Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni

Digital Tree: Un modello digitale innovativo per migliorare la distribuzione dei trattamenti fitosanitari negli oliveti

Gianni Costa, Antonio Francesco Gentile, Emilio Greco, Davide Macrì

RT- ICAR-CS-25-12 **Settembre 2025**

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni (ICAR)
– Sede di Cosenza, Via P. Bucci 8-9C, 87036 Rende, Italy, URL: *www.icar.cnr.it*
– Sezione di Napoli, Via P. Castellino 111, 80131 Napoli, URL: *www.icar.cnr.it*
– Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, 153, 90146 Palermo, URL: *www.icar.cnr.it*

Digital Tree: Un modello digitale innovativo per migliorare la distribuzione dei trattamenti fitosanitari negli oliveti

Gianni Costa, Antonio Francesco Gentile, Emilio Greco, Davide Macrì

Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni del Consiglio Nazionale delle Ricerche
Via Pietro Bucci - Cubo 8-9 C - 87036 Rende (CS)

E-mail: {giovanni.costa, antoniofrancesco.gentile, emilio.greco, davide.macri}@icar.cnr.it

Abstract

Questo rapporto tecnico illustra dettagliatamente il processo di sviluppo di uno strumento innovativo e intelligente, il cosiddetto "Albero Digitale" (DT), in grado di prevedere il comportamento della distribuzione in diverse condizioni operative e di campo, con l'obiettivo di ottimizzare l'impiego dei prodotti fitosanitari (PPF) sotto il profilo tecnico ed ecologico. Il lavoro si colloca nell'ambito del progetto di ricerca IM GROOT (NRRP) – MISSION 4 COMPONENT 2 INVESTMENT 1.1 – "Fund for the National Research Pro-gram and for Projects of National Interest (NRP)" e si propone di analizzare la qualità e la sostenibilità dell'applicazione meccanica dei prodotti agrochimici negli oliveti, ponendo attenzione all'uniformità di distribuzione, all'impatto ambientale e alla sicurezza di operatori e persone esposte.

Keywords: Digital Tree; Plant Protection Products; Spray distribution; Life Cycle Assessment; Machine learning; Sustainable agriculture.

Introduzione

Il progetto *Implementation of a Digital Tree to Optimise Technical and Environmental Performances of Crop Protection Equipment (IM GROOT)* ha come obiettivo lo sviluppo e la validazione di un innovativo "Albero Digitale" (Digital Tree), concepito come strumento intelligente per migliorare la sostenibilità e la sicurezza delle applicazioni di prodotti fitosanitari negli oliveti. L'idea alla base del Digital Tree è quella di riprodurre, attraverso un prototipo digitale, la struttura e le funzioni di un albero reale, equipaggiato con strumentazione avanzata per il monitoraggio e l'acquisizione dei dati.

Il prototipo è costituito da un esemplare arboreo impiantato su campo libero, strumentato con una rete di sensori e collegato a un sistema di datalogger. Questa configurazione consente l'acquisizione in tempo reale di parametri relativi alla distribuzione della miscela, alla deposizione delle gocce, alle perdite al suolo e alla deriva, ossia agli indicatori chiave della qualità dell'applicazione. Integrando le tecnologie di sensing con metodologie di analisi dei dati, l'Albero Digitale permette di calcolare e prevedere il comportamento dell'irrorazione in diverse condizioni operative e ambientali.

Lo sviluppo del prototipo rappresenta un passaggio cruciale per collegare i dati sperimentali di campo con la modellistica predittiva. Da un lato, esso fornisce una piattaforma standardizzata e ripetibile per valutare le prestazioni degli irroratori in condizioni controllate e in campo; dall'altro, consente di costruire una base di conoscenza integrabile con tecniche di machine learning per ottimizzare la scelta dei parametri operativi, migliorare l'efficienza delle attrezzature e ridurre l'impatto ambientale.

Il presente rapporto illustra la progettazione, la realizzazione e le prime fasi di implementazione del prototipo di Albero Digitale, con particolare attenzione all'integrazione dei sensori, ai sistemi di acquisizione dati e alle attività preliminari di sperimentazione. Saranno oggetto di un prossimo RT l'analisi e lo sviluppo del modello digitale, i software applicativi e le configurazioni dei firmware.

