

MÁY BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI VÀ ỨNG DỤNG TRONG TRỒNG TRỌT - BÀI TỔNG QUAN

Nguyễn Hồng Hạnh¹, Nguyễn Thị Ngọc Dinh^{1*}, Phạm Thị Lan Anh², Phan Thị Hải Luyến³

¹*Khoa Nông học, Học viện Nông nghiệp Việt Nam*

²*Khoa Công nghệ thông tin, Học viện Nông nghiệp Việt Nam*

³*Khoa Tài nguyên và Môi trường, Học viện Nông nghiệp Việt Nam*

*Tác giả liên hệ: ntndinh@vnua.edu.vn

Ngày nhận bài: 27.10.2025

Ngày chấp nhận đăng: 25.02.2026

TÓM TẮT

Bài báo trình bày tổng quan về việc ứng dụng máy bay không người lái trong sản xuất trồng trọt, nhằm đáp ứng yêu cầu phát triển nông nghiệp chính xác và thích ứng với biến đổi khí hậu. Mục tiêu nghiên cứu là hệ thống hóa các công nghệ, ứng dụng và thách thức khi sử dụng máy bay không người lái trong quản lý cây trồng. Kết quả cho thấy máy bay không người lái được ứng dụng hiệu quả trong giám sát sinh trưởng, dự báo năng suất, phát hiện sâu bệnh, phun thuốc, bón phân tự động và quản lý đất, nước, dinh dưỡng. Nhờ tích hợp với các cảm biến đa phổ, siêu phổ, nhiệt và đo khoảng cách (LIDAR) cùng trí tuệ nhân tạo, học máy đã giúp thu thập dữ liệu, hỗ trợ ra quyết định chính xác, giảm 20-50% lượng nước, phân bón, thuốc bảo vệ thực vật và giảm phát thải. Mặc dù còn tồn tại hạn chế về chi phí đầu tư, tải trọng và khung pháp lý, máy bay không người lái đang trở thành công nghệ cốt lõi thúc đẩy nông nghiệp thông minh, hiệu quả và phát triển bền vững ở Việt Nam.

Từ khóa: Dự báo năng suất, giám sát cây trồng, phun thuốc và bón phân, quản lý đất - nước - dinh dưỡng, UAV.

Unmanned Aerial Vehicles in Crop Production: A Review

ABSTRACT

This paper provides an overview of the applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in crop production to meet the demands of precision agriculture development and climate change adaptation. The objective of the study was to systematize the technologies, applications, and challenges associated with UAV use in crop management. The synthesis results indicate that UAVs have been effectively applied in monitoring crop growth, predicting crop yield, detecting pests and diseases, automated spraying and fertilization, and managing soil, water and nutrients. By integrating multispectral, hyperspectral, thermal, and LiDAR sensors with artificial intelligence and machine learning techniques, UAVs enable precise data acquisition and decision-making and reducing water, fertilizer and pesticide use by 20-50% while lowering emissions. Despite limitations in investment cost, payload capacity, and regulatory frameworks, UAVs are emerging as a core technology driving smart, efficient, and sustainable agricultural development in Vietnam.

Keywords: Crop monitoring, crop yield forecast, spraying and fertilization, soil-water-nutrition management, UAV.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dân số thế giới ước đạt 10 tỷ người vào năm 2050 gây áp lực lớn lên hệ thống sản xuất lương thực, thực phẩm (de Clercq & cs., 2018). Bên cạnh đó, biến đổi khí hậu làm gia tăng tần suất và cường độ các hiện tượng cực đoan, ảnh hưởng tiêu cực tới sinh trưởng, năng suất và chất lượng

cây trồng (Toromade & cs., 2024). Ngoài ra, suy giảm lực lượng lao động trong nông nghiệp, đặc biệt nhân lực có trình độ gây ra thách thức cho sản xuất nông nghiệp. Trong bối cảnh đó, việc áp dụng các công nghệ chính xác nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và giảm thiểu tác động môi trường trở thành yêu cầu cấp thiết (Morisse & cs., 2022; Omia & cs., 2023).

Máy bay không người lái (UAV- Unmanned Aerial Vehicles) có thể bay mà không cần phi công. Hệ thống UAV bao gồm 3 thành phần chính gồm phương tiện bay, các loại cảm biến và hệ thống điều khiển mặt đất, cho phép thực hiện chế độ bay điều khiển từ xa hoặc tự động (Tahir & cs., 2023). UAV là công nghệ mới nổi, đóng vai trò quan trọng trong phát triển nông nghiệp chính xác nhờ khả năng thu thập dữ liệu nhanh, linh hoạt, độ phân giải cao và chi phí thấp hơn cũng như an toàn so với máy bay có người lái (Pan & cs., 2019). Nhờ đó, UAV được ứng dụng rộng rãi trong giám sát sinh trưởng, ước tính chỉ số diện tích lá (Li & cs., 2022), chỉ số sinh trưởng thực vật EVI (Qui & cs., 2021); dự báo sinh khối và năng suất cây trồng (Pinton & cs., 2021); phát hiện sớm sâu bệnh (Sreenatha & cs., 2025; Dash & cs., 2017), cũng như hỗ trợ quản lý tưới tiêu (Sreenatha & cs., 2025; Zarco-Tejada & cs., 2009); gieo hạt, bón phân và phun thuốc bảo vệ thực vật chính xác (Souvanhnakhoomman, 2021; Spoorthi & cs., 2017; Severtson & cs., 2016), quản lý thiên tai và bảo vệ môi trường (Zhang & Zhu, 2023). Đặc biệt, khi được tích hợp với các công nghệ hiện đại như trí tuệ nhân tạo (AI), Internet vạn vật (IoT), học máy (ML), thị giác máy tính (CV), hệ thống thông tin địa lý (GIS), UAV nâng cao hiệu quả quản lý cây trồng, góp phần thích ứng với biến đổi khí hậu thông qua giảm lượng nước tưới, phân bón và thuốc bảo vệ thực vật, từ đó giảm phát thải và tác động tiêu cực đến môi trường thúc đẩy nền nông nghiệp chính xác và bền vững hơn (Guebsi & cs., 2024).

