

Impactul tehnologiilor “smart agriculture” asupra eficienței economice

The impact of “smart agriculture” technologies on economic efficiency

Matei-Ioan Banu¹, Marian-Alexandru Paica²

¹ Faculty of Agrifood and Environmental Economics, Bucharest University of Economic Studies, Bucharest, Romania; banumatei22@stud.ase.ro

² Faculty of Agrifood and Environmental Economics, Bucharest University of Economic Studies, Bucharest, Romania; paicamarian22@stud.ase.ro

Rezumat: Lucrarea analizează impactul integrării tehnologiilor inteligente asupra eficienței economice și sustenabilității agriculturii moderne, având ca obiectiv evaluarea performanței sistemelor IoT și a algoritmilor de învățare automată în optimizarea resurselor. Studiul se bazează pe o analiză atentă a literaturii de specialitate și pe compararea celor mai recente cercetări experimentale din domeniul agriculturii de precizie. Datele provin din experimente desfășurate în sere și exploatații agricole reale, unde parametri precum umiditatea solului, temperatura, umiditatea aerului și intensitatea luminii au fost colectați prin senzori digitali conectați prin rețele LoRa și WiFi. Prelucrarea datelor s-a realizat prin modele de tip XGBoost și Model Predictive Control, iar performanța a fost evaluată prin indicatori statistici precum coeficientul de determinare R^2 și eroarea medie pătratică RMSE. Rezultatele indică reduceri ale consumului de apă cu până la 20–30% față de metodele tradiționale de irigare, scăderea costurilor energetice în sere prin automatizare orientată pe consum și o rată de fiabilitate a transmisiilor de 99,98% într-un studiu de caz realizat pe o podgorie de 1,3 hectare din Spania. Analiza comparativă arată că implementarea unui nod de monitorizare bazat pe ESP32 are un cost de aproximativ 300 EUR, semnificativ mai redus decât soluțiile comerciale de 1500–2500 EUR, ceea ce permite recuperarea investiției în mai puțin de două sezoane agricole. Studiul evidențiază că integrarea senzorilor, comunicațiilor wireless și inteligenței artificiale transformă managementul agricol într-un proces bazat pe date, cu efect direct asupra reducerii risipei, stabilizării producției și creșterii rentabilității exploatațiilor.

Cuvinte cheie: agricultură de precizie; inteligență artificială; control predictiv al irigației; eficiență energetică; aplicații mobile agricole.

Abstract: The paper examines the impact of integrating smart technologies on the economic efficiency and sustainability of modern agriculture. It aims to evaluate the performance of IoT systems and machine learning algorithms in optimizing resource use. The study relies on a thorough review of the scientific literature and a comparison of recent experimental research in precision agriculture.

The data come from experiments carried out in greenhouses and real agricultural farms, where parameters such as soil moisture, temperature, air humidity, and light intensity were collected using digital sensors connected through LoRa and WiFi networks. Data processing was performed using XGBoost and Model Predictive Control models, and performance was assessed through statistical indicators such as the coefficient of determination R^2 and the root mean square error RMSE.

The results show water consumption reductions of up to 20 to 30 percent compared to traditional irrigation methods, lower energy costs in greenhouses through consumption oriented automation, and a transmission reliability rate of 99.98 percent in a case study conducted on a 1.3 hectare vineyard in

Spain. The comparative analysis indicates that implementing a monitoring node based on ESP32 costs around 300 EUR, significantly less than commercial solutions priced between 1500 and 2500 EUR, which allows the investment to be recovered in less than two agricultural seasons.

The study shows that integrating sensors, wireless communications, and artificial intelligence turns farm management into a data driven process, with a direct impact on reducing waste, stabilizing production, and increasing farm profitability.

Keywords: precision agriculture; artificial intelligence; predictive irrigation control; energy efficiency; agricultural mobile applications.

Clasificare JEL: Q16; C55; O33

Clasificare REL: 15D; 18D; 10B

Introducere

Lucrarea urmărește evoluția integrării tehnologiilor de tip “smart agriculture” la nivelul exploatațiilor agricole, punând accent pe eficiența economică și optimizarea resurselor. Pentru a realiza studiul, am structurat lucrarea în trei etape principale: analiza teoretică a literaturii de specialitate, metodologia de cercetare bazată pe extragerea datelor tehnice din experimente recente și, în final, analiza indicatorilor de performanță asociați sistemelor IoT și prototipurilor agricole.

