

Tecnologie smart per un'agricoltura sostenibile

Soluzioni tecnologiche innovative consentono di raccogliere dati da sensori e utilizzarli per la miglior gestione aziendale finalizzata anche al risparmio di energia, in particolare nell'indoor farming. Le tecnologie smart nell'agricoltura non rappresentano semplicemente un'innovazione tecnica ma un cambiamento paradigmatico nel modo di concepire la produzione agricola. La possibilità di monitorare in tempo reale le condizioni delle colture, di automatizzare la gestione delle risorse e di prevenire potenziali problematiche attraverso l'analisi predittiva pone le basi per un'agricoltura più resiliente e sostenibile. In questo contesto, l'ottimizzazione energetica e l'uso efficiente delle risorse non sono solo obiettivi desiderabili ma necessità imprescindibili per garantire la sostenibilità a lungo termine del settore agricolo.

DOI 10.12910/EAI2025-039

di Luca Nardi, Silvia Massa ed Angiola Desiderio, Dipartimento Sostenibilità, Circolarità e Adattamento al Cambiamento Climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali, Divisione Sistemi Agroalimentari Sostenibili - Laboratorio Agricoltura 4.0, Raniero Trinchieri, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili Divisione Tecnologie e Vettori per la Decarbonizzazione: accumuli, idrogeno, mobilità, CCUS e usi finali, Giampaolo Caputo, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili, Divisione Smart Sector Integration e generazione distribuita da FER Laboratorio Energia e Data Science - ENEA

Agricoltura 4.0 e gestione intelligente delle risorse

Nel panorama dell'agricoltura contemporanea la digitalizzazione rappresenta una rivoluzione che sta trasformando radicalmente il settore primario. L'agricoltura 4.0, caratterizzata dall'implementazione di sistemi Internet of Things (IoT), sensori avanzati e analisi dei dati, ha registrato una crescita significativa con un incremento del 19% nel mercato italiano tra il 2022 e il 2023, raggiungendo per la prima volta il valore di 2,3 miliardi di euro.

Questa trasformazione consente alle aziende agricole di tutte le dimensioni di ottimizzare i processi produttivi, migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse (acqua, fertilizzanti, energia luce etc) e promuovere pratiche sostenibili riducendo, al contempo, l'utilizzo degli agrofarmaci e migliorando

la qualità delle produzioni. Particolarmente rilevante è l'applicazione di queste tecnologie nell'indoor farming, dove l'integrazione di impianti di illuminazione LED, sensori e data analytics permettono di ottenere un controllo preciso e mirato non solo delle condizioni ambientali ma anche dello sviluppo, della crescita e dello stato di salute delle piante (Fig.1; Fig. 2).

Con sistemi avanzati per la gestione energetica è possibile seguire e guidare i processi metabolici adattando i consumi alle reali necessità fisiologiche delle singole specie coltivate. Nelle coltivazioni in ambiente controllato, infatti, l'illuminazione LED, le tecniche di coltivazione idroponica e piani di fertilizzazione mirata, si adattano ai vari stadi di crescita delle piante in modo da ottenere il massimo risultato in termini di resa e qualità.

Il ruolo dei sensori nel monitoraggio e nella diagnostica

I sensori rappresentano gli elementi fondamentali che rendono possibile la digitalizzazione delle aziende agricole, fungendo da interfaccia tra il mondo fisico e quello digitale. La varietà di sensori impiegati nel settore agricolo è considerevole e ciascuno è progettato per monitorare parametri specifici. I sensori di temperatura ad infrarossi (IRT-) vengono tipicamente utilizzati per analizzare la temperatura fogliare, correlata all'attività stomatica. Integrando questi dati, con sensori di umidità, i sistemi di controllo calcolano il Deficit di Pressione di Vapore (VPD) ottimale (0.8-1.2 kPa per la fase vegetativa), regolando attivamente il processo di trattamento aria con umidificatori e ventilazione. Nelle coltivazioni che integrano impianti di illuminazione LED, questo equilibrio permette di

massimizzare l'efficienza del processo della fotosintesi, bilanciando traspirazione e assimilazione della anidride carbonica. Le tecniche ed i sensori di diagnostica non distruttiva come l'analisi di immagine nel visibile, di immagini termografiche (Fig.3), iperspettrali e fluorometriche servono invece a raccogliere in tempo reale dati sullo stato delle colture, in particolare per valutare le variazioni metaboliche nelle foglie e prevedere potenziali situazioni di stress idrico, nutrizionale (stress abiotici) o attacchi di patogeni (stress biotici).

