

Pero, irrigazione più precisa grazie ai sensori in vivo

Di S. Gentile, C. Franceschini, M. Janni, D. Solimando, G. Cotti, F. Vurro, G. Bortolotti, M. Romagnoli, J. Novi, S. Cornali, L. C. Grappadelli - 19 Settembre 2025



Validazione di un Dss irriguo tramite sensori di flusso linfatico: il caso studio Irr-mia. L'integrazione di sensori fisiologici in vivo, capaci di interagire direttamente con la linfa delle piante, permette di superare i limiti del bilancio idrico o dei sensori-suolo

Il cambiamento climatico sta colpendo duramente importanti filiere agroalimentari soprattutto nei confronti della disponibilità delle risorse idriche, imponendo progressi delle pratiche irrigue al fine di rendere le aziende agricole più resilienti e più sostenibili sia economicamente che nei confronti dell'ambientale. Partendo da questi presupposti, il progetto Irr-mia, finanziato dal programma Pr-Fesr Emilia-Romagna 2021-2027 e giunto al termine del suo secondo anno di sperimentazione, ha come obiettivo primario l'evoluzione di Irriframe (www.irriframe.it), il consolidato sistema di supporto alle decisioni (Dss) che Anbi e i Consorzi di bonifica forniscono agli agricoltori per ottimizzare la programmazione irrigua e la fertirrigazione, basandosi su un modello a bilancio idrico suolo-pianta-atmosfera.

I sensori per l'irrigazione del pero: il progetto Irr-mia

L'innovazione introdotta da Irr-mia consiste nell'integrare in questo modello i dati di consumo idrico provenienti da sensoristica innovativa installata direttamente in campo. Questo approccio ibrido, che crea un'interazione dinamica tra i dati misurati in vivo e il modello, permette di superare i limiti relativi alle stime previsionali.

L'obiettivo è duplice: da un lato, personalizzare il consiglio irriguo connettendolo alle reali condizioni della coltura; dall'altro, semplificare l'interazione tra l'agricoltore e il sistema. Le sperimentazioni, condotte in collaborazione con importanti realtà produttive dell'Emilia-Romagna, hanno interessato la coltura del pero, ma non solo, includendo anche coltivazioni strategiche come vite, pomodoro da industria, patata e barbabietola da zucchero.

La sperimentazione è basata sulla sensoristica "in vivo" che, a diretto contatto con la pianta, permette di interpretarne lo stato di salute in tempo reale.



Il **TreeTalker®Cyber** crea un completo modello digitale dell'albero misurando parametri chiave tramite sensori specifici: il flusso della linfa con la tecnica Hpv (Heat Pulse Velocity), la crescita radiale con un dendrometro di precisione, la trasmissione della luce attraverso la chioma tramite uno spettroradiometro e l'inclinazione del fusto con un accelerometro, oltre a temperatura e umidità ambientali.

Il **Bioristor** un innovativo sensore sviluppato dall'Imem-Cnr, si focalizza invece sulla linfa come indicatore di stress. Inserito direttamente nelle branche dell'albero, misura le variazioni ioniche della linfa attraverso due fili tessili funzionalizzati che agiscono come un transistor organico. Questa tecnologia permette di rilevare precocemente lo stress idrico, fornendo dati essenziali per una gestione irrigua mirata ed efficiente.

1 di 2 < >



Installazione TreeTalker su pera

La sperimentazione in campo

La sperimentazione su pera è stata condotta presso il centro Acqua Campus su cultivar Abate Fetel/MH, dove è stata installata la sensoristica avanzata descritta precedentemente per il monitoraggio in vivo. In particolare, attraverso la misura del flusso linfatico e delle variabili microclimatiche, è stato possibile determinare direttamente l'evapotraspirazione effettiva della coltura (ETc) e il momento di intervento irriguo, guardando alle risposte fisiologiche. I sensori sono stati distribuiti su parcelle sperimentali, organizzate secondo un disegno a blocchi randomizzati con quattro repliche, ad eccezione della tesi ULDI 70 che è stata inserita nello schema sperimentale preesistente (sviluppato su prove precedenti).

Il monitoraggio in vivo è stato integrato da rilievi biometrici sulla vegetazione, dalla misurazione dell'umidità del suolo con sensori, rilievi puntuali di umidità con metodo termo-gravimetrico, e dalla valutazione della radiazione solare intercettata dalla rete antigrandine. Tutti i dati raccolti tramite sensoristica sono stati costantemente elaborati, storicizzati e confrontati con le stime del sistema di supporto alle decisioni (Dss) Irriframe per validarne e aggiornare le conoscenze.