Hiện nay, ở nhiều quốc gia trên thế giới, UAV trở thành một phần không thể thiếu trong hệ thống nông nghiệp chính xác. Tại Việt Nam, UAV được ứng dụng trong theo dõi sinh trưởng, cảnh báo dịch hại trên lúa tại Sóc Trăng (Võ Quốc Tuấn & cs., 2021), dự báo năng suất lúa tại Hậu Giang (Bùi Hữu Văn & cs., 2023), hỗ trợ bón phân, phun thuốc trừ sâu bệnh cho cà phê, cây ăn trái tại nhiều tỉnh thành, mở ra tiềm năng lớn trong việc nâng cao hiệu quả sản xuất nông nghiệp và giảm thiểu tác động tiêu cực tới môi trường (Phùng Trường Chinh & cs., 2024). Tuy nhiên, việc triển khai UAV trong nông nghiệp còn hạn chế và đối mặt với nhiều thách thức như chi phí đầu tư, yêu cầu kỹ thuật cao,

dữ liệu lớn cần xử lý, hành lang pháp lý quản lý bay (NĐ288/2025/NĐ-CP). Do vậy, bài báo này nhằm tổng hợp các ứng dụng chính của UAV trong canh tác cây trồng, phân tích thách thức và triển vọng phát triển của máy bay không người lái trong nông nghiệp Việt Nam phục vụ chuyển đổi số trong nông nghiệp.

2. CÔNG NGHỆ VÀ THÀNH PHẦN CỦA UAV

UAV là phương tiện bay không người lái, có thể được điều khiển từ xa hoặc tự động thực hiện nhiệm vụ theo các thuật toán điều hướng được lập trình sẵn. Để thực hiện các chức năng giám sát và thu thập dữ liệu, UAV được tích hợp các thiết bị như camera, cảm biến môi trường và hệ thống điều hướng, tạo thành một kiến trúc phần cứng tổng thể (Hình 2).

2.1. Cấu trúc cơ khí và hệ thống đẩy

2.1.1. Khung của UAV

Khung UAV thường được chế tạo từ vật liệu composite như sợi carbon, sợi thủy tinh nhằm đảm bảo nhẹ, bền và giảm rung động, đồng thời vẫn chịu được tải trọng và lực tác động khi bay (Kovani & cs., 2023). Một số UAV sử dụng hợp kim nhôm, titan hoặc vật liệu đặc biệt cho các điều kiện làm việc khắc nghiệt. Thiết kế khí động học của khung đóng vai trò quan trọng trong việc giảm lực cản, tối ưu dòng khí và nâng cao hiệu suất bay, cần được đồng bộ với tải trọng, hệ thống đẩy và điều khiển (Hình 1).

2.1.2. Hệ thống đẩy

Hệ thống đẩy điện của UAV bao gồm động cơ điện không chổi than, bộ điều khiển tốc độ (ESC), nguồn năng lượng và cánh quạt (Elmokadem & cs., 2021). Các thách thức hiện nay liên quan đến tổn thất năng lượng, sinh nhiệt và quản lý công suất giữa các thành phần (Joshi & cs., 2022). Với UAV cỡ lớn hoặc yêu cầu thời gian bay dài, hệ thống lai kết hợp động cơ đốt trong và động cơ điện được xem là giải pháp hiệu quả (Kurt & cs., 2025). Cánh quạt quyết định lực đẩy, trong đó các thông số như đường kính, số cánh, bước cánh và vật liệu ảnh hưởng lớn đến hiệu suất bay (Zhang & cs., 2022) (Hình 1).



Nguồn: Elmokadem & cs. (2021).

Hình 1. Kiến trúc hệ thống các phần cứng trong UAV

2.2. Hệ thống điều khiển, điều hướng và các cảm biến

Khả năng tự chủ của UAV phụ thuộc vào sự phối hợp giữa hệ thống điều khiển, điều hướng và cảm biến, song việc phát triển UAV hoàn toàn tự động vẫn là bài toán phức tạp (Elmokadem & cs., 2021).

2.2.1. Hệ thống điều khiển, điều hướng

Hệ thống điều khiển chuyển bay (FCS) đóng vai trò trung tâm, bao gồm bộ lái tự động, các cảm biến quán tính (IMU), hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu (GNSS) và hệ thống tham chiếu tư thế (AHRS). Các hệ thống nâng cao tích hợp bộ lọc Kalman để hợp nhất dữ liệu, hình thành hệ thống dẫn đường quán tính (INS) giúp nâng cao độ chính xác định vị (Elmokadem & cs., 2021). Hệ thống định vị toàn cầu (GNSS) gồm GPS (Hoa Kỳ), GLONASS (Nga), Galileo (EU), Beidou (Trung Quốc) là nền tảng định vị chính, thường kết hợp kỹ thuật hiệu chỉnh động thời gian thực (RTK) hoặc xử lý động hậu kỳ (PPK) để đạt độ chính xác centimet, song dễ bị suy giảm trong môi trường che khuất tín hiệu (Jarraya & cs., 2025). Các giải pháp tích hợp đa cảm biến và mô hình dẫn đường linh hoạt được đề xuất nhằm đảm bảo ổn định bay (Van Goor & cs., 2023). Ngoài ra, hệ thống tránh vật cản sử dụng LiDAR, radar, cảm biến siêu âm và camera kết hợp thuật toán thị giác

máy tính để nâng cao an toàn bay (Hình 1).

2.2.2. Các cảm biến

Camera RGB, đa phổ, siêu phổ và camera nhiệt là các cảm biến quang học phổ biến, phục vụ lập bản đồ, tính toán chỉ số thực vật và giám sát trạng thái sinh lý cây trồng (Zhang & Zhu, 2023). LiDAR cho phép thu thập đám mây điểm 3D chính xác, hoạt động hiệu quả cả ban ngày và ban đêm. UAV còn có thể mang các cảm biến môi trường hoặc thiết bị phun thuốc, bón phân; tuy nhiên tải trọng bổ sung làm giảm thời gian bay và cần được tối ưu trong thiết kế.

2.3. Hệ thống phần mềm của UAV

Kiến trúc phần mềm UAV thường được thiết kế dạng môđun, cho phép các chức năng điều khiển, điều hướng và thực hiện nhiệm vụ hoạt động linh hoạt, tự động (Elmokadem & cs., 2021). Hai nhóm phần mềm chính gồm phần mềm lập kế hoạch bay và phần mềm xử lý - phân tích dữ liệu.