Oltre a rappresentare una piattaforma di prova per la valutazione delle prestazioni tecniche delle attrezzature di distribuzione, l'Albero Digitale è concepito come strumento a supporto della sostenibilità ambientale. Le misurazioni raccolte dai sensori, riguardanti deposizione fogliare, perdite al suolo e deriva, permettono infatti di quantificare in modo oggettivo l'efficacia e le dispersioni durante l'applicazione. Questi dati, integrati con le informazioni sulle condizioni microclimatiche e operative, consentono di collegare le osservazioni sperimentali con la valutazione degli impatti ambientali secondo le metodologie del Life Cycle Assessment (LCA). In questo modo, il prototipo

non si limita a migliorare le prestazioni tecniche degli irroratori, ma fornisce anche una base solida per ridurre gli impatti sull'ambiente e tutelare la salute degli operatori e delle persone esposte.

Requisiti di progetto

La progettazione e la realizzazione del prototipo di *Albero Digitale* hanno richiesto fin dalle prime fasi l'individuazione di una serie di requisiti tecnici e funzionali, indispensabili per garantire l'affidabilità delle misure, la riproducibilità degli esperimenti e la possibilità di utilizzo in condizioni operative diverse.

Dal punto di vista funzionale, il sistema deve essere in grado di acquisire in modo simultaneo diversi parametri fisici e ambientali legati alla distribuzione dei prodotti fitosanitari, come l'intensità e l'uniformità della deposizione, nonché le condizioni microclimatiche locali. L'architettura scelta prevede un nodo centrale di controllo e quattro nodi di acquisizione periferici, ciascuno basato su microcontrollore, per un totale di sessantaquattro sensori distribuiti. I dati provenienti dai nodi devono essere raccolti e registrati in maniera sincronizzata dal nodo centrale, così da consentire correlazioni affidabili tra le variabili misurate. La trasmissione delle informazioni avviene attraverso collegamenti cablati, soluzione che garantisce la stabilità del sistema ed elimina le possibili interferenze tipiche delle connessioni wireless, soprattutto in un contesto caratterizzato dalla presenza di spruzzi e altre fonti di disturbo. Il nodo principale integra inoltre un sistema di datalogging che consente la registrazione continuativa dei dati e la loro successiva esportazione verso piattaforme esterne di analisi, oltre a svolgere la funzione di coordinamento e controllo operativo dei nodi periferici.

Dal punto di vista ambientale, il prototipo deve essere in grado di operare in condizioni di campo, resistendo all'umidità, alla polvere e alle variazioni termiche tipiche dell'ambiente agricolo. La struttura deve assicurare stabilità meccanica e mantenere inalterata la disposizione dei sensori, così da limitare o catturare la variabilità legata allo stato vegetativo della chioma arborea. L'alimentazione del sistema è garantita tramite collegamento diretto alla rete elettrica, scelta che consente continuità operativa e semplifica la gestione energetica rispetto a soluzioni basate su batterie o pannelli solari. La manutenzione deve risultare semplice, permettendo un rapido accesso ai nodi e ai sensori per interventi di calibrazione, sostituzione o aggiornamento.

Infine, il sistema deve rispettare le normative vigenti in materia di sicurezza elettrica per dispositivi a bassa tensione, riducendo i rischi per gli operatori durante l'installazione e l'utilizzo in campo. Anche se la scelta del cablaggio riduce sensibilmente i problemi di interferenza, i dispositivi devono

comunque essere progettati in conformità ai requisiti di compatibilità elettromagnetica, in modo da garantire un funzionamento sicuro e affidabile.

Oltre agli aspetti tecnici, l'Albero Digitale si inserisce anche in un approccio di valutazione ambientale basato sulle metodologie di Life Cycle Assessment (LCA), secondo gli standard ISO 14040 e ISO 14044. Questo garantisce che i miglioramenti ottenuti nelle applicazioni non si limitino alle prestazioni tecniche, ma contribuiscano anche a ridurre le perdite di prodotto, tutelare la salute di operatori e astanti e rafforzare la sostenibilità complessiva della difesa delle colture.

La distribuzione dei sessantaquattro sensori è stata progettata in modo da restituire un quadro dettagliato della deposizione e della deriva, mentre i nodi di acquisizione garantiscono la sincronizzazione dei dati e la possibilità di correlare i risultati alle condizioni operative e climatiche. Queste misure sono essenziali per stimare le perdite di prodotto e la loro dispersione nell'ambiente, e rappresentano un contributo diretto alla fase di inventario del Life Cycle Assessment. In questo modo diventa possibile tradurre i risultati delle prove sperimentali in indicatori quantitativi di impatto, confrontare scenari alternativi di applicazione e individuare le soluzioni che offrono il miglior compromesso tra efficacia tecnica e sostenibilità ambientale, in linea con gli standard ISO 14040 e 14044.