În contextul dinamic al provocărilor climatice actuale, agricultura convențională devine nesustenabilă ecologic și economic din cauza risipei de resurse și a productivității inconstante (Tornese et al., 2024). Studiul de față își propune să investigheze relațiile dintre implementarea senzorilor și rentabilitatea investiției. Prin integrarea unor tehnologii precum Internet of Things (IoT), fermierii reușesc să urmărească în timp real parametri critici ai culturilor (Kalaivani et al., 2025; Comegna et al., 2025). Datele ajung imediat în platforme de analiză, optimizând irigațiile și reducând vizibil consumul de apă (Dafonte et al., 2024; Comegna et al., 2025). De asemenea, inteligența artificială sprijină diagnosticarea timpurie a bolilor și rafinează procesele de producție (Chorney et al., 2025; Guragain et al., 2026).

Rezultatele cercetării au aplicații utile, mai ales în contextul în care soluțiile inteligente își fac loc tot mai des și în fermele mici sau mijlocii, contrazicând mitul conform căruia acestea sunt destinate exclusiv fermelor mari (Dafonte et al., 2024; Kalaivani et al., 2025).

1. Revizuirea literaturii de specialitate și fundamente teoretice

Agricultura de precizie reprezintă un sector înalt tehnologizat, unde deciziile bazate pe date reprezintă principalul factor în optimizarea consumului. Trecerea la un management digitalizat optimizează direct consumul de apă și energie, sporind eficiența economică a fermei (Ghiat et al., 2025). Acest concept de *smart agriculture* integrează sisteme digitale, astfel încât controlul în timp real să reducă drastic timpul de reacție al fermierului la schimbările de mediu (Zeping et al., 2026).

Analiza literaturii evidențiază o tranziție clară către utilizarea platformelor cu consum redus de energie. Tehnologiile wireless, precum protocolul ZigBee, permit conectarea mai multor noduri, sistemele funcționând optim până la distanțe de aproximativ 150 m în condiții *line-of-*

sight (Zeping et al., 2026). În același timp, algoritmi de învățare automată preiau volume masive de date pentru predicție. De exemplu, algoritmul XGBoost estimează pierderea de apă prin frunze cu o precizie remarcabilă, reducând masiv incertitudinea în irigații (Ghiat et al., 2025). Modelele de IA sunt esențiale și în protecția fitosanitară, diagnosticând afecțiuni (ex. ciupercile *Pleurotus*) cu o acuratețe uriașă (Guragain et al., 2026). Aceste sisteme, luate în ansamblu, salvează efectiv producția și permit intervenții rapide, fundamentate exclusiv pe date (Ghiat et al., 2025; Guragain et al., 2026; Zeping et al., 2026).

2. Metodologia de cercetare și analiza indicatorilor de performanță

Cercetarea are drept scop analiza eficienței economice a tehnologiilor inteligente în agricultură. Pentru acest lucru, am extras date și indicatori din experimente recente publicate în baza de date ScienceDirect. Am folosit următorii indicatori principali pentru analiza comparativă: volumul consumului de apă, costurile hardware de implementare și rata de succes a transmisiei datelor. După prelucrarea datelor din studiile de caz selectate, analiza a fost posibilă prin evaluarea comparativă a performanțelor unui sistem de irigare bazat pe algoritmul XGBoost (care reduce consumul de apă cu peste 40% față de metodele tradiționale) (Ghiat et al., 2025) și a platformelor de analiză ce taie drastic risipa (Zeping et al., 2026). Pentru a cuantifica impactul tehnologiei cu exactitate, am analizat datele unui studiu de caz derulat pe o podgorie comercială de 1,3 hectare din regiunea Quiroga (Lugo, Spania) (Dafonte et al., 2024). Datele privind configurația experimentală și eficiența economică sunt structurate în Tabelul 1.

Tabelul 1. Analiza indicatorilor tehnico-economici pentru nodurile de monitorizare (Cazul Quiroga, Spania)

Indicator analizat	Varianta convențională / Comercială	Varianta IoT (ESP32 + LoRa)
Banda de frecvență	Standard WiFi (2.4 GHz)	433 MHz (penetrare superioară)
Rata de pierdere a datelor	Variabilă	0,02% (fiabilitate excepțională)
Cost de implementare / nod	1500 EUR – 2500 EUR	~300 EUR
Recuperarea investiției (ROI)	Peste 5 ani	Sub 2 sezoane agricole

Sursa: Prelucrare proprie pe baza datelor din Dafonte et al. (2024)

Conform datelor din Tabelul 1, se poate observa că implementarea unor noduri de monitorizare personalizate generează o reducere masivă a costurilor inițiale de la o medie de 2000 EUR la aproximativ 300 EUR. Rata de pierdere a mesajelor este aproape inexistentă (0,02%), ceea ce asigură o fiabilitate ridicată a transmisiei. Această reducere drastică a costurilor oferă fermierilor o alternativă perfect accesibilă pentru a face tranziția reală către „Agricultura 4.0” (Dafonte et al., 2024).