Nell'ambito delle coltivazioni idropo- niche la suite di sensori si amplia ulteriormente con dispositivi specifici quali sensori di umidità del substrato/ suolo, sia resistivi che capacitivi, che integrati con sensori di temperatura e umidità ambientale, forniscono misurazioni accurate che vengono trasmesse in tempo reale ai sistemi di gestione e controllo. Questa infrastruttura sensoriale costituisce l'ossatura del sistema di monitoraggio continuo, permettendo di rilevare e controbilanciare in caso di necessità le variazioni anche minime nei parametri ambientali e colturali rilevati.

L'efficacia di un sistema di agricoltura intelligente dipende non solo dalla qualità dei sensori, ma anche dalla loro corretta implementazione e dalla robustezza della connettività. Le tecnologie IoT permettono di raccogliere dati da sensori distribuiti sia in campo aperto come anche all'interno di strutture come serre o stalle, trasmettendoli a piattaforme cloud per l'elaborazione e la visualizzazione. Questa architettura consente il monitoraggio remoto delle condizioni di coltivazione, offrendo agli operatori la possibilità di controllare lo stato della propria azienda od impianto in tempo reale, indipendentemente dalla loro posizione fisica.

Il valore dei dati raccolti dai sensori

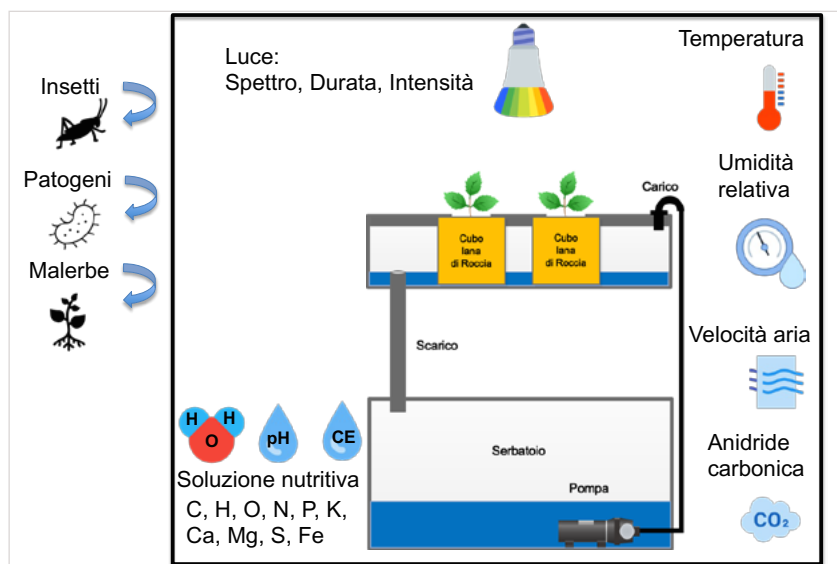


Figura 1 – Agricoltura di precisione in ambiente controllato. Sono riportati i principali parametri controllati per quanto riguarda aria, acqua, luce e soluzione nutritiva. I nemici naturali delle piante vengono eliminati grazie a tecniche di trattamento aria ed acqua.

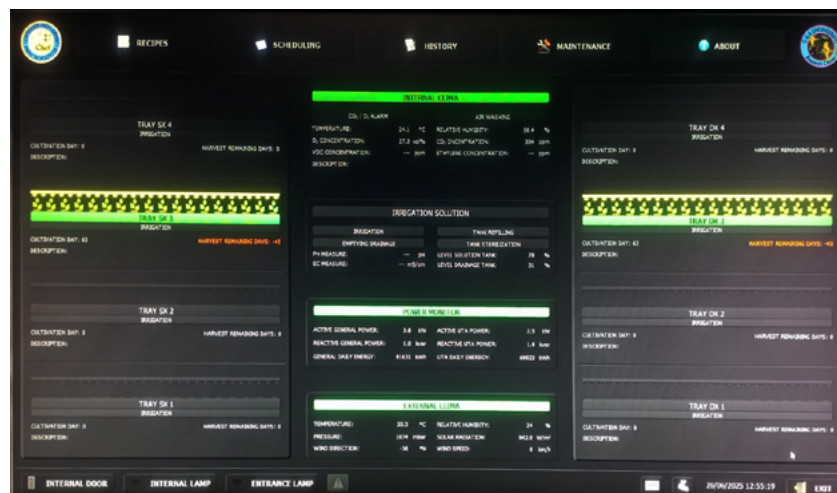


Figura 2 – Sistema di gestione e controllo container farm MICROx2

risiede nella loro trasformazione in informazioni rilevanti e coerenti che possano supportare decisioni strategiche. I software specializzati acquisiscono, controllano ed elaborano i dati grezzi, restituendo agli agricoltori dettagli utili per definire strategie d'intervento mirate. **Questo approccio scientifico e multidisciplinare consente di affrontare la produzione**

con maggiore precisione, basando le decisioni su dati certi piuttosto che su stime o tradizioni.

