

# Agricultura 4.0: Integração de *IoT*, 5G e Inteligência Artificial em prol da Eficiência e Sustentabilidade no Campo

Bárbara Cássia Florentino Rosa  
Mestranda em Telecomunicações  
barbararosa@inatel.br

Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL

Matheus Ferreira Silva  
Mestrando em Telecomunicações  
matheus.f@inatel.br

Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL

**Resumo** - Este artigo aplica os princípios da Agricultura 4.0 à irrigação de precisão por meio de sensoriamento térmico, multiespectral e hiperspectral embarcado em Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs). O estudo descreve o processo completo, desde a aquisição e calibração radiométrica até a modelagem e execução em campo. São exploradas aplicações do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) em vinhedos sob clima semiárido, da termografia no manejo do algodão, de sistemas de apoio à decisão para irrigação em taxa variável (VRI) e da estimativa de umidade do solo (SMC) a partir de dados hiperspectrais e orbitais. Os resultados evidenciam integração entre sensoriamento aéreo, análise inteligente e controle hidráulico, com ganhos em eficiência e sustentabilidade. O trabalho destaca ainda desafios técnicos e regulatórios e propõe uma estrutura integrada que une diagnóstico remoto, automação e governança de dados no campo.

**Palavras-Chave**—Agricultura 4.0, Inteligência Artificial, Irrigação de Precisão, Sensoriamento Remoto, Veículos Aéreos Não Tripulados.

**Abstract** - This article applies the principles of Agriculture 4.0 to precision irrigation through thermal, multispectral and hyperspectral sensing embedded in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The study describes the complete process, from data acquisition and radiometric calibration to modeling and field execution. Applications include the Crop Water Stress Index (CWSI) in vineyards under semi-arid conditions, thermography for cotton crop management, decision support systems for Variable Rate Irrigation (VRI) and soil moisture content (SMC) estimation using hyperspectral and orbital data. The results demonstrate the integration of aerial sensing, intelligent analysis and hydraulic control, leading to improvements in efficiency and sustainability. The study also highlights technical and regulatory challenges and proposes an integrated framework that combines remote diagnosis, automation and data governance in the agricultural field.

**Keywords**—Artificial Intelligence, Precision Irrigation, Remote Sensing, Smart Agriculture, Unmanned Aerial Vehicles.

## I. INTRODUÇÃO

A Agricultura 4.0 representa a evolução natural do setor agrícola a partir da incorporação de tecnologias digitais, como a *Internet das Coisas* (*IoT*), redes 5G e Inteligência Artificial

Este documento refere-se à segunda entrega de TP546 - *Internet das Coisas* e Redes Veiculares, disciplina referente ao curso de Mestrado em Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), ministrada pelo Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra. O trabalho faz parte dos requisitos básicos para aprovação em tal matéria.

(IA). Essa nova abordagem busca tornar as atividades no campo mais eficientes, sustentáveis e precisas, permitindo que decisões sejam tomadas com base em dados coletados em tempo real [1], [2].

Ao invés de depender de medições pontuais ou observações manuais, o produtor passa a contar com sensores distribuídos pela propriedade, capazes de monitorar continuamente fatores como umidade do solo, temperatura, luminosidade e saúde das plantas. Esses dados são transmitidos por redes sem fio de alta confiabilidade e analisados por sistemas inteligentes que indicam o momento ideal para irrigar, aplicar fertilizantes ou realizar colheitas [3], [4]. O resultado é uma produção mais eficiente, com redução de custos e melhor aproveitamento dos recursos naturais, como água e energia [5].

Entre as aplicações mais promissoras desse conceito está a irrigação de precisão com apoio de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como *drones*. Sabe-se que a água é um dos recursos mais importantes e também mais sensíveis à escassez e ao desperdício. Com o uso desses VANTs equipados com câmeras térmicas e multiespectrais, é possível detectar regiões da lavoura que apresentam *déficit* hídrico antes mesmo que os sintomas sejam visíveis a olho nu [5], [6]. Dessa forma, o agricultor consegue direcionar a irrigação apenas para as áreas que realmente precisam, evitando o uso excessivo de água e aumentando a produtividade da plantação [7], [8].