3. Studiu de caz: Monitorizarea unui sit viticol în Spania

Pentru a ilustra aplicabilitatea practică a acestor tehnologii, am analizat un studiu de caz extrem de relevant din literatura recentă: implementarea unui sistem digital de monitorizare într-o podgorie comercială de 1,3 hectare din regiunea Quiroga (Lugo, Spania). Aici, exploatarea este dedicată cultivării soiului de viță-de-vie Mencía (Dafonte et al., 2024).

În ceea ce privește configurația experimentală, echipa de cercetare a instalat o rețea de noduri de monitorizare, construite pe baza microcontrolerului ESP32 și a tehnologiei de comunicare LoRa. Acestea măsoară cu o precizie ridicată temperatura și umiditatea aerului la două niveluri complet distincte: sub și deasupra coronamentului viței-de-vie. Simultan, senzorii au înregistrat constant temperatura solului, potențialul matricial și conținutul volumetric de apă. Din punct de vedere tehnic, implementarea a fost gândită strategic. Sistemul a operat pe banda de frecvență de 433 MHz. Motivul principal pentru această alegere a fost asigurarea unei penetrări superioare a semnalului în zonele dense, cu multă vegetație. Datele colectate de nodurile din teren au fost preluate de un gateway prin protocolul LoRa. Ulterior, acest echipament le-a încărcat pe un server FTP, folosindu-se de o conexiune Wi-Fi generată de un router 4G. Un flux de date neîntrerupt, stabil și eficient (Dafonte et al., 2024).

Rezultatele obținute confirmă pe deplin viabilitatea modelului. Cercetarea a demonstrat o fiabilitate excepțională a transmisiei, înregistrându-se o rată a mesajelor pierdute de doar 0,02%. Însă, dincolo de performanța tehnică, impactul economic este cel care face diferența majoră. Costul de producție și implementare pentru un astfel de nod inteligent s-a situat în jurul sumei de 300 EUR. Prin comparație, soluțiile comerciale similare disponibile deja pe piață pot ajunge ușor la 1500–2500 EUR. Această reducere drastică a costurilor oferă fermierilor o alternativă perfect accesibilă pentru a face, în sfârșit, tranziția reală către „Agricultura 4.0” (Dafonte et al., 2024).

4. Proiectul Prototip Zapp.FarmGO: simbioza dintre tehnologie și botanică

În cadrul acestei etape a lucrării, analizăm proiectul prototip Zapp.FarmGO. Construit pe baza platformei hardware LilyGO T-Grow, sistemul reprezintă un pas concret și accesibil în digitalizarea agriculturii de precizie. Ne place să privim acest prototip ca pe un veritabil „sistem nervos artificial” al plantelor. Practic, el preia nevoile biologice tăcute ale culturii și le traduce într-un set de date digitale clare, ușor de interpretat de către utilizatorul final.

4.1. Arhitectura Hardware: senzorul inteligent

Pentru nucleul sistemului am ales microcontrolerul ESP32. Vorbim despre o unitate de procesare recunoscută pe scară largă pentru eficiența sa energetică, dar mai ales pentru capacitățile native de comunicare wireless (Wi-Fi și Bluetooth). În teren, dispozitivul acționează ca o stație de achiziție de date, monitorizând simultan patru vectori critici.

În primul rând, urmărim umiditatea solului, unde am optat pentru tehnologia capacitivă. Spre deosebire de senzorii rezistivi clasici, aceștia nu oxidează. Oferă o durată de viață mult mai mare și asigură măsurători precise chiar și atunci când în sol sunt prezenți fertilizatori sau diverse amendamente chimice. În al doilea rând, monitorizăm lumina ambientală. Măsurăm

intensitatea fluxului luminos pentru a ne asigura că planta atinge permanent pragul necesar procesului de fotosinteză. Nu în ultimul rând, evaluăm microclimatul (temperatura și umiditatea aerului). Prin integrarea unor senzori de înaltă precizie, precum modulul BME280, dispozitivul citește condițiile atmosferice care dictează direct ritmul de transpirație și starea de sănătate a plantei.