2.3.1. Phần mềm lập kế hoạch bay

Phần mềm lập kế hoạch bay nhằm tối ưu đường bay, tiết kiệm năng lượng và tránh vật cản. Các thuật toán heuristic, mô hình toán học hoặc học máy, áp dụng cho lập kế hoạch trực tuyến hoặc ngoại tuyến, toàn bộ hoặc cục bộ (Kumar & cs., 2025).



Nguồn: Agrawal & Arafat (2024).

Hình 2. Quy trình làm việc UAV tích hợp cảm biến và AI vào nông nghiệp chính xác

2.3.2. Phần mềm xử lý và phân tích dữ liệu

Phần mềm xử lý dữ liệu UAV hỗ trợ phân loại và nhận dạng cây trồng từ ảnh, trong đó các mô hình phân vùng giúp nâng cao độ chính xác nhận dạng cây trồng (Phùng Trường Chinh & cs., 2024). Dữ liệu sau xử lý thường được lưu trữ và phân tích trên nền tảng GIS hoặc điện toán đám mây, kết hợp các thuật toán học máy và trí tuệ nhân tạo để phục vụ giám sát cây trồng, sâu bệnh và nông nghiệp chính xác (Zhang & Zhu, 2023).

2.4. Quy trình làm việc tích hợp UAV, cảm biến và AI trong nông nghiệp chính xác

Quy trình làm việc tích hợp UAV, cảm biến và AI trong nông nghiệp chính xác được mô tả như hình 2 với 7 bước như sau:

Bước 1 - Thu thập dữ liệu:

UAV được trang bị các cảm biến như camera, LIDAR, hoặc đa phổ để thu thập dữ liệu không gian - thời gian về cây trồng, đất, nước và môi trường.

Bước 2 - Xử lý dữ liệu:

Dữ liệu thô được làm sạch, loại bỏ nhiễu và hợp nhất để đảm bảo độ chính xác trước khi phân tích.

Bước 3 - Trích xuất đặc trưng:

AI thực hiện phân tích kết cấu, hình dạng hoặc màu sắc để phát hiện đối tượng (lá, cỏ dại, vùng bệnh, độ ẩm...).

Bước 4 - Áp dụng thuật toán học máy:

Sử dụng các mô hình học có giám sát, không giám sát hoặc học tăng cường để phân loại và nhận dạng mẫu dữ liệu nông nghiệp.

Bước 5 - Huấn luyện mô hình:

Dữ liệu được chia thành tập huấn luyện và kiểm định, đồng thời tinh chỉnh siêu tham số để tối ưu hiệu suất mô hình.

Bước 6 - Đánh giá mô hình:

Kiểm tra độ chính xác, độ nhạy và chỉ số F1 nhằm đảm bảo mô hình hoạt động tin cậy trên dữ liệu thực tế.

Bước 7 - Vận hành UAV dựa trên AI:

Mô hình được triển khai thực tế để UAV tự động thu thập dữ liệu, ra quyết định và thực hiện các hành động như phun thuốc, tưới nước hay cảnh báo sớm - khép kín chu trình **giám sát - phân tích - hành động** trong nông nghiệp thông minh.

3. ỨNG DỤNG UAV TRONG CANH TÁC CÂY TRỒNG

3.1. UAV trong theo dõi sinh trưởng và năng suất cây trồng

Việc ứng dụng UAV trong giám sát sức khỏe và dự báo năng suất cây trồng đã đạt nhiều tiến bộ, cung cấp công cụ chẩn đoán chính xác, không xâm lấn cho nông nghiệp hiện

đại. UAV được trang bị các camera để tạo ảnh RGB, đa phổ, siêu phổ cùng nhiều loại cảm biến và hệ thống định vị để thu thập dữ liệu có độ chính xác cao trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau.

UAV được ứng dụng trong đánh giá kiểu hình và chọn giống, khi kết hợp ảnh đa phổ và thuật toán học máy để phân loại giống theo mức độ chịu hạn và dự báo năng suất chính xác (Sharma & cs., 2024). Dong & cs. (2024) sử dụng UAV kết hợp chỉ số quang nhiệt và chỉ số huỳnh quang diệp lục (SIF) để phát hiện stress nước và tối ưu hóa lịch tưới, nhờ cảm biến cho phép cập nhật trạng thái thoát hơi nước và cân bằng ẩm liên tục của cây. Sishodia & cs. (2020) chứng minh khả năng phát hiện stress sinh lý của cây như thiếu nước hay dinh dưỡng thông qua ảnh đa phổ từ UAV.

Huang & cs. (2014) sử dụng chỉ số thực vật chênh lệch chuẩn hóa (NDVI) từ UAV và vệ tinh để ước tính sinh trưởng và năng suất cây trồng. Jin & cs. (2017) dùng ảnh RGB độ phân giải cao để ước tính mật độ lúa mì, đạt hệ số xác định

cao với năng suất thực tế ($R^2 = 0,91$). Furukawa & cs. (2019) kết hợp ảnh RGB 3D và chỉ số NDVI để dự đoán năng suất ngô, cho kết quả $R^2 = 0,51$ so với dữ liệu thu hoạch. Njane & cs. (2023) cho thấy ảnh đa phổ thu từ UAV có thể ước tính chiều cao và NDVI của khoai tây với độ chính xác cao (R^2 từ 0,754-0,931) và kết quả đã chứng minh rằng độ cao bay không ảnh hưởng lớn đến độ chính xác NDVI. Kang & cs. (2024) ứng dụng UAV DJI Wizard 4 để thu ảnh đa phổ và mô hình hóa bằng mô hình hồi quy tuyến tính đa biến (MLR), bình phương tối thiểu từng phần (PLS), mạng nơron lan truyền ngược (BPNN) và RF, kết quả mô hình PLS đạt độ chính xác cao nhất ($R^2 = 0,852$; RMSE = 74,468 kg/ha; NRMSE = 7,41%) trong ước tính năng suất lúa mì vụ đông. Tương tự, Norasma & cs. (2018) và Duan & cs. (2019) sử dụng ảnh RGB trong giám sát sinh trưởng sớm và ước tính năng suất lúa với kết quả khả quan. Ngoài ra, sử dụng camera nhiệt, ảnh RCB để dự đoán năng suất xoài dựa trên cấu trúc tán, chỉ số quang học và thuật toán (Sarron & cs., 2018) (Bảng 1).