Diversos estudos recentes reforçam a importância dessa integração entre coleta de dados, análise inteligente e ação automatizada [1]. Para que os benefícios da Agricultura 4.0 sejam plenamente alcançados, é fundamental que exista uma conexão entre as etapas de sensoriamento, processamento de dados, geração de mapas de recomendação e execução das atividades no campo.

Este trabalho, portanto, apresenta os principais fundamentos e aplicações dessa nova era da agricultura, nas Seções II e III, com foco no uso de VANTs e sensores para a otimização do processo de irrigação. Na sequência, discute os desafios e oportunidades para a adoção dessas tecnologias. Por fim, na Seção V, são apresentadas as conclusões do estudo, com destaque para as perspectivas futuras de evolução no setor agrícola.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Estado hídrico, estresse e sinais observáveis

O estado hídrico de uma cultura representa o equilíbrio entre a demanda de água da atmosfera e a disponibilidade de umidade no solo. Esse balanço depende de fatores como a estrutura do dossel, que corresponde à camada superior das plantas, formada principalmente por folhas e ramos, responsável por interceptar a radiação solar. Também influenciam esse processo a profundidade e a distribuição das raízes, a condutividade hidráulica e os ajustes estomáticos [1].

Os estômatos são pequenas aberturas presentes na superfície das folhas que regulam as trocas gasosas entre a planta e o ambiente. Por meio deles, ocorre a entrada de dióxido de carbono necessário à fotossíntese e a liberação de vapor d'água para a atmosfera, processo conhecido como transpiração. Quando há um *déficit* de água no solo, os estômatos se fecham parcialmente para reduzir essa perda de água, o que diminui o resfriamento natural das folhas e eleva sua temperatura. Essa resposta fisiológica permite utilizar a temperatura foliar como um indicador direto de estresse hídrico, desde que sejam considerados outros fatores climáticos, como vento, umidade e radiação solar [5], [6].

A Fig. 1 ilustra a estrutura básica de uma planta, evidenciando as principais partes envolvidas no balanço hídrico, como o dossel, os estômatos e o sistema radicular.

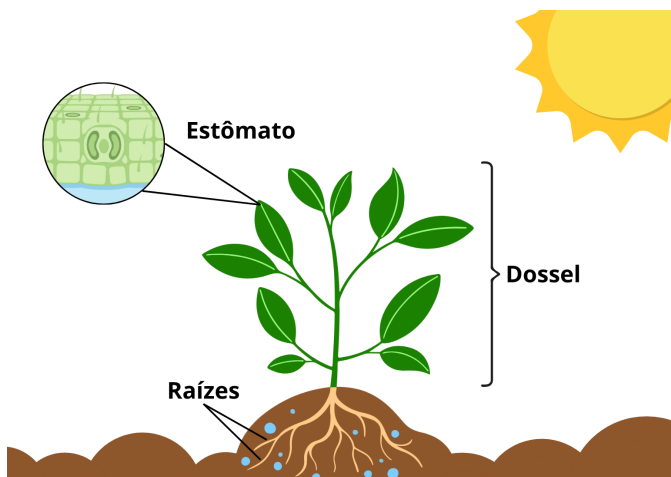


Figura 1: Representação esquemática de uma planta e seus principais elementos.

Além da temperatura, mudanças na cor e no brilho das folhas, associadas a variações nos pigmentos, no conteúdo de água celular e na estrutura do dossel, também indicam o nível de estresse das plantas. Essas alterações afetam a forma como a luz é refletida em diferentes comprimentos de onda, o que possibilita estimar a saúde e o vigor da vegetação por meio de índices espectrais que relacionam a reflectância nas faixas do visível e do infravermelho próximo [3], [4].

### B. Sensoriamento térmico, multiespectral e hiperespectral em VANTs

Os Veículos Aéreos Não Tripulados têm se consolidado como ferramentas valiosas no monitoramento agrícola, espe-

cialmente quando equipados com sensores térmicos, multiespectrais ou hiperespectrais [1]. As câmeras térmicas permitem medir a temperatura da superfície das plantas e calcular indicadores como o *Crop Water Stress Index* (CWSI), que quantifica o nível de estresse hídrico das culturas [5]. Para garantir resultados confiáveis, é necessário controlar variáveis como emissividade, ângulo solar e umidade do ar, além de minimizar interferências do solo nas imagens [6].