4.2. Fluxul de date: de la sol la cloud

Pentru ca sistemul să aibă valoare practică, transferul informației trebuie să fie impecabil. Aceasta este puntea de legătură între mediul fizic și cel digital, un proces pe care l-am guvernat după două principii fundamentale.

Primul este protocolul de transmisie. Datele colectate sunt „împachetate” și trimise rapid către serverul zapptelecom.ro prin intermediul unor cereri de tip HTTP POST. Acesta este un standard de comunicare web extrem de robust. Asigură transferul rapid și păstrează integritatea fiecărui pachet de date. Cel de-al doilea principiu vizează identitatea și securitatea rețelei. Fiecare senzor din teren posedă un ID unic. Această „amprentă digitală” garantează că datele extrase dintr-un anumit ghiveci sau dintr-o parcelă specifică ajung exclusiv în contul utilizatorului corect. Astfel, eliminăm complet riscul de interferență între diferitele dispozitive conectate la platformă.

4.3. Backend-ul și aplicația mobilă: „creierul” și interfața sistemului

Ultima etapă a acestui lanț tehnologic are loc dincolo de senzorii fizici. Odată ajunse pe server, datele brute trec printr-un amplu proces de rafinare. Ulterior, ele sunt livrate utilizatorului direct prin Aplicația Mobilă Zapp.FarmGO. Aici are loc adevărata transformare. Aplicația preia indicii tehnici rigizi și îi convertește într-o experiență vizuală extrem de intuitivă, oferind fermierului o interfață clară prin care poate „dialoga” în timp real cu propriile culturi.

Tabelul 2. Fluxul de procesare a datelor și interacțiunea utilizatorului în sistemul Zapp.FarmGO

Etapă	Acțiune în Backend	Experiența în Aplicația Mobilă
Stocare	Datele sunt salvate cronologic în baze de date securizate.	Grafice Intuitive: Utilizatorul observă evoluția plantei pe zile sau săptămâni.
Procesare	Algoritmii compară valorile primite cu pragurile biologice optime.	Alerte Push: Notificări instantanee pe telefon când solul este prea uscat sau lumina insuficientă.
Sincronizare	Interfața API livrează datele prelucrate către dispozitivul mobil.	Vizualizare Real-Time: Starea actuală a plantei este disponibilă oriunde, prin conexiunea la internet.

Sursa: Schița tehnică a aplicației Zapp.FarmGO

5. Rezultate și discuții

Integrarea soluțiilor digitale în agricultură a depășit de mult stadiul de simplă inovație tehnologică. Astăzi, o privim ca pe o necesitate economică absolută. Această schimbare de paradigmă ne este impusă direct de instabilitatea climatică și de explozia costurilor pentru resursele de bază.

5.1. Reducerea costurilor operaționale prin optimizarea resurselor

Din analiza noastră, cel mai pronunțat beneficiu economic reiese din utilizarea sistemelor de Control Predictiv al Modelului (MPC). Acestea reușesc să taie drastic risipa de apă și nutrienți (Ghiat et al., 2025). Când vine vorba de gestionarea apei în regiunile aride, algoritmi de estimare a transpirației ne permit să aplicăm irigația cu o precizie milimetrică. Observăm din rezultatele recente că un sistem automatizat reduce consumul de apă cu procente semnificative (între 20% și 30%) comparativ cu vechile irigații bazate pe programe fixe. Această economie se reflectă instantaneu în factura de energie pentru pompare.

Trecând la eficientizarea energetică, un studiu axat pe serele inteligente (Zeping & Abdullah, 2026) ne atrage atenția asupra conceptului de automatizare „energy-aware”. Dacă integrăm platforme low-code (cum ar fi ESPHome) cu senzori ZigBee, putem regla climatul interior extrem de fin. Sistemele de încălzire sau ventilație pornesc strict atunci când este necesar, un detaliu tehnic care scade masiv costurile lunare cu utilitățile.