La potenza del data analytics nell'agricoltura si manifesta particolarmente nella capacità di previsione e prevenzione. Algoritmi avanzati, implementati attraverso linguaggi di programmazione come Python, gestiscono l'automazione dei sistemi

e generano segnali logici intelligenti che vengono trasmessi agli attuatori per l'irrigazione tempestiva e il controllo dell'illuminazione per la crescita delle piante. Questa automazione dei cicli decisionali riduce la necessità di intervento manuale e ottimizza l'allocazione delle risorse.

Il caso studio ENEA: una vertical farm sperimentale a gestione energetica avanzata

L'implementazione di tecnologie smart nell'agricoltura ha prodotto risultati tangibili come dimostrato dall'esperienza negli impianti di coltivazione idroponica realizzati in ENEA, dove l'adozione di strumenti IoT ha permesso di migliorare la crescita delle coltivazioni, risparmiare acqua e ridurre il tempo dedicato alle operazioni di monitoraggio. Questi vantaggi quantificabili testimoniano il potenziale trasformativo dell'agricoltura digitale in termini di efficienza operativa e sostenibilità ambientale.

Nel Centro di Ricerca della Casaccia è stata realizzata una vertical farm sperimentale all'interno di un container (Accordo attuativo n. 2021-2-HH.0 tra Agenzia Spaziale Italiana e Università degli Studi di Napoli Federico II, CUP F79C20000300005, in collaborazione con ENEA, Università degli Studi di

Roma 'Tor Vergata' e CNR) che rappresenta una soluzione innovativa per l'agricoltura in ambiente controllato, consentendo la coltivazione in spazi ridotti e con condizioni ottimizzate. In questo sistema, il controllo del clima viene effettuato da un gruppo frigo tradizionale ed è essenziale per garantire la crescita ottimale delle colture, ma rappresenta anche una delle principali voci di consumo energetico (Fig.4). Nell'ottica di progettare un impianto completamente ecocompatibile e per ottenere elevate efficienze termodinamiche, si è deciso di installare una macchina invertibile che, nominalmente, in raffrescamento, con aria a 35 °C e producendo acqua a 7 °C, potrebbe garantire un Coefficiente di prestazione (EER) di 4,93. Attraverso misure di portata, temperatura e assorbimento elettrico è stato possibile valutare le prestazioni termodinamiche del sistema che si prevede di migliorare adottando sistemi di accumulo termici, che possano favorire la stabilità di funzionamento con conseguente miglioramento delle prestazioni energetiche, ed integrando collettori fotovoltaici.

Le pompe di calore, se integrate con sensori di temperatura e umidità, possono operare in modo dinamico, adattando il loro funzionamento alle effettive necessità dell'ambiente di

coltivazione. I dati raccolti dai sensori vengono elaborati da algoritmi di controllo che modulano l'attività delle pompe, garantendo il mantenimento delle condizioni ideali con il minimo dispendio energetico. Questo approccio adattivo consente di risparmiare energia rispetto ai sistemi tradizionali a funzionamento costante.

L'analisi predittiva rappresenta un'evoluzione significativa nella gestione energetica dell'indoor farming. Attraverso l'elaborazione dei dati storici relativi alle condizioni ambientali e ai consumi energetici, i sistemi di controllo possono anticipare le necessità di raffrescamento o riscaldamento, attivando preventivamente gli impianti e ottimizzandone l'efficienza. Questa capacità previsionale si traduce in un ulteriore risparmio energetico e in una maggiore stabilità delle condizioni di crescita per le colture.

Mappe Daily Light Integral (DLI) per l'ottimizzazione dell'illuminazione in serra

L'integrale di luce giornaliera (DLI) rappresenta la quantità totale di luce fotosinteticamente attiva (PAR -Photosynthetically Active Radiation) che una pianta riceve nell'arco di una giornata espresso come moli di luce per metro quadro al giorno. Il DLI è

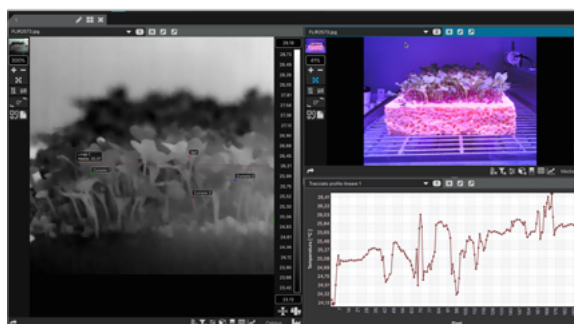


Figura 3 - Analisi termografica di una coltivazione di microverdure di Ravanello Daikon per la verifica delle temperature fogliari in piante sottoposte a stress idrico.