Architettura del prototipo

L'architettura del prototipo di Albero Digitale è stata concepita per integrare in un'unica struttura fisica tutti i componenti necessari all'acquisizione dei dati, al loro controllo e alla registrazione centralizzata. L'obiettivo è garantire un sistema modulare, robusto e facilmente estendibile, in grado di riprodurre in maniera fedele le condizioni dell'albero sottoposto a trattamenti fitosanitari.

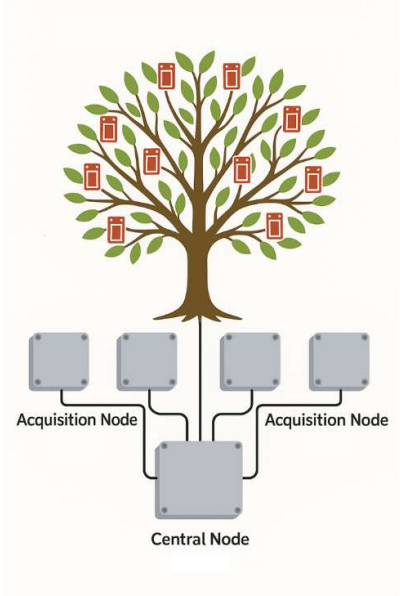
Al centro del sistema si trova un nodo principale che svolge le funzioni di alimentazione, logging e controllo. Questo nodo è collegato direttamente alla rete elettrica, così da assicurare continuità operativa durante le prove senza la necessità di batterie o pannelli solari. Al suo interno sono ospitati i dispositivi per la distribuzione dell'alimentazione ai diversi moduli, il datalogger per la memorizzazione dei dati acquisiti e l'unità di comunicazione per l'esportazione verso sistemi esterni di analisi. Lo stesso nodo centrale gestisce il coordinamento dei nodi periferici, verificandone il corretto funzionamento e assicurando la sincronizzazione dei dati raccolti.

Attorno al nodo principale sono disposti quattro nodi di acquisizione, ciascuno basato su microcontrollore Arduino. Ciascun nodo è dedicato alla gestione di un gruppo di sensori e si

interfaccia con essi tramite cablaggio. Complessivamente, i quattro nodi governano sessantaquattro sensori distribuiti sulla struttura dell'albero, collocati in posizioni strategiche per simulare la chioma e intercettare la distribuzione del prodotto fitosanitario. La scelta di suddividere i sensori su più nodi consente di ridurre la complessità del cablaggio locale e di aumentare l'affidabilità complessiva del sistema, facilitando eventuali operazioni di manutenzione o ampliamento futuro.

Il collegamento tra nodo centrale, nodi Arduino e sensori è interamente cablato. Tale scelta progettuale è stata dettata dalla necessità di evitare interferenze che possono verificarsi in presenza di collegamenti wireless, come nel caso del Wi-Fi, e di garantire stabilità nella trasmissione anche in condizioni operative caratterizzate dalla presenza di spruzzi, umidità o elementi metallici che possono disturbare la propagazione del segnale radio. Il cablaggio wired, pur comportando una maggiore complessità di installazione, offre la certezza di una comunicazione costante e priva di disturbi, requisito essenziale per la qualità dei dati acquisiti.

Dal punto di vista funzionale, i sensori distribuiti permettono di monitorare diversi parametri critici: la deposizione delle gocce sulla superficie fogliare, le perdite al suolo, la deriva delle particelle sospese e le condizioni microclimatiche circostanti. L'integrazione con il sistema di logging centralizzato consente di raccogliere e analizzare questi dati in modo coerente, rendendo possibile sia una valutazione tecnica immediata delle prestazioni dell'attrezzatura sia una successiva elaborazione orientata all'analisi ambientale. In particolare, l'architettura è stata pensata per fornire input quantitativi utili alla valutazione degli impatti secondo la metodologia del Life Cycle Assessment, assicurando così che il prototipo risponda non solo a esigenze sperimentali, ma anche a finalità di sostenibilità.



Sensori e strumentazione

Il prototipo dell'Albero Digitale è stato realizzato mediante l'integrazione di una serie di componenti elettronici ed elementi di protezione, selezionati in base alla loro affidabilità, compatibilità con microcontrollori e resistenza alle condizioni ambientali di utilizzo in campo.

Il cuore del sistema di acquisizione è costituito da schede **Arduino Mega 2560 REV3**, utilizzate come nodi periferici per la gestione dei sensori e la trasmissione dei dati al nodo centrale. La scelta di questa piattaforma è stata dettata dall'elevata disponibilità di pin di ingresso/uscita, dalla facilità di programmazione e dalla compatibilità con un'ampia gamma di sensori.