Os sensores multiespectrais capturam informações em bandas específicas do espectro eletromagnético, permitindo o cálculo de índices como o NDVI, SAVI, EVI e GNDVI [3]. Esses índices são combinações matemáticas entre diferentes bandas espectrais, utilizadas para estimar propriedades biofísicas da vegetação. Entre os mais empregados destacam-se:

- **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI):** mede a densidade e o vigor da vegetação a partir da diferença entre a refletância no infravermelho próximo (NIR) e no vermelho (RED). Valores mais altos indicam maior atividade fotossintética e biomassa verde;
- **Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI):** variação do NDVI que introduz um fator de correção para minimizar a influência da refletância do solo, sendo útil em áreas com cobertura vegetal esparsa;
- **Índice de Vegetação Aprimorado (EVI):** aumenta a sensibilidade em regiões de alta densidade de vegetação e reduz os efeitos atmosféricos e de saturação do NDVI. Utiliza, além das bandas vermelha e NIR, a banda azul (BLUE) para compensar dispersões atmosféricas;
- **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada no Verde (GNDVI):** substitui a banda vermelha pela banda verde (GREEN), tornando-o mais sensível ao teor de clorofila e útil para identificar deficiências nutricionais nas plantas.

Além desses, há outros índices específicos, como o VARI (Índice de Vegetação Visível Resistente à Atmosfera) e o NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada), que auxiliam na análise da cobertura vegetal e do conteúdo de água na folhagem [4].

As câmeras hiperespectrais, por sua vez, registram um número muito maior de bandas, possibilitando uma análise mais detalhada da composição e do estado fisiológico das culturas, inclusive sob condições de cobertura vegetal heterogênea [4].

Em todos os casos, a qualidade dos dados depende de uma série de cuidados operacionais, como a calibração radiométrica dos sensores, a padronização da altura e da velocidade de voo, a sobreposição adequada das imagens e a correção geométrica durante o processamento [6]. A aplicação correta dessas etapas assegura que as informações obtidas reflitam com precisão as condições reais da lavoura, servindo como base para diagnósticos e decisões agronômicas mais assertivas [1].

A Fig. 2 ilustra o conceito geral de sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão, destacando o uso de veículos aéreos não tripulados equipados com sensores para monitoramento e análise de dados em tempo real.

### C. Do dado à decisão: indicadores, regras e execução

Transformar os dados capturados em decisões práticas é um dos grandes desafios da Agricultura 4.0, pois o processo en-



Figura 2: Representação do uso de veículos aéreos não tripulados no monitoramento agrícola, com coleta e análise de dados em tempo real para apoio à irrigação de precisão e manejo sustentável. Reproduzido de [2].

envolve várias etapas integradas [3]. Primeiro, as imagens devem ser obtidas em condições climáticas estáveis e processadas para formar mosaicos coerentes e sem ruídos [6]. Em seguida, algoritmos de modelagem transformam essas informações em indicadores operacionais, como o teor de umidade do solo, coeficientes de cultura ou classes de *déficit hídrico* [4], [5].

Com base nesses indicadores, sistemas inteligentes podem gerar mapas de prescrição para orientar ações em campo, como exemplo, ajustando a lâmina de irrigação de forma automática em cada setor do pivô central [3]. Essa integração entre análise e execução é viabilizada por controladores conectados que regulam o fluxo de água conforme o diagnóstico obtido [8]. Finalmente, a validação em solo, com medições diretas de umidade, condutância estomática e fluxo de seiva, garante a confiabilidade dos resultados e permite aprimorar continuamente os modelos utilizados [1].

A adoção desses sistemas requer protocolos de qualidade e rastreabilidade, que assegurem a consistência dos dados e o cumprimento de normas técnicas e regulatórias. Além disso, campanhas de calibração e coleta de dados em diferentes condições climáticas contribuem para aumentar a robustez dos modelos e facilitar sua aplicação em diferentes regiões e culturas [4].