Bảng 1. Tóm lược nghiên cứu về ứng dụng UAV trong dự đoán năng suất cây trồng

Cây trồng	Công nghệ	Kết quả	Tham khảo
Lúa	UAV + RGB + GPS + camera đa phổ (EVI/LAI/Clrededge)	Dự đoán năng suất và xác định vùng thiếu dinh dưỡng với độ chính xác cao, sai số < 7,1%	Duan & cs. (2021)
Ngô	UAV + RGB	Phát hiện biến động sinh trưởng, dự đoán năng suất theo khu vực, sai số thấp 3,3%	Ge & cs. (2025)
Khoai tây	UAV + camera đa phổ (EVI/NDVI)	Ước tính chính xác chiều cao chỉ số NDVI với hệ số xác định $R^2 = 0,93$	Njane & cs. (2023)
Đậu tương	UAV + Cảm biến + camera đa phổ	Mô hình RF ước tính năng suất ngô đạt độ chính xác cao với $R^2 = 0,91$; sai số dự báo thấp 1,5%	Berveglieri & cs. (2024)
Rau xà lách	UAV+ RGB + NDVI	Dự đoán thời gian thu hoạch với năng suất mô hình đạt độ chính xác cao với hệ số xác định $R^2 = 0,91$	Nakano & cs. (2025)
Xoài	UAV + RGB + Thị giác máy tính	Đếm quả, ước lượng năng suất với hệ số xác định $R^2 = 0,77$; RMSE dao động 20-29%	Sarron & cs. (2018)
Cà chua	UAV + RGB (red-green-blue)	Dự báo năng suất quả với sai số là 4,23%	Johansen & cs. (2020)
Mía	Đa phổ + LIDAR + Chlorophyll	Dự đoán năng suất và hàm lượng đường của cây mía với độ chính xác cao	
Nho	UAV + AI (YOLOv9m)	Mô hình nhận dạng và dự đoán năng suất quả nho đạt độ chính xác là 89,6%	Kodors & cs. (2024)

Ghi chú: RGB: Ảnh đa phổ; NDVI: Chỉ số thực vật chênh lệch chuẩn hóa; EVI: Chỉ số thực vật tăng cường; LAI: Chỉ số diện tích lá, GIS: Hệ thống thông tin địa lý; SVR: Hồi quy vector hỗ trợ; DT: Cây quyết định; RF: Rừng ngẫu nhiên; ML: Học máy; CNN: Mạng nơron tích chập; RMSE: Sai số bình phương trung bình; R^2 hệ số xác định.

3.2. Ứng dụng UAV trong phun thuốc và bón phân tự động cho cây trồng

Ứng dụng UAV trong phun thuốc và bón phân tự động đang trở thành xu hướng chủ đạo của nông nghiệp chính xác nhờ khả năng phân phối vật tư hiệu quả, giảm phát thải và bảo vệ môi trường (Agrawal & Arafat, 2024). Các UAV hiện đại được trang bị cảm biến đa phổ, LiDAR và cảm biến gió để tự động điều chỉnh lưu lượng phun theo chiều cao tán cây, kết hợp AI và hệ thống phun theo tỷ lệ biến đổi theo vùng (VRA) giúp tiết kiệm 30-50% lượng thuốc và phân bón (Guebsi & cs., 2024). Bên cạnh đó, mô hình học sâu (mạng nơron tích chập - CNN, học tăng cường (RL)) cho phép UAV nhận biết stress sinh lý, độ ẩm lá và nhu cầu dinh dưỡng để tối ưu lịch phun - bón trong từng giai đoạn sinh trưởng (Agrawal & Arafat, 2024).

Theo Delavarpour & cs. (2021), UAV có khả năng phun chính xác theo tọa độ, sử dụng cảm biến siêu âm và hệ thống phun ly tâm để kiểm soát kích thước hạt, giảm trôi dạt và tăng độ phủ đều. Nhờ đó, lượng hóa chất có thể giảm 20-40% so với phương pháp thủ công. Tương tự, Bhat & Huang (2021) nhấn mạnh UAV tích hợp AI và dữ liệu lớn có thể xác định vùng cây bị sâu bệnh hoặc thiếu dinh dưỡng, thực hiện phun cục bộ (targeted spraying) thay vì phun toàn bộ, giúp tiết kiệm thuốc bảo vệ thực vật và giảm ô nhiễm. Agrawal & Arafat (2024) báo cáo rằng các UAV hiện đại như DJI Agras T40 và XAG P100 được trang bị hệ thống phun tỷ lệ biến đổi (VRSS) có khả năng điều chỉnh kích thước hạt sương (50-150 μ m), áp suất và tốc độ phun dựa trên dữ liệu thu được từ cảm biến tán lá và bản đồ NDVI. Các UAV này hoạt động ở độ cao 2-10m, năng suất phun trung bình 8-15 ha/giờ, giúp giảm 30-50% lượng thuốc bảo vệ thực vật và tăng độ đồng đều phân bố thuốc trên tán cây 20-25% so với phương pháp thủ công.

Tổng hợp lại, UAV có tiềm năng lớn trong các mô hình hợp tác xã và vùng chuyên canh, đặc biệt với cây trồng sản xuất hàng hóa. UAV không chỉ là công cụ hỗ trợ mà đang trở thành nền tảng công nghệ lõi của canh tác thông minh, kết hợp với AI và IoT để tự động hóa quy trình phun - bón, hướng tới quản lý vật

tư nông nghiệp thích ứng với biến đổi khí hậu, phát thải thấp và mục tiêu Net Zero trong tương lai. Tuy nhiên, cần giải quyết các vấn đề về chi phí đầu tư, an toàn bay và đào tạo nguồn nhân lực vận hành UAV.