5.2. Creșterea productivității prin monitorizare în timp real

Un alt aspect fundamental pe care l-am evaluat este modul în care monitorizarea constantă elimină perioadele de „stres invizibil” al plantelor. Acel stres tăcut care erodează treptat randamentul culturilor. În acest sens, tehnologiile bazate pe senzori de proximitate (precum tehnologia SHYPROM) și comunicațiile de joasă frecvență (LoRa) ne permit să detectăm deficitul de apă chiar de la primele semne la nivelul rădăcinilor. Dacă ne uităm la culturile de viță-de-vie (Dafonte et al., 2024), observăm că această acuratețe salvează cantitatea recoltei, dar mai ales calitatea ei. Acumularea optimă de zaharuri crește direct valoarea de piață a produsului final.

În completare, aplicațiile de inteligență artificială intervin crucial în prevenirea pierderilor. Modelele de Deep Learning pentru detectarea bolilor orezului sau aplicații mobile precum OysterMushNet (pentru ciuperci) funcționează ca veritabile alarme timpurii. Ele detectează infecțiile într-un stadiu incipient. Astfel, intervenim rapid, salvăm întreaga recoltă și transformăm o pierdere potențială într-un profit realizat.

5.3. Analiza rentabilității (ROI - Return on Investment)

Istoric vorbind, costul prohibitiv a reprezentat principala barieră în adoptarea acestor tehnologii. Totuși, cercetările noastre aduc dovezi clare privind democratizarea instrumentelor digitale. Analiza comparativă a pieței (conform studiului din Sensors, 2024) ne arată o discrepanță uriașă. Un nod de monitorizare personalizat, construit în jurul unui

ESP32 și al senzorilor capacitivi, presupune un cost de aproximativ 300 EUR. În contrast puternic, soluțiile comerciale similare sar frecvent de pragul de 1500–2500 EUR.

Datorită acestui cost redus de implementare și a economiilor lunare realizate la apă și îngrășămintă, rata de recuperare a investiției (ROI) pentru sistemele DIY/open-source este estimată la mai puțin de două sezoane agricole. Pentru o fermă mică sau medie, acest calcul matematic reprezintă factorul decisiv. Tehnologia devine viabilă din punct de vedere economic.

5.4. Bariere și provocări în adoptare

În ciuda tuturor acestor beneficii evidente, dincolo de optimismul tehnologic, nu putem ignora obstacolele critice raportate în teren. Prima mare problemă rămâne infrastructura digitală. În foarte multe zone rurale izolate, lipsa acoperirii 4G sau 5G paralizează pur și simplu fluxul de date. Desigur, tehnologia LoRa (*Long Range*) ne oferă o porțiță de scăpare excelentă pentru transmisii pe distanțe lungi cu energie minimă. Cu toate acestea, implementarea ei necesită o configurație tehnică inițială pe care nu toți fermierii o pot gestiona independent.

Aici ne lovim de a doua barieră: lacunele în competențele digitale. Există un decalaj uriaș între complexitatea algoritmilor (cum ar fi XGBoost sau *Federated Learning*) și abilitățile tehnice de zi cu zi ale operatorilor agricoli. Succesul pe termen lung depinde de capacitatea noastră de a crea interfețe simplificate. Fermierul are nevoie de o aplicație mobilă intuitivă, care să îi traducă datele complexe în acțiuni clare de tipul: „Irigă acum cu 5 litri/mp”.

În final, trebuie să recunoaștem diferențele structurale dintre exploatații. Fermele mari au puterea financiară de a absorbi costurile de infrastructură și de a angaja specialiști. În schimb, pentru fermele mici, singura cale sustenabilă pe care o vedem este adoptarea tehnologiilor *open-source*. Soluția optimă constă în colaborarea prin învățare federată (*Federated Learning*), un proces care permite partajarea modelelor de inteligență artificială, menținând însă datele private ale fiecărei ferme în deplină siguranță.

Concluzii

Pe baza analizei efectuate în cadrul acestei lucrări, concluzia centrală este evidentă: agricultura de precizie nu mai reprezintă doar un lux tehnologic. Aceasta a devenit o realitate accesibilă, inclusiv pentru exploatațiile de mici dimensiuni. Soluțiile cu costuri reduse, dezvoltate în jurul unor microcontrolere precum ESP32 și bazate pe senzori calibrați intern, schimbă fundamental regulile jocului.

Am observat cum implementarea unor astfel de sisteme reduce drastic cheltuielile, coborând bariera financiară de la aproximativ 2500 EUR la doar 300 EUR pentru un singur nod de monitorizare. Rezultatul direct al acestei optimizări? Fermierii reușesc să își amortizeze investiția în cel mult două sezoane agricole. În plus, integrarea arhitecturilor IoT alături de sistemele de control predictiv optimizează vizibil consumul de apă și energie. Având în vedere economiile raportate – de 20–30% în procesele de irigare – considerăm pe deplin justificată trecerea de la vechile decizii empirice la un management agricol fundamentat pe date reale.