### III. EXEMPLOS REAIS

#### A. Vinha Merlot em clima semiárido: métodos do Índice de Estresse Hídrico e implicações operacionais

Em um vinhedo comercial da variedade *Merlot*, localizado em região de clima semiárido, foram avaliadas diferentes metodologias para estimar o Índice de Estresse Hídrico a partir de imagens térmicas capturadas por veículos aéreos não tripulados em diferentes horários do dia e em safras com condições contrastantes. O experimento contemplou tratamentos de irrigação capazes de induzir distintos níveis de estresse hídrico, o que permitiu comparar os índices térmicos com medições fisiológicas de referência ao longo do ciclo da cultura. A instrumentação incluiu câmera térmica embarcada, estação meteorológica e medições pontuais de potencial hídrico do caule, condutância estomática e temperatura foliar, permitindo a correlação entre sinais de folha, dossel e atmosfera [5].

O planejamento das missões considerou o controle de altitude e de ângulo solar, reduzindo distorções de paralaxe e sombreamento. Após a aquisição, foram realizados procedimentos de calibração radiométrica, correção de não uniformidade, ortorretificação e geração de mosaicos térmicos com mascaramento preciso do solo. Três abordagens foram aplicadas: a formulação física, que utilizou superfícies de referência úmida e seca com base no balanço de energia; o método de referências artificiais, com alvos úmidos e secos dispostos no campo; e a abordagem empírica, baseada na relação entre o diferencial térmico entre dossel e ar e variáveis atmosféricas. Os resultados mostraram que a formulação física apresentou maior consistência entre dias e safras, enquanto as alternativas empíricas foram mais sensíveis ao vento e à umidade relativa. Entre as implicações práticas destacam-se a importância do mascaramento rigoroso do solo, o controle do ângulo solar e a manutenção de altitude constante para reduzir ruídos e garantir comparabilidade entre voos [5].

#### B. Algodão: variabilidade dentro do talhão e cadeia de decisão

Em lavouras comerciais de algodão, foi desenvolvido um fluxo operacional para detectar a variabilidade do estado hídrico e converter o diagnóstico térmico em ações de manejo. O planejamento das missões priorizou janelas de radiação solar estável, sobreposição adequada e altitude constante, a fim de minimizar sombras e distorções. As imagens passaram por calibração radiométrica, correção de não uniformidade, ortorretificação e mascaramento do solo, resultando em mosaicos térmicos representativos do dossel [6].

A partir desses mosaicos, foram calculados diferenciais de temperatura entre o dossel e o ar e estimadas variações do índice de estresse hídrico, segmentadas por zonas de manejo. As análises foram comparadas a dados operacionais de irrigação e a medições de referência no solo. A interpretação dos mapas, realizada em conjunto com as equipes de campo, priorizou as áreas mais críticas, orientando ajustes na lâmina de irrigação. As principais fontes de incerteza incluíram variações de emissividade foliar entre cultivares, influência do vento e da umidade sobre o acoplamento aerodinâmico e artefatos de mosaico em terrenos complexos. Para mitigar essas limitações, foram adotadas rotas que mantinham altitude constante, limpeza periódica das lentes e descarte de imagens afetadas por rajadas de vento. O processo resultou em uma cadeia de decisão mais ágil, capaz de transformar informações térmicas em medidas práticas de irrigação [6].

#### C. Sistema de apoio à decisão para irrigação variável com imagens multiespectrais

Foi desenvolvido um sistema de apoio à decisão para irrigação em taxa variável, com base em imagens multiespectrais capturadas por veículos aéreos não tripulados. O objetivo do sistema foi transformar essas imagens em mapas prescritivos capazes de orientar a aplicação de água de forma automatizada e precisa. A arquitetura foi dividida em quatro módulos principais: integração de dados de imagem e meteorologia; extração de índices de vegetação e estimativa de componentes

hídricos; inferência difusa para classificação de níveis de estresse hídrico; e geração do mapa prescritivo final compatível com controladores de pivôs centrais [3].