3.3. Ứng dụng UAV trong quản lý đất, tưới nước, dinh dưỡng

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và suy giảm tài nguyên, UAV đang trở thành công cụ trọng yếu trong quản lý đất, nước và dinh dưỡng của nông nghiệp chính xác. UAV cho phép thu thập dữ liệu không gian có độ phân giải cao, hỗ trợ giám sát các yếu tố môi trường, đánh giá sức khỏe cây trồng và tối ưu hóa việc tưới tiêu, bón phân và cải tạo đất (Agrawal & Arafat, 2024). Nhờ tích hợp các cảm biến, camera đa phổ, siêu phổ, nhiệt và hệ thống LiDAR, UAV có thể đo lường đồng thời độ ẩm đất, nhiệt độ tán lá, chỉ số diệp lục và mức độ stress sinh lý - những thông số phản ánh trực tiếp hiệu quả quản lý tài nguyên (Delavarpour & cs., 2021).

Trong quản lý đất, UAV được sử dụng để xây dựng bản đồ đặc tính đất về độ ẩm, độ mặn, độ phì và cấu trúc bề mặt. Ảnh đa phổ cho phép xác định sự biến động của các chỉ số NDVI, chỉ số nước chênh lệch chuẩn hóa (NDWI), chỉ số thực vật có hiệu chỉnh phản xạ mặt đất (SAVI) phản ánh tình trạng bốc thoát hơi nước và độ ẩm đất. UAV trang bị cảm biến hồng ngoại giúp xác định vùng đất khô hạn hoặc úng nước với sai số dưới 10% (Guebsi & cs., 2024), từ đó hỗ trợ điều chỉnh tưới tiêu và hạn chế xói mòn ở khu vực đồi dốc, góp phần giảm tổn thất dinh dưỡng và bảo tồn đất.

Trong quản lý nước, UAV đóng vai trò trung tâm trong hệ thống tưới chính xác. Nhờ cảm biến nhiệt và siêu phổ có thể xác định chỉ số stress nước (CWSI), đồng thời đo nhiệt độ tán lá để phát hiện sớm tình trạng thiếu nước (Delavarpour & cs., 2021). Dữ liệu này khi được kết hợp với AI và mô hình học máy (machine learning) sẽ giúp lập bản đồ tưới tự động, tối ưu thời điểm và lượng nước. Nghiên cứu của Bhat & Huang (2021) cho thấy có thể giảm 25-35% lượng nước tưới mà vẫn duy trì năng suất nhờ tối ưu hóa chu kỳ tưới theo điều kiện khí hậu và sinh trưởng thực tế của cây trồng.

Về quản lý dinh dưỡng, UAV tích hợp cảm biến đa phổ và siêu phổ để tính toán chỉ số như NDVI, chỉ số thực vật dựa trên dải đỏ (NDRE) và chỉ số thực vật dựa trên dải xanh (GNDVI) - có mối tương quan chặt chẽ với hàm lượng N, P, K trong cây (Agrawal & Arafat, 2024; Delavarpour & cs., 2021). Kết hợp học máy và học sâu phân tích dữ liệu thu từ UAV giúp phát hiện sớm thiếu hụt dinh dưỡng và lập bản đồ bón phân biến đổi theo vùng (VRF) (Bhat & Huang, 2021). Ngoài ra, khuyến nghị bón phân tự động dựa trên mô hình dự báo năng suất, giúp tăng hiệu quả sử dụng phân bón (NUE) từ 15-20%, giảm phát thải N₂O (Guebsi & cs., 2024).

3.4. Ứng dụng UAV trong phát hiện sâu bệnh hại

Ứng dụng UAV trong giám sát và phòng trừ sâu bệnh hại đang mở ra hướng đi mới cho nông nghiệp chính xác, giúp tăng hiệu quả sử dụng thuốc bảo vệ thực vật, giảm chi phí và hạn chế tác động môi trường. UAV trang bị camera RGB, đa phổ và siêu phổ cho phép phát hiện sớm các dấu hiệu stress sinh học trên lá và tán cây thông qua các chỉ số NDVI, NDRE, GNDVI và EVI (Delavarpour & cs., 2021; Guebsi & cs., 2024).

Khi kết hợp với trí tuệ nhân tạo và học máy, UAV có thể phân loại cây bệnh, vùng bệnh, định vị và lập bản đồ ổ bệnh, xác định vùng cây bị nhiễm do nấm, virus hay côn trùng để can thiệp sớm, chính xác (Chin & cs., 2023; Guebsi & cs., 2024). Khi tích hợp UAV với dữ liệu lớn cho phép theo dõi sự lan truyền của dịch hại theo không gian - thời gian, đưa ra mô hình cảnh báo sớm và hỗ trợ ra quyết định (Bhat & Huang, 2021). Các hệ thống UAV hiện đại còn được trang bị cảm biến siêu âm và radar tránh vật cản, giúp duy trì độ cao phun ổn định và tối ưu đường bay tự động thông minh có thể giảm tới 15% lượng thuốc thất thoát do phun chồng lấn hoặc ảnh hưởng gió (Delavarpour & cs., 2021).

UAV ngày nay vừa là thiết bị phun, vừa là nền tảng quản lý tích hợp theo mô hình giám sát - ra quyết định - hành động góp phần giảm phát thải hóa chất, bảo vệ môi trường và hướng tới nền nông nghiệp thông minh, bền vững. Tuy nhiên, để tăng hiệu quả phát hiện sâu bệnh, cần chất lượng dữ liệu huấn luyện trong điều kiện môi trường khác nhau với từng loại cây trồng.

Tổng hợp các nghiên cứu về ứng dụng UAV trong canh tác cây trồng được thể hiện qua bảng 2.