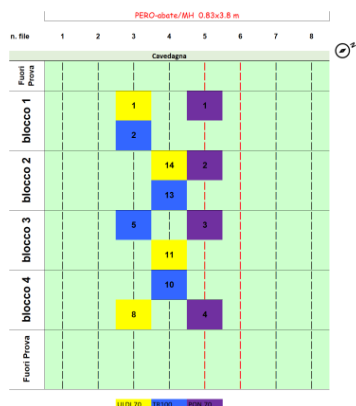
Per validare i segnali della sensoristica sono stati applicati **tre trattamenti irrigui differenti** messi a confronto:

- **Tradizionale (Tr 100) 100%**: restituzione del 100% del fabbisogno idrico cumulato, stimato tramite bilancio idrico, in un'unica somministrazione al momento di intervento irriguo;
- **Ultra Low Drip Irrigation 70% (Uldi 70)**: restituzione del 70% del fabbisogno ottimale tramite interventi a bassissima portata, costanti e distribuiti lungo tutto l'arco della giornata;
- **Ultra Low Drip Irrigation Delay 70% (Uldi 70 - D)**: restituzione del 70% del fabbisogno ottimale con irrigazione a bassissima portata e interventi costanti, ma con partenza ritardata a metà giornata, per indurre stress sulla pianta e modificare il sink dominante della pianta verso il frutto.



Al termine dei due anni di prova, il monitoraggio quali-quantitativo della produzione non ha evidenziato differenze significative tra le tesi irrigue. Questo risultato attesta una maggiore efficienza nell'uso dell'acqua per le due strategie a restituzione lenta e deficitaria, che hanno garantito gli stessi risultati produttivi con un minor apporto idrico (-30%). Il confronto diretto tra le due modalità a restituzione lenta non ha mostrato variazioni di performance. Si denota invece un calo produttivo generalizzato nell'anno 2025. Di seguito, si riportano i dati dettagliati relativi alle rese e alla distribuzione dei frutti nelle differenti classi di calibro per l'anno 2024.

1 di 5 < >



Confronto risultati dai sensori

Nelle stagioni 2024 e 2025, è stato condotto un confronto sistematico tra il consumo idrico della coltura, misurato direttamente tramite sensori di flusso linfatico, e il fabbisogno irriguo stimato dal Dss Irriframe. Si riportano i consumi cumulati misurati tramite TreeTalker per le differenti tesi, ed il confronto tramite Irriframe per la piena restituzione.

L'analisi dei consumi idrici per le stagioni 2024 e 2025, illustrata nelle figure di confronto, evidenzia la relazione tra il fabbisogno irriguo stimato dal Dss Irriframe e il consumo reale della coltura misurato tramite sensori di flusso linfatico. Emerge chiaramente come il modello Irriframe implementi correttamente la strategia di stress idrico controllato prevista per il pero, tramite la quale si induce un leggero stress nei 60 giorni successivi alla piena fioritura, stimando un fabbisogno inferiore rispetto alla piena restituzione idrica (tesi Tr 100) nei mesi di maggio e giugno, in linea con l'obiettivo di applicare un deficit programmato. Tuttavia, il confronto evidenzia anche come le stime del modello e il consumo effettivo della pianta possano divergere nella seconda parte della stagione, con una tendenza alla sovrastima ad agosto 2024 (+26%) e alla sottostima nei mesi estivi del 2025 (-7% a luglio e -13% ad agosto). Queste variazioni non indicano un'inefficienza del modello, quanto piuttosto l'enorme opportunità che emerge dall'integrazione di più fonti di dati. L'utilizzo combinato dei dati puntuali e dinamici forniti dai sensori con le stime del Dss si rivela una strategia vincente: permette di validare e ricalibrare il modello in tempo reale, fornendo all'agricoltore un quadro informativo più completo e robusto. Questo approccio integrato consente di affinare il consiglio irriguo, garantendo una gestione del frutteto più precisa, efficiente e realmente aderente alle esigenze della coltura in ogni sua fase fenologica.