A validação do sistema incluiu experimentos com diferentes níveis de irrigação para verificar se as zonas mais críticas recebiam volumes de água maiores, conforme a prescrição. Foram comparadas estratégias de controle por zonas, por velocidade de rotação do pivô e por ciclo de válvulas, sendo este último o que apresentou melhor precisão sem necessidade de ajustes mecânicos complexos. O sistema demonstrou flexibilidade e portabilidade, permitindo ajustes de parâmetros conforme a cultura, o tipo de solo e as condições climáticas locais, mantendo coerência entre diagnóstico espectral, contexto meteorológico e prescrição hidráulica [3].

#### *D. Umidade do solo: comparação entre sensoriamento aéreo e orbital*

Foram comparadas estimativas do teor de umidade do solo superficial obtidas por sensores hiperespectrais aéreos e sensores multiespectrais orbitais. As campanhas foram realizadas de forma sincronizada com passagens de satélite e incluíram amostragens de solo para referência laboratorial, medições meteorológicas e mapeamento do uso do solo. Para a modelagem, foram aplicadas diferentes técnicas de regressão, desde métodos lineares até algoritmos não lineares capazes de capturar interações espectrais complexas [4].

Os resultados indicaram que o sensoriamento hiperespectral aéreo proporcionou maior acurácia e detalhamento espacial, especialmente em áreas com solo exposto. Sob dossel vegetal denso, a mistura espectral e o sombreamento das folhas reduziram a precisão das estimativas. As aplicações práticas incluem a geração de mapas de prescrição em períodos críticos, combinando dados orbitais para acompanhamento temporal e dados aéreos para decisões que exigem maior resolução espacial. Para transferência de modelos entre regiões, foi recomendado calibrar os algoritmos conforme classes de cobertura e tipo de solo, garantindo estabilidade entre safras [4].

#### *E. Revisão sistemática e boas práticas de sensoriamento térmico*

Foi realizada uma revisão sistemática sobre o uso do sensoriamento térmico por plataformas aéreas não tripuladas na avaliação do estado hídrico das plantas. O estudo organizou o campo de pesquisa por tipo de cultura, sensor, índice e protocolo de aquisição, destacando a importância das métricas térmicas para o manejo de irrigação. Entretanto, foram apontadas limitações metodológicas quando variáveis atmosféricas e de emissividade não são devidamente controladas. O trabalho também consolidou boas práticas de planejamento de missões, calibração, pré-processamento e validação, além de sugerir a integração multissensorial e a padronização de procedimentos entre pesquisas de diferentes regiões [1].

#### *F. Casos comerciais e aplicações práticas*

Soluções comerciais de imageamento térmico e multiespectral têm sido aplicadas em vinhedos para diagnóstico hídrico,

detecção de anomalias e priorização de correções, resultando em ganhos expressivos de qualidade e economia de água. Fornecedores especializados oferecem produtos que integram camadas térmicas e fluxos de interpretação padronizados, permitindo o agendamento de irrigação com base em mapas georreferenciados. Outras soluções combinam termografia e coeficientes de cultura para auxiliar na gestão hídrica e na detecção de vazamentos em redes pressurizadas. Em pomares, sensores integrados térmicos e multiespectrais são utilizados para avaliar a distribuição de água e identificar falhas em sistemas de irrigação localizada. Operações comerciais em fruticultura de alto valor utilizam voos recorrentes para acompanhar o estresse hídrico e orientar decisões de manejo em tempo quase real. Há ainda iniciativas na vitivinicultura que aplicam o monitoramento aéreo no reúso de água e na gestão de anomalias, promovendo maior eficiência e transparência na utilização dos recursos hídricos [7]–[12].

De forma geral, os exemplos apresentados demonstram que o uso de plataformas aéreas para sensoriamento térmico e espectral representa uma ferramenta poderosa para aprimorar o manejo hídrico agrícola. As experiências revisadas mostram que a integração entre coleta de dados, processamento e tomada de decisão proporciona ganhos expressivos de eficiência e sustentabilidade, servindo como referência para futuras implementações em diferentes culturas e regiões.