Tra i dispositivi di misura installati, particolare importanza rivestono i **moduli sensore di pioggia AZDelivery**, utilizzati per rilevare la presenza di acqua o liquido distribuito. La collocazione di più sensori consente di ricostruire in modo dettagliato la distribuzione delle gocce e la loro uniformità su diverse parti della chioma, fornendo dati fondamentali per la valutazione dell'efficacia dei trattamenti fitosanitari.

Il sensore di pioggia è costituito da due elementi principali: una scheda di rilevamento, realizzata con piste conduttive in grado di reagire al contatto con l'acqua, e un piccolo modulo elettronico che ne elabora il segnale. Quando la superficie della scheda si bagna, la resistenza elettrica tra le piste diminuisce, generando una variazione che viene trasformata dal modulo in un segnale elettrico. Questo può essere letto sia in forma digitale, come semplice indicatore binario della presenza o assenza di acqua, sia in forma analogica, fornendo una misura proporzionale al grado di bagnatura o all'intensità della pioggia.

Questa doppia modalità di uscita permette di impiegare il sensore in applicazioni diverse: dalla rilevazione immediata di un evento piovoso fino alla stima più fine della quantità di liquido depositato. Per garantire la stabilità delle misurazioni, il modulo deve essere collegato correttamente ai pin di alimentazione (VCC e GND) e ai pin di uscita (A0 o D0), mentre la scheda di rilevamento necessita di un minimo di manutenzione per evitare ossidazioni o accumulo di sporco che potrebbero compromettere la sensibilità. Nel contesto dell'Albero Digitale, questi sensori risultano particolarmente adatti a riprodurre in modo realistico la distribuzione delle gocce sulla chioma, offrendo dati affidabili e facilmente integrabili con le letture provenienti dagli altri dispositivi di monitoraggio.

Il sistema include anche un **Raspberry Pi 5 (CanaKit, Starter Kit PRO, 8 GB RAM)** che, inserito all'interno del nodo centrale, funge da unità di calcolo e interfaccia per la registrazione e l'elaborazione dei dati acquisiti. Questo dispositivo permette non solo il logging delle misure, ma anche l'esportazione e la gestione remota tramite rete.

Per assicurare la connettività esterna, è stato integrato un **router 4G LTE TP-Link TL-MR150**, che consente la trasmissione dei dati verso server o dispositivi remoti, rendendo il sistema accessibile anche a distanza.

L’alimentazione dei dispositivi è garantita da rete elettrica a 230 V, resa sicura grazie a un **avvolgicavo VIMAR 0P32733 2P+T 16A con disgiuntore termico di protezione**. Questo elemento non solo distribuisce l’alimentazione ai vari moduli, ma assicura anche la protezione del sistema in caso di sovraccarichi o anomalie.

Poiché il sistema deve operare in ambiente esterno, tutti i componenti elettronici sono stati collocati in **scatole stagne IP56**, selezionate per resistere a polvere, spruzzi e variazioni termiche. Le scatole presentano dimensioni adeguate (circa 300 × 220 × 120 mm) e sono realizzate in tecnopolimero ad alta resistenza, con guarnizioni e pressacavi RS PRO in Nylon 66 che garantiscono la tenuta all’acqua e la protezione dei cablaggi. Per ulteriore protezione è stato predisposto anche un **telone**

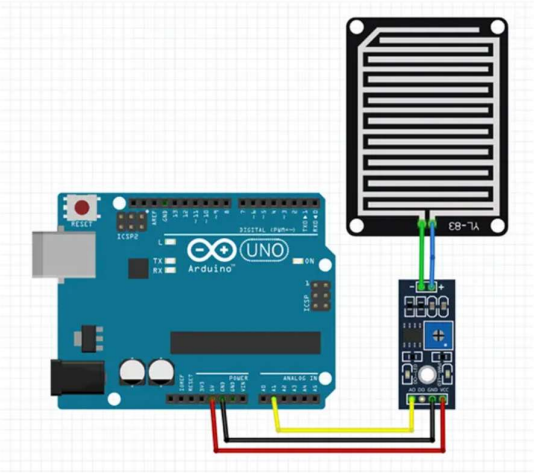
impermeabile rinforzato che funge da copertura supplementare in condizioni particolarmente avverse.

L’insieme di questi dispositivi costituisce una strumentazione modulare e robusta, in grado di assicurare l’acquisizione accurata e affidabile dei dati in campo. L’integrazione dei sensori con le unità di controllo e logging, protetti in involucri idonei all’ambiente esterno, rappresenta un requisito fondamentale per la validazione sperimentale del prototipo e per la raccolta di dati utili sia a livello tecnico che ambientale.

