionais. Entre os índices espectrais, o NDRE tem se destacado pelo melhor desempenho na detecção de doenças em estágios iniciais (Mahlein et al., 2018; MicaSense, 2024).

Cada folha saudável apresenta um padrão característico de refletância. Quando ocorre infecção por fungos, bactérias ou vírus, diversas alterações fisiológicas modificam esse comportamento espectral, como: redução do teor de clorofila, diminuição da atividade fotossintética, alterações na transpiração, mudanças estruturais no tecido foliar e redução do conteúdo de água. Essas modificações tornam-se detectáveis dias ou até semanas antes do aparecimento dos sintomas visíveis. Consequentemente, é possível realizar aplicações localizadas de fungicidas, reduzindo perdas econômicas e impactos ambientais.

Principais índices espectrais. A interpretação das imagens obtidas pelos drones é realizada através de índices matemáticos que relacionam diferentes bandas espectrais. Os principais encontrados na literatura são apresentados na Tabela 1. Além de NDVI, GNDVI e NDRE, o SAVI minimiza a interferência do solo em áreas com baixa cobertura vegetal, e o EVI é indicado para áreas de alta densidade vegetativa.

Tabela 1 – Principais índices utilizados no monitoramento de doenças.

ÍNDICE	FINALIDADE	APLICAÇÃO
NDVI	Avaliação do vigor vegetativo	Detecta redução da biomassa e estresse inicial
GNDVI	Estimativa do teor de clorofila	Muito utilizado em soja e milho
NDRE	Alterações fisiológicas no estágio inicial	Excelente para detecção precoce de doenças
SAVI	Minimiza interferência do solo	Áreas com baixa cobertura vegetal
EVI	Alta densidade vegetativa	Monitoramento de grandes culturas

Fonte: elaborado pelos autores, com base em MicaSense (2024) e Mahlein et al. (2018).

Aplicações nas principais culturas agrícolas. A literatura científica demonstra que o uso de drones com sensores multiespectrais apresenta resultados promissores em diversas culturas de importância econômica.

Na cafeicultura, pesquisas demonstram eficiência na identificação precoce de ferrugem e cercosporiose (Fundação Procafé, 2025; Embrapa Café, 2023). Mapas gerados permitem identificar focos iniciais de infecção antes da manifestação visual dos sintomas, favorecendo o manejo localizado e reduzindo significativamente o uso de fungicidas. Além disso, a tecnologia auxilia no acompanhamento do desenvolvimento vegetativo, da uniformidade da lavoura e da resposta às práticas de manejo.

Na cultura da soja, os sensores multiespectrais vêm sendo empregados para detectar doenças como ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), mancha-alvo (*Corynespora cassiicola)* e oídio. Alterações na refletância das folhas possibilitam intervenções mais rápidas, reduzindo perdas de produtividade (Mahlein, 2016; Mahlein et al., 2018). No milho, aplicações concentram-se na detecção de cercosporiose e da ferrugem polissora, causada pelo fungo *Puccinia polysora*, que pode ser monitorada por sensoriamento remoto (Mahlein, 2016). Os índices espectrais permitem identificar áreas com redução do vigor vegetativo, contribuindo para o planejamento do manejo fitossanitário.

Discussão

A literatura demonstra que o uso de drones equipados com sensores multiespectrais representa um avanço significativo no monitoramento fitossanitário, superando a inspeção visual tradicional pela rapidez na obtenção de dados, cobertura de grandes áreas e capacidade de detectar alterações fisiológicas antes do surgimento dos sintomas das doenças.

A detecção precoce ocorre porque a infecção provoca alterações bioquímicas nas plantas, como redução da clorofila e mudanças na atividade fotossintética, na transpiração e na estrutura do mesófilo foliar (Mahlein, 2016; Hunt Junior et al., 2020). Essas alterações modificam a refletância nas bandas do vermelho, red edge e infravermelho próximo, permitindo sua identificação pelos sensores multiespectrais.

Entre os índices espectrais, o NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*) apresenta melhor desempenho em culturas com maior densidade foliar por ser mais sensível às alterações iniciais causadas por doenças. Já o NDVI, apesar de amplamente utilizado, tende a saturar em áreas com

elevada biomassa, reduzindo sua eficiência em estádios avançados de desenvolvimento. Os estudos também destacam a integração entre drones e inteligência artificial. Algoritmos de inteligência artificial como CNN e Deep Learning alcançam acurácia superior a 90% na classificação automática de doenças (Zhang et al., 2023).

Na cafeicultura, imagens multiespectrais permitem identificar precocemente ferrugem (*Hemileia vastatrix),* cercosporiose (*Cercospora coffeicola)* e mancha de phoma (*Phoma spp.)*, favorecendo aplicações localizadas de fungicidas e reduzindo custos, desperdícios de insumos e impactos ambientais. Resultados semelhantes são observados em culturas como soja, milho, trigo, algodão e cana-de-açúcar (Mahlein, 2016; Mahlein et al., 2018), nas quais o monitoramento aéreo também possibilita detectar deficiência nutricional e estresse hídrico, contribuindo para um manejo mais preciso.