Bảng 2. Ứng dụng UAV trong canh tác cây trồng

Nhóm ứng dụng chính	Chỉ tiêu theo dõi	Cây trồng	Công nghệ sử dụng	Tham khảo
Giám sát sinh trưởng và phát triển cây trồng	Chiều cao cây, độ che phủ tán, sinh khối, LAI, hàm lượng N, giai đoạn sinh trưởng	Cà chua, bông, ngô, lúa mì	RGB, đa phổ, siêu phổ, LiDAR	Shadrin & cs. (2020); Maimaitijiang & cs. (2020); Zhu & cs. (2022)
Giám sát sức khỏe cây trồng và stress sinh lý	Stress nước, stress nhiệt, tình trạng dinh dưỡng, phản ứng sinh lý	Nho, lúa mì, ngô, lúa gạo, bông, đậu tương	Đa phổ, siêu phổ, nhiệt, huỳnh quang, AI nhúng	Neri & cs. (2024); Dong & cs. (2024); Bukowiecki & cs. (2024)
Phát hiện bệnh và sâu hại cây trồng (chẩn đoán sớm)	Bệnh phấn trắng, bệnh lá, sâu hại	Lúa, ngô, lúa mì, nho, cao su, rau màu	Siêu phổ, RGB, LiDAR, hồng ngoại nhiệt, RTK-GPS, học sâu và AI	Tsouros & cs. (2019); Zeng & cs. (2024); Lambertini & cs. (2022); Chin & cs. (2023)
Dự báo năng suất và đánh giá kiểu hình cây trồng	Kiểu hình, phản ứng sinh lý, năng suất, sinh khối	Lúa mì, ngô, bông, cây ăn quả	Đa phổ, chiếu sáng nhân tạo, LiDAR, học máy	Sharma & cs. (2024); Shahi & cs. (2022)
Quản lý dinh dưỡng và bón phân chính xác	Hàm lượng N, bản đồ dinh dưỡng đất, bón phân định lượng	Lúa mì, ngô, nho, đậu tương	RGB, đa phổ, hồng ngoại, LiDAR	Bukowiecki & cs. (2024); Delavarpour & cs. (2021); Zhu & cs. (2022)
Quản lý tưới tiêu và stress nước	Giám sát độ ẩm, nhiệt độ, điều khiển tưới tự động	Lúa, ngô, cà chua	Đa phổ, hồng ngoại nhiệt, LiDAR, cảm biến khí tượng và IoT kết hợp AI	Sitharthan & cs. (2023)
Hệ thống phun hóa chất tự động và chính xác	Phun thuốc BVTV, phân bón lá, kiểm soát dịch hại	Nho, lúa mì, ngô, đậu tương	Đa phổ, LiDAR, hồng ngoại nhiệt, AI	Bhat & Huang (2021); Delavarpour & cs. (2021)

4. THÁCH THỨC VÀ GIỚI HẠN CỦA UAV TRONG NÔNG NGHIỆP

Mặc dù UAV mang lại nhiều tiềm năng trong phát triển nông nghiệp chính xác, việc triển khai công nghệ này trong thực tiễn tại Việt Nam vẫn đối mặt với nhiều thách thức:

Thứ nhất, khung pháp lý và quản lý không phận đối với UAV còn nhiều hạn chế, thủ tục cấp phép phức tạp, gây khó khăn cho việc triển khai rộng rãi trong sản xuất nông nghiệp, đặc biệt với nông hộ quy mô nhỏ và trung bình.

Thứ hai, chi phí đầu tư ban đầu cao cùng yêu cầu kỹ thuật và đào tạo chuyên môn là rào cản lớn đối với khả năng tiếp cận và vận hành UAV của người sản xuất.

Thứ ba, độ tin cậy của dữ liệu UAV còn phụ thuộc vào điều kiện thời tiết, thông số bay và hiệu chuẩn cảm biến, bên cạnh các giới hạn về tải trọng và thời gian bay.

Thứ tư, việc xử lý và quản lý khối lượng dữ liệu lớn thu thập từ UAV đòi hỏi hạ tầng và phần mềm chuyên dụng, vượt quá khả năng của nhiều cơ sở sản xuất.

Cuối cùng, khả năng tích hợp UAV với các hệ thống nông nghiệp thông minh khác (IoT, dữ liệu khí tượng, quản lý trang trại) còn hạn chế, cần tiếp tục nghiên cứu và hoàn thiện chính sách phù hợp với điều kiện Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Bài tổng quan đã hệ thống hóa và phân tích toàn diện ứng dụng của máy bay không người lái trong sản xuất trồng trọt, cho thấy tiềm năng nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên, giảm chi phí và hạn chế tác động môi trường, qua đó góp phần phát triển nông nghiệp chính xác và bền vững. Trong bối cảnh chuyển đổi số nông nghiệp tại Việt Nam, UAV là công nghệ nhiều triển vọng nhưng vẫn đối mặt với các thách thức về chi phí, nhân lực, dữ liệu và khung pháp lý. Nghiên cứu trong tương lai cần tập trung tích hợp UAV với trí tuệ nhân tạo, dữ liệu lớn và IoT, đồng thời hoàn thiện mô hình ứng dụng và chính sách nhằm thúc đẩy triển khai hiệu quả trong điều kiện Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Agrawal J. & Arafat M.Y. (2024). Transforming Farming: A Review of AI-Powered UAV Technologies in Precision Agriculture. *Drones* (2504-446X). 8(11).
- Berveglieri A., Imai N.N., Watanabe F.S.Y., Tommaselli A.M.G., Ederli G.M.P., de Araújo F.F., Lupatini G.C. & Honkavaara E. (2024). Remote prediction of soybean yield using UAV-Based Hyperspectral Imaging and Machine Learning models. *AgriEngineering*. 6(3): 3242-3260.
- Bhat S.A. & Huang N.F. (2021). Big data and AI revolution in precision agriculture: Survey and challenges. *IEEE Access*. 9: 110209-11022.
- Bukowiecki J., Koller L., Kirchgessner N., Walter A. & Liebisch F. (2024). UAV-based canopy monitoring: Calibration of a multispectral sensor for green area index and nitrogen uptake across several crops. *Precision Agriculture*. Advance online publication.
- Bushnaq S., Mohamed S.A.S. & Khosla R. (2022). UAVs for disaster management: Capabilities, challenges, and applications. *Drones*. 6(11): 326.
- Bùi Văn Hữu, Lưu Trọng Hiếu & Ngô Quang Hiếu (2023). Ứng dụng công nghệ UAV (drones) theo dõi sinh trưởng và dự báo năng suất lúa tại vùng canh tác lúa tỉnh Hậu Giang. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*. 59(Chuyên đề Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ): 35-44.
- Chin R., Catal C. & Kassahun A. (2023). Plant disease detection using drones in precision agriculture. *Precision Agriculture*. 24: 1663-1682.
- Chính phủ (2025). Nghị định số 288/2025/NĐ-CP ngày 05 tháng 11 năm 2025 quy định về quản lý tàu bay không người lái và các phương tiện bay khác.
- Dash J.P., Watt M.S., Pearse G.D., Heaphy M, Dungey H.S. (2017). Assessing very high-resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 131:1-14.
- De Clercq M., Vats A. & Biel A. (2018). Agriculture 4.0: The future of farming technology. *Proceedings of the world government summit, Dubai, UAE*. 2013: 11-13.
- Delavarpour N., Koparan C., Nowatzki J., Bajwa S. & Sun X. (2021). A technical study on UAV characteristics for precision agriculture applications and associated practical challenges. *Remote Sensing*. 13(6): 1204.
- Dong H., Dong J., Sun S., Bai T., Zhao D., Yin Y. & Wang Y. (2024). Crop water stress detection based