## IV. DESAFIOS E OPORTUNIDADES

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto aplicadas à irrigação de precisão ainda enfrenta diversos desafios que vão desde limitações técnicas até questões operacionais, econômicas e regulatórias. Em nível técnico, a sensibilidade da termografia a condições micrometeorológicas exige protocolos rigorosos de controle de vento, umidade relativa e advecção, além de padronização da altitude de voo e mascaramento de solo. Quando essas variáveis são bem gerenciadas, métodos baseados em balanço de energia, como o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI), demonstram maior consistência entre dias e safras [5]. Em culturas extensas, a precisão dos mosaicos térmicos depende fortemente da calibração radiométrica e da correção de não-uniformidade, em que falhas nesses processos podem gerar falsos positivos de estresse. Por isso, rotinas de manutenção de sensores, verificação de lentes e checagem de altitude relativa devem fazer parte dos procedimentos operacionais padronizados [6].

Outro desafio importante é a conversão de dados em recomendações práticas. A relação entre índices espectrais, coeficientes de cultura e indicadores térmicos precisa ser calibrada localmente e compatível com os sistemas hidráulicos já existentes [3]. No caso da estimativa de umidade do solo, a degradação do desempenho sob dossel torna necessário o uso de modelos que considerem textura, estrutura do dossel e variação entre áreas de solo e uso distintos [4]. Além disso, a falta de padronização entre protocolos e a escassez de dados em regiões agrícolas de países em desenvolvimento indicam a necessidade de medições independentes e de diretrizes abertas de qualidade e governança de dados [1].

No campo operacional e econômico, o uso de VANTs para irrigação de precisão requer equipes capacitadas, planejamento de missões e autorizações regulatórias. A execução de voos em múltiplos pivôs demanda automação de processos e processamento em borda, reduzindo o tempo entre o mapeamento e a geração das prescrições [3]. O custo total envolve aquisição de equipamentos, manutenção, baterias, *softwares* e treinamento técnico. A viabilidade econômica, por sua vez, depende da cultura, da disponibilidade hídrica e do nível de automação implementado, sendo maior onde há controle setorial e sistemas de irrigação variável [8].

Questões regulatórias também ganham destaque. As normas de operação aérea impõem restrições de altitude, distância e linha de visada, o que exige planejamento detalhado de rotas e redundância de segurança [1]. Além disso, imagens de alta resolução podem capturar ativos e dados sensíveis, o que requer políticas de governança, retenção e controle de acesso bem definidas [7]. Contratos com prestadores de serviço devem incluir cláusulas específicas sobre propriedade intelectual, confidencialidade e uso secundário dos dados para reduzir riscos jurídicos [12].

Por outro lado, surgem amplas oportunidades de integração e pesquisa. A fusão de dados térmicos, multiespectrais e hiperespectrais permite combinar sinais fisiológicos e estruturais das plantas, aumentando a robustez das análises [4]. A integração com dados de satélite amplia a cadência temporal e reduz custos por hectare, enquanto o uso de modelos de inferência difusa e algoritmos de aprendizado de máquina potencializa o apoio à decisão em tempo real [3]. Avanços em padronização de formatos, interoperabilidade entre controladores e criação de núcleos regionais de processamento podem fortalecer o ecossistema de inovação agrícola [1]. Por fim, sensores mais leves, *drones* com maior autonomia e protocolos abertos de validação prometem ampliar o acesso à agricultura de precisão, especialmente em pequenas e médias propriedades [10], [11].

## V. CONCLUSÃO

A irrigação de precisão apoiada por *drones* e sistemas inteligentes representa um dos principais avanços da Agricultura 4.0 ao unir sensoriamento remoto, análise de dados e automação de processos. Essa integração permite medir com precisão, interpretar de forma orientada por dados e agir com eficiência, transformando o manejo da água em uma atividade cada vez mais sustentável e baseada em evidências.