Dincolo de componenta hardware, inovațiile software au un rol vital în modernizarea fermelor. Algoritmi de învățare automată precum XGBoost, alături de modelele de Deep Learning, transformă radical procesul decizional. Astfel, putem anticipa bolile și putem estima transpirația plantelor cu o precizie remarcabilă. Practic, identificarea timpurie a problemelor fitosanitare previne pagubele majore, limitând masiv pierderile de producție. Simultan, tehnologia LoRa s-a impus drept o soluție perfectă pentru asigurarea comunicării în zonele rurale unde infrastructura celulară clasică lipsește. Rata de succes a transmisiilor de date depășește 99%, chiar și atunci când semnalul trebuie să străpungă un strat dens de vegetație. Ca în orice demers științific riguros, cercetarea noastră prezintă anumite limitări inerente. Este important de menționat că o mare parte dintre studiile evaluate au fost derulate la scară experimentală sau în medii cu parametri strict controlați. Din acest motiv, generalizarea acestor rezultate pe suprafețe extinse sau în condiții pedoclimatice diferite necesită o doză de prudență. De asemenea, eficiența întregului ecosistem digital este strâns legată de o calibrare impecabilă și de mentenanța constantă a senzorilor. O eroare banală de măsurare poate declanșa rapid o decizie automată incorectă privind irigarea. Nu putem ignora nici importanța factorului uman. Implementarea și utilizarea acestor inovații impun competențe tehnice specifice, abilități pe care, din păcate, mulți operatori agricoli încă nu le-au dobândit. Privind spre viitor, direcțiile de cercetare se conturează cu claritate. Următorul pas esențial îl reprezintă testarea acestor sisteme la scară largă. Evaluarea lor în condiții agricole reale și imprevizibile este necesară pentru a le valida reziliența economică pe termen lung. Totodată, piața are o nevoie acută de platforme integrate. Agricultorii necesită soluții unificate care să ofere funcții de monitorizare, analiză și suport decizional, toate reunite într-o interfață prietenoasă. În cele din urmă, viitorul managementului resurselor aparține inteligenței artificiale distribuite. Abordările inovatoare, cum ar fi Federated Learning, ne vor permite să analizăm date provenite de la mii de ferme fără a expune vreodată secretele comerciale ale acestora. Prin construirea unor astfel de rețele colaborative, vom antrena modele predictive cu adevărat robuste, capabile să accelereze definitiv digitalizarea agriculturii la nivel global.

Referințe bibliografice

References

1. Chorney, W., Rahman, A., Wang, Y., Wang, H., & Peng, Z. (2025). Federated Learning for Heterogeneous Multi-Site Crop Disease Diagnosis. *Mathematics*,
2. Comegna, A., Hassan, S. B. M., & Coppola, A. (2025). Recent Technological Upgrades to the SHYPRON IoT-Based System for Monitoring Soil Water Status. *Sensors*,
3. Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, J. J. (2024). Soil Water Status Monitoring System with Proximal Low-Cost Sensors and LoRa Technology for Smart Water Irrigation in Woody Crops. *Sensors*,
4. Ghiat, I., Govindan, R., & Al-Ansari, T. (2025). Data-driven model predictive control for irrigation management in agricultural greenhouses under CO2 enrichment. *Smart Agricultural Technology*,

5. Guragain, D. P., Shrestha, B., Bajracharya, I., Sharma, N., Ghimire, D., & Bhat, S. A. (2026). Oyster MushNet: A deep learning-based mobile application for real-time mushroom disease detection and agronomist support. *Smart Agricultural Technology*,
6. Kalaivani, T. S., Kamireddy, T., & Govindakumar, S. (2025). IoT-Enabled Soil and Crop Monitoring System Using Low-Cost Smart Sensors for Precision Agriculture. *Engineering Proceedings*,
7. Tornese, I., Matera, A., Rashvand, M., & Genovese, F. (2024). Use of Probes and Sensors in Agriculture—Current Trends and Future Prospects on Intelligent Monitoring of Soil Moisture and Nutrients. *AgriEngineering*,
8. Zeping, L., Abdullah, N., & Ishak, M. K. (2026). Smart greenhouse climate control with real-time fault detection and energy-aware automation. *Smart Agricultural Technology*,