- on UAV remote sensing systems. *Agricultural Water Management*. 303: 109059.
- Duan B., Fang S., Gong Y., Peng Y., Wu X. & Zhu R. (2021). Remote estimation of grain yield based on UAV data in different rice cultivars under contrasting climatic zone. *Field Crops Research*. 267: 108148.
- Elmokadem T. & Savkin A.V. (2021). Towards fully autonomous UAVs: A survey. *Sensors*. 21(18): 6223.
- Furukawa F., Maruyama K., Saito Y.K. & Kaneko M. (2019). Corn height estimation using UAV for yield prediction and crop monitoring. In *Unmanned aerial vehicle: Applications in agriculture and environment*. Cham: Springer International Publishing. pp. 51-69.
- Jarraya I., Al-Batati A., Kadri M.B., Abdelkader M., Ammar A., Boulila W. & Koubaa A. (2025). Gns-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satellite Navigation*. 6(1): 9.
- Jin X., Liu S., Baret F., Hemerlé M., Comar A. (2017) Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. *Remote Sens. Environ*. 198: 105-114.
- Johansen K., Morton M.J., Malbeteau Y., Aragon B., Al-Mashharawi S., Ziliani M.G. & McCabe, M.F. (2020). Predicting biomass and yield in a tomato phenotyping experiment using UAV imagery and random forest. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 3: 28.
- Joshi D., Deb D. & Muyeen S.M. (2022). Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles. *Frontiers in Energy Research*. 10: 752012.
- Kang Y., Wang Y., Fan Y., Wu H., Zhang Y., Yuan B. & Li Z. (2024). Wheat yield estimation based on unmanned aerial vehicle multispectral images and texture feature indices. *Agriculture*. 14(2): 167.
- Kurt E., Arabul A.Y., Arabul F.K. & Senol I. (2025). Parallel hybrid propulsion system with integration of designed electric machine for medium altitude long endurance UAV. *Heliyon*. 11(4).
- Ge H., Zhang Q., Shen M., Qin Y., Wang L. & Yuan C. (2025). Enhancing yield prediction in maize breeding using UAV-derived RGB imagery: a novel classification-integrated regression approach. *Frontiers in Plant Science*. 16: 1511871.
- Guebsi R., Mami S. & Chokmani K. (2024). Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*. 8(11): 686.
- Huang J., Wang H., Dai Q. & Han D. (2014). Analysis of NDVI data for crop identification and yield estimation. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*. 7: 4374-4384.
- Hashim H.A., Eltoukhy A.E. & Odry A. (2023). Observer-based controller for VTOL-UAVs tracking using direct vision-aided inertial navigation measurements. *ISA transactions*. 137: 133-143.
- Kodors S., Zarembo, I., Lâcis, G., Litavniece, L., Apeinâns, I., Sondors, M., & Pacejs, A. (2024). Autonomous Yield Estimation System for Small Commercial Orchards Using UAV and AI. *Drones*. 8(12): 734.
- Kovanič E., Topitzer B., Peřovský P., Blišťan P., Gergeřová M.B. & Blišťanová M. (2023). Review of photogrammetric and lidar applications of UAV. *Applied Sciences*. 13(11): 6732.
- Kumar P., Pal K. & Govil M.C. (2025). Comprehensive review of path planning techniques for unmanned aerial vehicles (uavs). *ACM Computing Surveys*. 58(3): 1-44.
- Lambertini A., Mandanici E., Tini M.A. & Vittuari L. (2022). Technical challenges for multi-temporal and multi-sensor image processing surveyed by UAV for mapping and monitoring in precision agriculture. *Remote Sensing*. 14(20): 4954.
- Li M., Shamshiri R.R., Schirrmann M., Weltzien C., Shafian S. & Laursen M.S. (2022). UAV oblique imagery with an adaptive micro-terrain model for estimation of leaf area index and height of maize canopy from 3D point clouds. *Remote Sensing*. 14(3): 585.
- Li X., Gao H., Zhang M., Zhang S., Gao Z., Liu J., ... & Sun L. (2021). Prediction of forest fire spread rate using UAV images and an LSTM model considering the interaction between fire and wind. *Remote Sensing*. 13(21): 4325.
- Maimaitijiang M., Sagan V., Sidike P., Daloye A.M., Erkbol H. & Fritschi F.B. (2020). Crop Monitoring Using Satellite/UAV Data Fusion and Machine Learning. *Remote Sens*. 12: 1357.
- Morisse M., Wells D.M., Millet E.J., Lillemo M., Fahrner S., Cellini F., Lootens P., Muller O., Herrera J.M. & Bentley, A.R. (2022). A European perspective on opportunities and demands for field-based crop phenotyping. *Field Crop Res*. 276: 108371.
- Messaoudi K., Oubbati O.S., Rachedi A., Lakas A., Bendouma T. & Chaib N. (2023). A survey of UAV-based data collection: Challenges, solutions and future perspectives. *Journal of network and computer applications*. 216: 103670.