Os estudos revisados demonstram que a termografia e os índices espectrais são ferramentas eficazes para identificar o estresse hídrico e apoiar decisões agronômicas. Em culturas como a videira e o algodão, as imagens térmicas e multiespectrais possibilitam detectar variações de umidade antes que os sintomas sejam visíveis, permitindo ajustar a irrigação conforme a necessidade real da planta. Já a combinação de sensores hiperespectrais e modelos inteligentes aumenta a precisão na estimativa da umidade do solo e amplia o potencial de automação de sistemas de irrigação.

Para que essas soluções sejam aplicadas em larga escala, é essencial investir em padronização de protocolos, integração com controladores hidráulicos, automação do processamento

e capacitação das equipes envolvidas. Além disso, práticas sólidas de governança e tratamento de dados devem garantir segurança, transparência e rastreabilidade das informações coletadas.

Com esses avanços, a irrigação de precisão tende a evoluir de aplicações pontuais para rotinas integradas de monitoramento e controle, promovendo ganhos expressivos em produtividade, resiliência climática e uso responsável dos recursos hídricos. A consolidação dessas tecnologias marca um passo decisivo rumo a uma agricultura mais inteligente, eficiente e sustentável.

## REFERÊNCIAS

- [1] H. S. Ndlovu, J. Odindi, M. Sibanda, and O. Mutanga, "A Systematic Review on the Application of UAV-Based Thermal Remote Sensing for Assessing and Monitoring Crop Water Status in Crop Farming Systems," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 45, no. 15, pp. 4923–4960, 2024.
- [2] Nyx Wolves, "Drone-Based Computer Vision Inspection," 2025, Institutional Blog Article. Available Online: <https://nyxwolves.com/drone-based-computer-vision-inspection/>.
- [3] X. Shi, W. Han, T. Zhao, and J. Tang, "Decision Support System for Variable Rate Irrigation Based on UAV Multispectral Remote Sensing," *Sensors*, vol. 19, no. 13, p. 2880, 2019.
- [4] H. Shokati, M. Mashal, A. Noroozi, S. Mirzaei, Z. Mohammadi-Doqozloo, K. Nabiollahi, R. Taghizadeh-Mehrjardi, P. Khosravani, R. Adhikari, L. Hu, and T. Scholten, "Comparing UAV-Based Hyperspectral and Satellite-Based Multispectral Data for Soil Moisture Estimation Using Machine Learning," *Water*, vol. 17, no. 11, p. 1715, 2025.
- [5] L. K. A. Payares, M. G. del Campo, A. M. Tarquis, and M. García, "Thermal Imaging from UAS for Estimating Crop Water Status in a Merlot Vineyard in Semi-Arid Conditions," *Irrigation Science*, vol. 43, no. 2, pp. 87–103, 2025.
- [6] L. Lacerda, J. Snider, Y. Cohen, and V. Liakos, "Using UAV-Based Thermal Imagery to Detect Crop Water Status Variability in Cotton," *Smart Agricultural Technology*, vol. 1, p. 100029, 2021.
- [7] Ceres Imaging, "Uncovering Irrigation Issues to Improve Grape Quality," 2019, Customer Story. Available Online: <https://ceres.ai/customer-stories/uncovering-irrigation-issues-to-improve-grape-quality>.
- [8] VineView, "Irrigation," 2025, Product Page. Available Online: <https://vineview.com/data-products/irrigation/>.
- [9] —, "Thermal Imagery for Vineyard Irrigation Scheduling," 2025, Product Page. Available Online: <https://vineview.com/data-products/thermal/>.
- [10] AgEagle MicaSense, "Using Micasense Altum Thermal and Multispectral Imagery to Assess Irrigation Systems," 2023, Use Case. Available Online: [ageagle.com/use-case](https://ageagle.com/use-case).
- [11] —, "Using Micasense Altum to Monitor Water Stress in a Kiwi Orchard," 2019, Use Case. Available Online: <https://ageagle.com/use-cases/using-micasense-altum-to-monitor-water-stress-in-a-kiwi-orchard/>.
- [12] Ceres Imaging, "Managed Correctly, Recycled Water has a Place in Vineyards," 2021, Blog Article. Available Online: <https://ceres.ai/blog/recycling-water-for-vineyards>.