Cablaggio e connessioni

L’intero sistema dell’Albero Digitale è stato progettato con un’architettura di connessione cablata, scelta che risponde all’esigenza di eliminare possibili interferenze legate all’uso di collegamenti wireless e garantire al tempo stesso stabilità e continuità nella trasmissione dei dati. In un contesto operativo come quello agricolo, caratterizzato dalla presenza di spruzzi, umidità e ostacoli naturali, il cablaggio wired rappresenta infatti la soluzione più affidabile per assicurare qualità e integrità delle misurazioni.

Lo schema di cablaggio del singolo sensore è riportato di seguito. Nel nostro caso collegheremo solo l’uscita analogica del modulo comparatore ad uno dei pin di input della scheda Arduino. Gli altri due cavi mostrati nello schema elettrico sottostante sono necessari per l’alimentazione del comparatore.



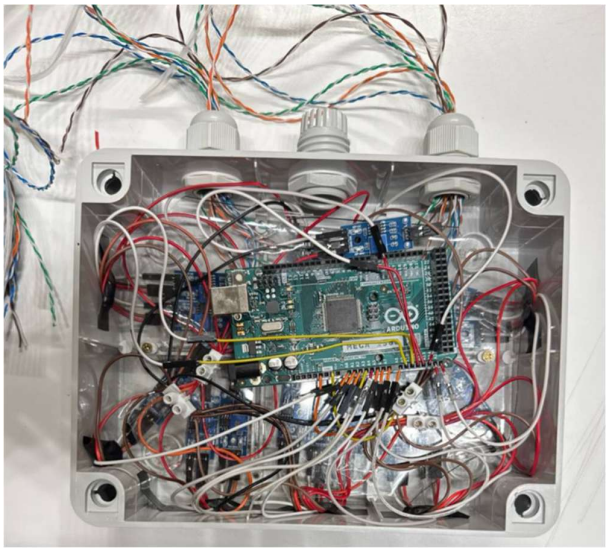
Il nodo centrale, che ospita l'unità di logging basata su Raspberry Pi 5, il router LTE per la comunicazione remota e i dispositivi di distribuzione dell'alimentazione, funge da punto nevralgico per tutte le connessioni. Da esso si diramano i collegamenti elettrici e di segnale verso i quattro nodi periferici di acquisizione, ciascuno costituito da una scheda Arduino Mega 2560 REV3. I cablaggi sono stati realizzati con cavi schermati e terminazioni dotate di pressacavi stagne, così da garantire protezione da infiltrazioni di acqua e ridurre al minimo l'esposizione a disturbi elettrici.

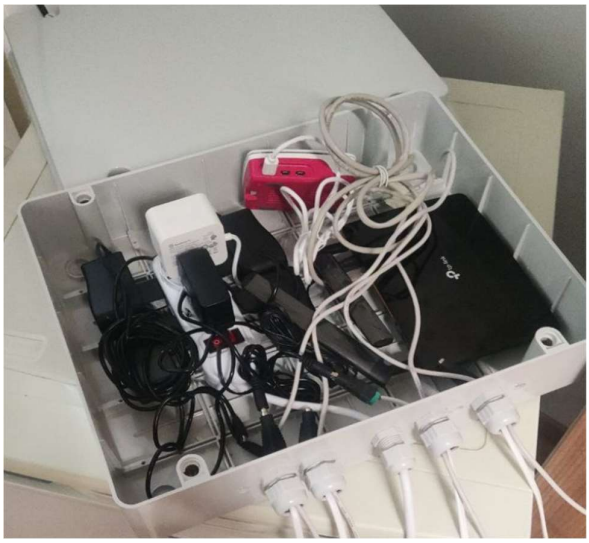
Ogni nodo Arduino è collegato direttamente a un gruppo di sensori, per un totale di sedici punti di misura per nodo distribuiti su una particolare area di interesse dell'albero. La scelta di ripartire i sensori su più nodi riduce la lunghezza dei singoli cablaggi, minimizza le cadute di tensione e rende più agevole la gestione dei collegamenti. I cavi di segnale e alimentazione verranno raccolti e fissati con sistemi di protezione meccanica, in modo da garantire ordine, sicurezza e facilità di manutenzione.

Per quanto riguarda l'alimentazione, l'intero sistema è cablato alla rete elettrica a 230 V tramite un avvolgicavo con protezione termica. All'interno delle scatole stagne, trasformatori e regolatori dedicati riducono e stabilizzano la tensione per alimentare in sicurezza i microcontrollori Arduino, i sensori e il Raspberry Pi. Questo approccio consente di garantire continuità operativa senza interruzioni, eliminando la necessità di sistemi di accumulo come batterie o pannelli solari.