Figura 4 - Esterno container farm MICROx2 con pompa di calore ad alta temperatura (sx). Interno sistema di coltivazione automatizzata integrato di sensori IRT ed ambientali per la misurazione delle temperature ed umidità dell'aria, del substrato e della pianta (dx).

un parametro fondamentale per la crescita delle piante, in quanto influenza direttamente la fotosintesi e, di conseguenza, lo sviluppo e la produttività delle colture. La quantità di luce giornaliera necessaria alla pianta per potersi sviluppare completamente varia da specie a specie e dal tipo di prodotto che si vuole ottenere (Microverdure: 8-12 DLI; Ortaggi da foglia ed erbe 12-19 DLI; Fragole 20-24 DLI; Pomodori, Melanzane, Peperoncini e Cetrioli 24-35 DLI). La misurazione del DLI avviene attraverso sensori specializzati, quali i sensori PAR che registrano continuamente l'intensità luminosa, integrando i valori nell'arco delle 24 ore.

Le mappe DLI (Fig. 5) rappresentano una visualizzazione spaziale della distribuzione dell'integrale di luce giornaliera sul territorio italiano. La loro realizzazione richiede l'installazione di una rete di sensori di intensità luminosa distribuiti strategicamente all'interno ed all'esterno dello spazio di coltivazione. I dati raccolti vengono elaborati per creare rappresentazioni grafiche che evidenziano eventuali aree di carenza o eccesso di luce. Finora in Italia non erano disponibili mappe DLI. Recentemente l'ENEA vi ha posto rimedio creando mappe nazionali, mensili ed annuale, utilizzando le proprie banche-dati di misure a terra di radiazione solare e di mappe di radiazione solare per tutto il territorio italiano a diverse scale di dominio spaziale (con dettaglio fino al km quadro <http://www.solaritaly.enea.it/DLI/DLIMappelt.php>).

Queste mappe costituiscono uno strumento decisionale prezioso per gli operatori, consentendo di intervenire in modo mirato sull'illuminazione artificiale. I sistemi di illuminazione LED, controllati attraverso algoritmi basati sui dati DLI, possono compensare le carenze di luce naturale in specifiche aree della serra, garan-

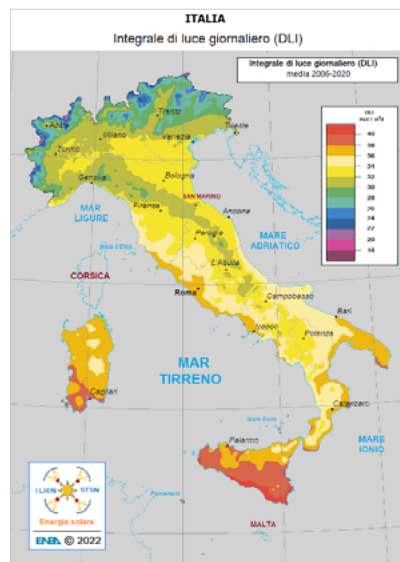


Figura 5 - Mappa DLI (integrale di Luce Giornaliera) dei valori medi annui (per l'intervallo annuo 2006-2020).

do a tutte le piante la quantità di luce ottimale per la loro crescita. Questa gestione precisa dell'illuminazione si traduce in una riduzione dei consumi energetici e in un miglioramento della qualità e della resa delle colture.

Conclusioni: verso un'agricoltura smart e sostenibile

L'integrazione di sensori, data analytics e tecnologie energetiche efficienti rappresenta la frontiera dell'agricoltura contemporanea, in particolare nell'ambito dell'indoor farming. Questo approccio multidisciplinare consente di affrontare le sfide della produzione alimentare con strumenti innovativi, orientati alla sostenibilità e all'efficienza. La raccolta e l'analisi dei dati trasformano l'agricoltura da settore tradizionale a settore ad alto tasso tecnologico aprendo possibilità precedentemente inimmaginabili.

Le tecnologie smart nell'agricoltura non rappresentano semplicemente un'innovazione tecnica ma un cambiamento paradigmatico nel modo di concepire la produzione agricola.

La possibilità di monitorare in tempo reale le condizioni delle colture, di au-

tomatizzare la gestione delle risorse e di prevenire potenziali problematiche attraverso l'analisi predittiva pone le basi per un'agricoltura più resiliente e sostenibile. In questo contesto l'ottimizzazione energetica e l'uso efficiente delle risorse non sono solo obiettivi desiderabili ma necessità imprescindibili per garantire la sostenibilità a lungo termine del settore agricolo.

La crescita costante del mercato dell'agricoltura 4.0, testimoniata dall'aumento del 17% delle soluzioni di Smart Agriculture per un business da 140 milioni di euro, conferma la validità di questo approccio e lascia intravedere un futuro in cui la tecnologia e l'agricoltura saranno sempre più interconnesse a beneficio dei produttori, dei consumatori e dell'ambiente.

per info: luca.nardi@enea.it