Apesar dos avanços, a adoção da tecnologia enfrenta desafios como custo elevado, calibração dos sensores e necessidade de capacitação técnica (Embrapa, 2022; Romani et al., 2025). Além disso, a interpretação dos mapas espectrais exige conhecimentos em sensoriamento remoto, fotogrametria, geoprocessamento e fitopatologia, tornando a capacitação técnica um fator fundamental para a expansão da agricultura digital. As principais vantagens e limitações da utilização de drones com sensores multiespectrais estão sintetizadas na Tabela 2, que evidencia tanto os benefícios quanto os desafios dessa tecnologia.

Por fim, a literatura aponta uma tendência de integração entre drones, inteligência artificial e computação em nuvem, possibilitando, no futuro, o monitoramento das lavouras em tempo real, com sistemas automatizados de alerta para doenças e aplicações localizadas totalmente autônomas.

Tabela 2 – Principais vantagens e limitações da utilização de drones com sensores multiespectrais.

ASPECTOS	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
Monitoramento	Identificação precoce de doenças	Dependência das condições climáticas
Produtividade	Redução de perdas agrícolas	Alto investimento inicial
Manejo Fitossanitário	Aplicação localizada de defensivos	Necessidade de calibração dos sensores
Sustentabilidade	Menor uso de agroquímicos	Exige profissionais capacitados
Aquisição de Dados	Alta resolução espacial	Grande volume de dados para processamento
Tomada de decisão	Rapidez e precisão	Necessidade de softwares especializados

Fonte: elaborado pelos autores, com base em Embrapa (2022) e Romani et al. (2025).

Perspectivas futuras. A evolução dos sensores ópticos, aliada ao desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial e plataformas de agricultura digital, tende a ampliar significativamente o uso dos drones no monitoramento fitossanitário. Espera-se que sensores multiespectrais mais leves, acessíveis e precisos favoreçam a popularização dessa tecnologia entre pequenos e médios produtores.

Além disso, a integração entre drones pulverizadores e drones de monitoramento deverá permitir que áreas identificadas com focos iniciais de doenças recebam aplicações localizadas de forma automática, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência operacional das propriedades rurais.

Outra tendência promissora consiste na utilização de modelos capazes de prever surtos de doenças a partir da combinação de imagens aéreas, dados meteorológicos e histórico da lavoura. Essa abordagem representa um avanço significativo rumo à chamada agricultura 5.0, caracterizada pela automação, conectividade e tomada de decisão orientada por dados.

Conclusão

O uso de drones equipados com sensores multiespectrais representa uma das mais relevantes inovações tecnológicas incorporadas à agricultura de precisão nas últimas décadas. A capacidade desses equipamentos de detectar alterações fisiológicas nas plantas antes da manifestação visual dos sintomas das doenças proporciona ganhos expressivos em eficiência, sustentabilidade e produtividade.

Os estudos analisados demonstram que índices espectrais como NDVI, GNDVI, NDRE, SAVI e EVI são eficazes na identificação de estresses bióticos em diferentes culturas (Mahlein et al., 2018;

MicaSense, 2024), possibilitando intervenções mais rápidas e precisas. Quando associados à inteligência artificial, esses índices apresentam elevado potencial para automatizar a classificação de doenças (Zhang et al., 2023) e apoiar a tomada de decisão no campo.

Na cafeicultura, soja e milho, a tecnologia tem contribuído para reduzir perdas produtivas, otimizar o uso de defensivos agrícolas (Fundação Procafé, 2025; Embrapa Café, 2023) e minimizar impactos ambientais, alinhando-se aos princípios da agricultura sustentável.

Entretanto, desafios como o custo e a necessidade de capacitação técnica ainda precisam ser superados (Embrapa, 2022). Dessa forma, conclui-se que os drones com sensores multiespectrais constituem uma ferramenta estratégica para o monitoramento precoce de doenças, com forte potencial de transformar o manejo fitossanitário das culturas agrícolas nos próximos anos.

Referências

BENTO, N. L.; FERRAZ, G. A. e S.; SANTANA, L. S.; SILVA, M. L. O. Coffee growing with remotely piloted aircraft system: bibliometric review. AgriEngineering, v. 5, n. 4, p. 2458–2477, 2023.

EMBRAPA. Agricultura de precisão: conceitos e aplicações. Brasília: Embrapa, 2022.

EMBRAPA CAFÉ. Tecnologias para a cafeicultura brasileira. Brasília: Embrapa Café, 2023.

FUNDAÇÃO PROCÁFÉ. Boletins técnicos sobre manejo fitossanitário do cafeeiro. Varginha, MG, 2025.

HUNT JUNIOR, E. R. et al. Remote sensing leaf chlorophyll content using multispectral indices. Precision Agriculture, 2020.

MAHLEIN, A. K. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. Plant Disease, v. 100, p. 241–251, 2016.

MAHLEIN, A. K. et al. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art. Annual Review of Phytopathology, v. 56, p. 535–558, 2018.

MICASENSE. Multispectral Imaging Guide. Seattle, 2024.

ROMANI, L. A. S.; SILVA, T. L.; GREGO, C. R.; MASSRUHÁ, S. M. F. S. UAV-based automation: a case study of coffee crop input application in Caconde, Brazil. Anais do Workshop Científico do Centro de Ciência para o Desenvolvimento em Agricultura Digital, 2025.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agriculture, v. 13, n. 6, p. 693–712, 2012.

ZHANG, D. et al. Deep learning for plant disease detection using UAV multispectral imagery. Remote Sensing, 2023.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. Além disso, agradecem ao Laboratório de Mecanização e Agricultura de Precisão e Digital (LABMAP) e a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).