Il flusso dei dati segue un percorso gerarchico: i sensori trasmettono i segnali ai nodi Arduino, i quali li elaborano e li inviano al nodo centrale attraverso connessioni cablate seriali. Il nodo centrale provvede quindi al salvataggio dei dati su memoria locale e, se necessario, alla loro trasmissione verso server remoti tramite il router 4G LTE. In questo modo l'architettura di cablaggio non solo

assicura affidabilità e assenza di interferenze, ma supporta anche la possibilità di monitoraggio in tempo reale e di successiva analisi dei dati raccolti.





Software e gestione dati

Il funzionamento dell'Albero Digitale si fonda su una stretta integrazione tra l'hardware di acquisizione e il software di controllo, registrazione e gestione dei dati. L'architettura software è stata sviluppata con un approccio modulare, così da consentire la suddivisione delle funzioni tra i nodi periferici basati su Arduino e il nodo centrale che integra Raspberry Pi e router LTE.

Nei nodi periferici, ciascun Arduino Mega 2560 REV3 esegue un firmware dedicato alla gestione dei sensori ad esso collegati. Il codice, sviluppato nell'ambiente Arduino IDE, ha il compito di inizializzare i moduli di acquisizione, effettuare la lettura ciclica dei segnali, convertire i valori grezzi in grandezze interpretabili e trasmettere i dati al nodo centrale.

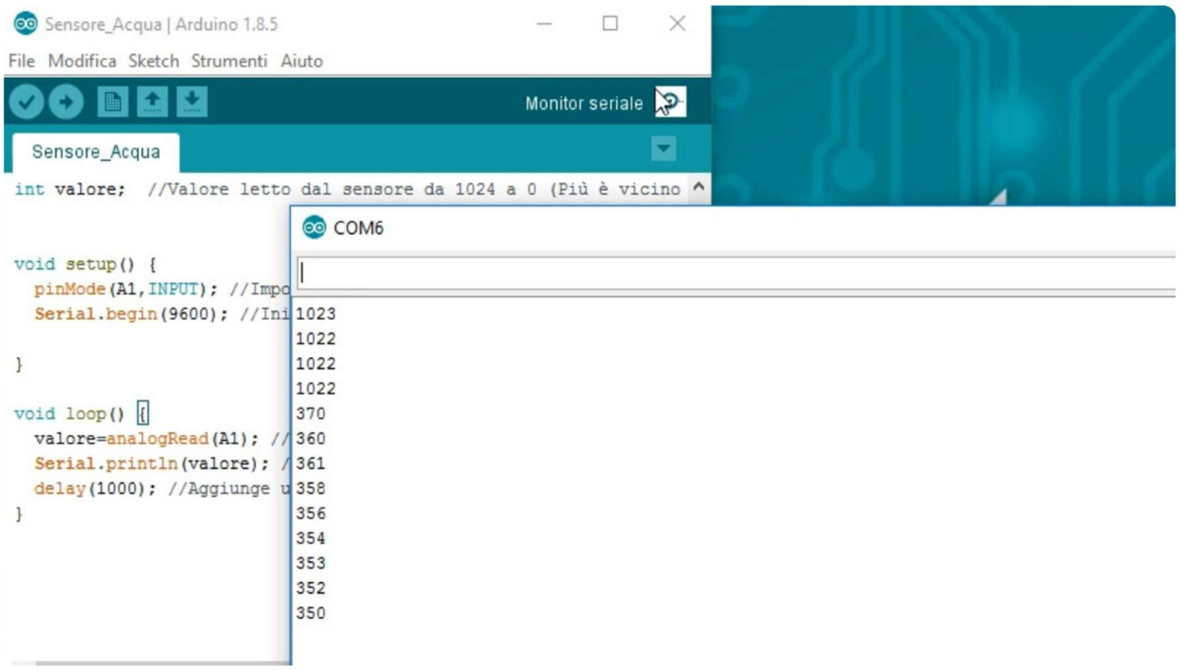
```
#define rainpin = A1

void setup() {
  pinMode(rainpin,INPUT); //Impostiamo il pin A1 in modalità input
  Serial.begin(9600); //Inizializza il monitor seriale
}
void loop() {
  valore=analogRead(rainpin); //Legge il valore dal pin A1 e lo assegna alla variabile valore

  Serial.println(valore); //Visualizza il valore tramite monitor seriale

  delay(1000); //Aggiunge un po' di attesa per consentire la lettura del valore
}
```

Lo sketch sopra mostrato è un semplice esempio di ciclo di lettura. Il valore letto dal sensore sull'ingresso A1 viene inviato al programma Arduino IDE attraverso la porta seriale per poi essere visualizzato sul monitor seriale. Il valore indicherà 1024 quando l'acqua non è presente, e diminuirà fino a 0 in base alla quantità di acqua presente.