- Nakano S., Fujii N., Koyama R. & Uno Y. (2025). Prediction of Lettuce Harvest Date and Evaluation of Data for Yield Estimation Using Artificial Intelligence Analysis of Aerial Drone Images. *The Horticulture Journal*. 94(4): 472-482 .
- Nazarov D., Nazarov A. & Kulikova E. (2023). Drones in agriculture: Analysis of different countries. *BIO Web of Conferences*. 67: 02029
- Njane S. N., Tsuda S., van Marrewijk B.M., Polder G., Katayama K. & Tsuji, H. (2023). Effect of varying UAV height on the precise estimation of potato crop growth. *Frontiers in Plant Science*. 14: 1233349.
- Norasma C.Y.N., Sari M.A., Fadzilah M.A., Ismail M.R., Omar, M.H., Zulkarami B. & Tarmidi Z. (2018). Rice crop monitoring using multirotor UAV and RGB digital camera at early stage of growth. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* . IOP Publishing. 169(1): 012095.
- Omia E., Bae H., Park E., Kim M.S., Baek I., Kabenge I. & Cho B.K. (2023). Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*. 15(2): 354.
- Pan Z.F., An L & Wen C.Y (2019). Recent advances in fuel cells-based propulsion systems for unmanned aerial vehicles. *Applied Energy*:. pp. 473-485
- Pinton D., Canestrelli A., Wilkinson B., Ifju P. & Ortega A. (2021). Estimating ground elevation and vegetation characteristics in coastal salt marshes using UAV-based LiDAR and digital aerial photogrammetry. *Remote Sensing*. 13(22): 4506.
- Phùng Trường Chinh, Chu Đức Hà & Phạm Minh Triên (2024). Tổng quan về ứng dụng của thiết bị bay không người lái trong canh tác trên đồng ruộng. *Tạp chí khoa học và công nghệ lâm nghiệp*. 13(2): 112-122.
- Puppala H., Peddinti P.R.T., Tamvada J.P., Ahuja J., Kim B. (2023). Barriers to the adoption of new technologies in rural areas: The case of unmanned aerial vehicles for precision agriculture in India. *Technol. Soc*. 74 : 102335.
- Qiu Z., Ma F., Li Z., Xu X., Ge H. & Du C. (2021). Estimation of nitrogen nutrition index in rice from UAV RGB images coupled with machine learning algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 189: 106421.
- Sarron J., Malézieux É., Sané C.A.B. & Faye É. (2018). Mango yield mapping at the orchard scale based on tree structure and land cover assessed by UAV. *Remote Sensing*. 10(12): 1900.
- Severtson D., Callow N., Flower K., Neuhaus A., Olejnik M. & Nansen C. (2016). Unmanned aerial vehicle canopy reflectance data detects potassium deficiency and green peach aphid susceptibility in canola. *Precision Agriculture*. 17: 659-677.
- Sishodia R.P., Ray R.L. & Singh S.K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sens*. 12: 3136.
- Sitharthan R., Rajesh M.G., Vimal S., Kumar E.S., Yuvaraj S., Kumar A., Raglend I.J. & Vengatesan K. (2023). A novel autonomous irrigation system for smart agriculture using AI and 6G enabled IoT network. *Microprocessors and Microsystems*. 101: 104900.
- Shadrin D., Menshchikov A., Somov A., Bornemann G., Hauslage J. & Fedorov M.V. (2020). Enabling Precision Agriculture Through Embedded Sensing with Artificial Intelligence. *IEEE Trans. Instrum. Meas*. 69: 4103-4113.
- Shahi T.B., Xu C.-Y., Neupane A.S. & Guo W. (2022). Machine learning methods for precision agriculture with UAV imagery: A review. *Electronic Research Archive*. 30: 4277-4317.
- Sharma V., Honkavaara E., Hayden M. & Kant S. (2024). UAV remote sensing phenotyping of a wheat collection for response to water stress and yield prediction using machine learning. *Plant Stress*. 12: 100464.
- Souvanhnakhoomman S. (2021). Review on Application of Drone in Spraying Pesticides and Fertilizers. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. 10: 94-98.
- Spoorthi S., Shadaksharappa B., Suraj S., Manasa V.K. (2017). Freyr drone: Pesticide/fertilizers spraying drone - An agricultural approach. In: *IEEE 2nd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT)*: pp. 252-255.
- Sreenatha A., Nagaraja K.S., Anil Kumar S., Manjunatha Reddy T.B., Mushrif S.K., Gangadhar Narabenchu K.H. & Dhananjaya P. (2025). Applications of unmanned aerial vehicles (UAVS) in agriculture: A review. *International Journal of Research in Agronomy*. 8(9): 292-298
- Tahir M.N., Lan Y., Zhang Y., Wenjiang H., Wang Y. & Naqvi S.M.Z.A. (2023). Application of unmanned aerial vehicles in precision agriculture. In *Precision agriculture*. Academic Press. pp. 55-70.
- Toromade A.S., Soyombo D.A., Kupa E. & Ijomah T.I. (2024). Reviewing the impact of climate change on global food security: Challenges and solutions. *International journal of applied research in social sciences*. 6(7): 1403-1416.

- Tsouros D.C., Bibi S. & Sarigiannidis P.G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*. 10(11): 349.
- Van Goor P., Hamel T. & Mahony R. (2025). Synchronous observer design for Inertial Navigation Systems with almost-global convergence. *Automatica*. 177: 112328.
- Võ Quốc Tuấn, Nguyễn Tấn Lợi, Quãng Thị Dal, Trương Chí Quang & Phạm Quốc Việt (2021). Ứng dụng công nghệ UAV (drones) theo dõi và hỗ trợ cảnh báo sớm dịch hại vùng canh tác lúa tỉnh Sóc Trăng. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*. 57(2): 28-38.
- Zarco-Tejada P., Berni J., Suarez L., Sepulcre-Canto G., Morales F. & Miller J. (2009). Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*. 113: 1262-1275.
- Zeng T., Wang Y., Yang Y., Liang Q., Fang J., Li Y., Zhang H., Fu W., Wang J. & Zhang X. (2024). Early detection of rubber tree powdery mildew using UAV-based hyperspectral imagery and deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*. 220: 108909.
- Zhang B., Song Z., Zhao F. & Liu C. (2022). Overview of propulsion systems for unmanned aerial vehicles. *Energies*. 15(2): 455.
- Zhang Z. & Zhu L. (2023). A review on unmanned aerial vehicle remote sensing: Platforms, sensors, data processing methods, and applications. *Drones*. 7(6): 398.
- Zhu W., Eyshi Rezaei E., Nour H., Sun Z., Li J., Yu D. & Siebert S. (2022). UAV-based indicators of crop growth are robust for distinct water and nutrient management but vary between crop development phases. *Field Crops Research*. 284: 108582.