Una particolare attenzione è stata riservata alla sincronizzazione dei cicli di acquisizione, in modo che le misure provenienti dai diversi nodi risultino confrontabili e possano essere analizzate in parallelo. Il firmware include inoltre procedure di controllo per segnalare eventuali errori di comunicazione o malfunzionamenti dei sensori, contribuendo così all'affidabilità complessiva del sistema. La descrizione dettagliata del software sarà oggetto di un altro Rapporto tecnico.

Il nodo centrale, basato su Raspberry Pi 5, ospita invece il software di logging, un client mqtt e gestione avanzata dei dati. Su questo dispositivo è stato installato un sistema operativo Linux, configurato per garantire stabilità e ridurre il consumo di risorse. Gli script di acquisizione, sviluppati in Python, si interfacciano con le porte seriali collegate ai nodi Arduino, raccolgono i flussi di dati e li organizzano in un formato standard (CSV) facilmente esportabile e leggibile da altri strumenti di analisi. Oltre all'acquisizione del dataset in CSV viene generata una replica delle misure in formato MQTT. Le misurazioni, aggregate e ripulite, vengono inoltrate ad un broker MQTT in modo da facilitarne l'integrazione con altri strumenti di analisi e monitoraggio del prototipo. La gestione

centralizzata consente inoltre di aggiungere metadati relativi a data, ora e condizioni operative, creando un tracciato completo per ogni sessione di prova.

Un ulteriore modulo software è dedicato alla trasmissione dei dati verso sistemi remoti. Grazie al router LTE integrato nel nodo centrale, il Raspberry Pi può inviare i file registrati a un server esterno o a una piattaforma cloud per l'archiviazione e l'elaborazione successiva. Questa funzionalità permette di accedere ai risultati anche a distanza e di condividere le informazioni tra diversi gruppi di ricerca, ampliando le potenzialità di utilizzo del prototipo.

Il sistema software non si limita alla raccolta passiva dei dati, ma costituisce anche la base per l'integrazione futura con algoritmi di machine learning. L'organizzazione strutturata dei dataset permette infatti di alimentare modelli predittivi in grado di stimare il comportamento della distribuzione in condizioni operative diverse da quelle direttamente misurate. In prospettiva, ciò consentirà di individuare configurazioni ottimali di funzionamento, supportando la regolazione degli irroratori in funzione sia della qualità tecnica dell'applicazione sia della riduzione dell'impatto ambientale.

Risultati preliminari

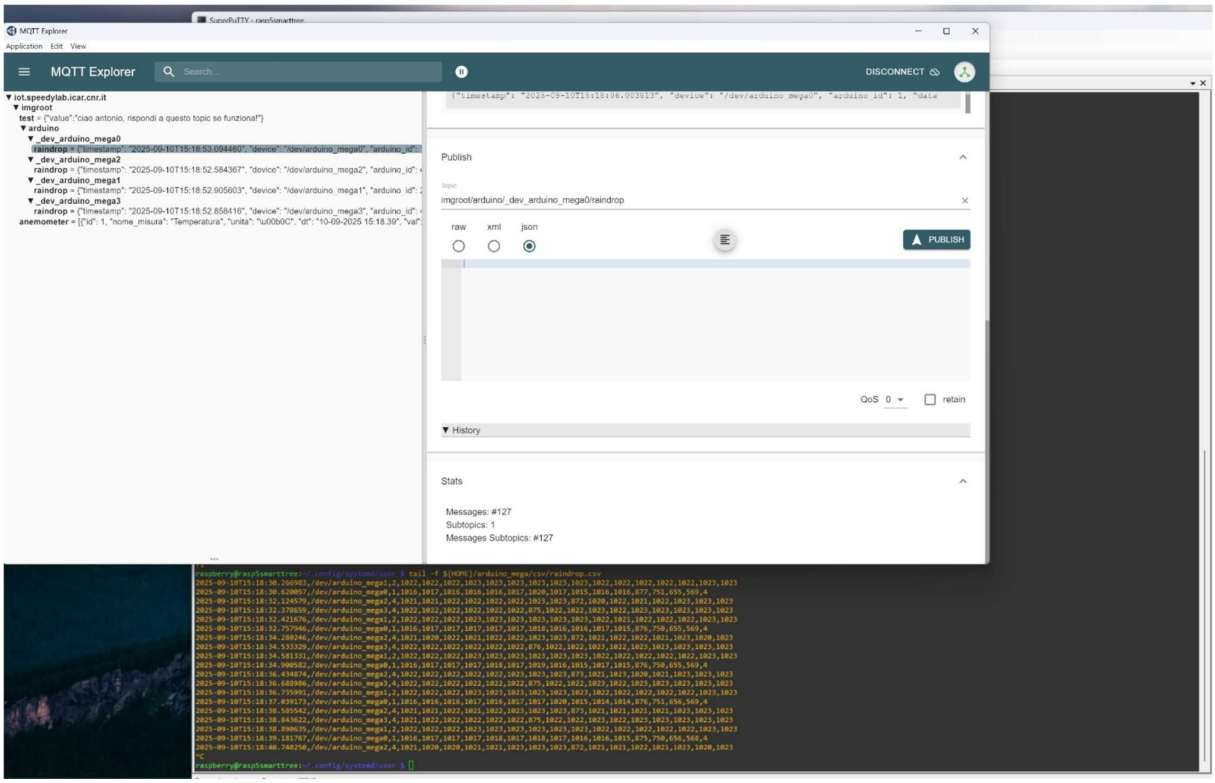
Prima dell'installazione in campo, il prototipo di Albero Digitale è stato sottoposto a una serie di test di laboratorio finalizzati a verificare il corretto funzionamento dell'intero sistema. Le prove hanno riguardato tutte le fasi del ciclo di acquisizione, dalla rilevazione con i sensori fino alla registrazione e trasmissione dei dati.

I sessantaquattro sensori installati sui nodi Arduino sono stati sottoposti a irrorazione controllata mediante un diffusore che ha simulato la distribuzione di una soluzione liquida. Questa configurazione ha consentito di valutare in condizioni riproducibili la risposta dei sensori al contatto con le gocce e la capacità del sistema di rilevare con accuratezza la presenza e l'intensità della deposizione.

Durante i test è stato verificato che i segnali generati dai sensori venissero correttamente acquisiti dai nodi Arduino, convertiti in dati digitali e trasmessi senza errori al nodo centrale. Il datalogger basato su Raspberry Pi ha registrato in modo continuo le misure ricevute, organizzandole in file strutturati e corredandole di informazioni temporali. È stato inoltre testato il funzionamento del modulo di comunicazione, che ha permesso la trasmissione dei dati verso sistemi esterni per ulteriori analisi.

Parallelamente alla raccolta, i dati sono stati sottoposti a una prima fase di preprocessing, comprendente la pulizia dei segnali, il controllo di coerenza e l'allineamento temporale delle misure provenienti dai diversi nodi. Questa fase ha confermato la possibilità di ottenere dataset completi e coerenti, pronti per essere utilizzati sia per analisi statistiche di base sia come input per modelli predittivi.

I risultati preliminari hanno dunque dimostrato la funzionalità dell'intero ciclo di sensing, logging, trasmissione e preprocessing. Le prove di laboratorio hanno evidenziato la stabilità delle connessioni cablate, la reattività dei sensori e l'affidabilità del sistema di registrazione, fornendo una base solida per il successivo impiego in campo.



Bibliografia

1. Arduino. **Arduino Mega 2560 Rev3 – Datasheet**. Disponibile online: https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
2. Raspberry Pi Ltd. **Raspberry Pi 5 – Product Brief**. Disponibile online: https://datasheets.raspberrypi.com/rpi5/raspberry-pi-5-product-brief.pdf, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
3. AZ-Delivery. **Raindrop Sensor Module – Product Page**. Disponibile online: https://www.az-delivery.de/en/products/regen-sensor-modul, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
4. TP-Link. **4G LTE Router TL-MR150 – Datasheet**. Disponibile online: https://static.tp-link.com/2020/202004/20200409/TL-MR150%28EU%29_2.0_Datasheet.pdf, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
5. Vimar. **Avvolgicavo da cantiere 0P32733 – Scheda prodotto**. Disponibile online: https://www.vimar.com/it/it/prodotti/avvolgicavo-0P32733, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
6. RS PRO. **Pressacavi in Nylon 66 – Catalogo RS**. Disponibile online: https://it.rs-online.com, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
7. RS PRO. **Scatola stagna IP56 in tecnopolimero – Catalogo RS**. Disponibile online: https://it.rs-online.com, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
8. **Arduino IDE – Software di sviluppo ufficiale**. Disponibile online: https://www.arduino.cc/en/software, ultima consultazione il 22 settembre 2025.
9. **Raspberry Pi OS – Documentazione ufficiale**. Disponibile online: https://www.raspberrypi.com/software/, ultima consultazione il 22 settembre 2025.