Un elemento determinante per perfezionare le stime del consumo idrico è il calcolo dell'Evapotraspirazione di riferimento (ET_0). Durante la sperimentazione, è stata calcolata un' ET_0 sito-specifica e accurata, basata sui dati microclimatici puntuali registrati in campo (radiazione globale sotto rete, temperatura, V_{pd}) e applicando la



rigorosa equazione di Penman-Monteith. Questo valore è stato poi confrontato con l'ET₀ stimata dal Dss Irriframe, che utilizza invece il metodo di Hargreaves (tab. 1).

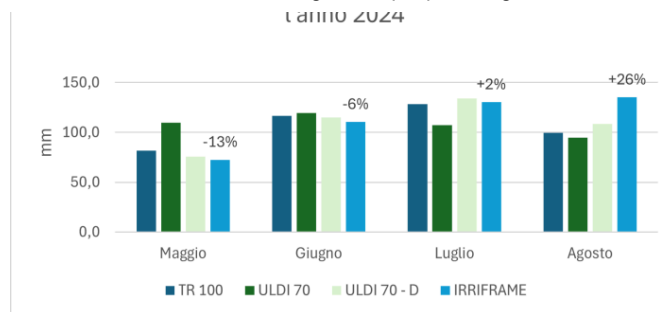
Tabella 1. Confronto tra ET0 misurata tramite Penman Monteith				
Anno/mese		Treetalker	Irriframe	Sovrastima Hargreaves rispetto a Pennman Monteith %
2024	maggio	88,18	115,53	24%
	giugno	126,62	137,06	8%
	luglio	155,54	155,22	0%
	agosto	125,31	134,35	7%
	settembre	63,50	72,23	12%
2025	maggio	128,64	143,40	10%
	giugno	170,11	190,10	11%
	luglio	172,19	179,00	4%
	agosto	111,55	126,80	12%

Come illustrato in dettaglio nella tabella 1, il confronto rivela una sovrastima sistematica da parte del metodo Hargreaves nel contesto specifico del pereto. Questa discrepanza è una costante in entrambe le stagioni di prova, con valori che raggiungono un picco del 24% nel maggio 2024 e si attestano frequentemente su scostamenti significativi, spesso tra il 7% e il 12%. Questa differenza nel dato di partenza dell'ET₀ è quindi uno dei fattori chiave che spiega perché il fabbisogno idrico calcolato dal modello si discosti da quello reale della coltura, incidendo direttamente sulla precisione del consiglio irriguo finale.

Nello stesso frutteto è stato testato il Bioristor sui trattamenti irrigui precedentemente descritti per valutare l'affidabilità delle misure e la risposta delle piante a diverse disponibilità d'acqua. Il monitoraggio, durato 93 giorni consecutivi per la prima stagione, ha evidenziato vari episodi di stress idrico, ma non ha mostrato differenze significative tra le piante irrigate al 70% e quelle irrigate al 100%, né a livello fisiologico né produttivo, come confermato anche dai rilievi morfometrici e dai risultati produttivi. Sulla base dei dati raccolti nel 2024 è stato sviluppato un algoritmo capace di trasformare i segnali del sensore in consigli irrigui, indicando quando irrigare e con quali volumi. L'analisi in tempo reale dei dati ha permesso di individuare precocemente situazioni di stress idrico e, in alcuni episodi, le piante irrigate seguendo le indicazioni di Bioristor hanno mostrato livelli di stress inferiori, suggerendo una distribuzione dell'acqua più efficiente (tab. 2).

Tabella 2. trattamenti irrigui e risparmio idrico			
Trattamenti irrigui	Consumo (mm/h)	Risparmio (%)	Numero di irrigazioni
Tradizionale 100	191,61	-	29
Pon70	134,13	30%	29
Guidato Bioristor	113,72	40,65%	22

Lo strumento è stato poi anche applicato nel 2025 per guidare l'irrigazione di una parcella sperimentale, confrontata con una gestione al 70% dell'ottimale. Nel complesso, l'irrigazione guidata da Bioristor ha consentito di ridurre i consumi idrici del 41% (tabella 2), un risultato di grande interesse che apre la strada a un risparmio economico e a una gestione più sostenibile delle risorse idriche, pur restando da verificare l'impatto su resa e qualità dei frutti, anche se analisi progressive di accrescimento dei frutti non hanno mostrato differenze significative tra le tesi.



Validazione ecofisiologica

Durante le stagioni 2024 e 2025, sono state eseguite misure ecofisiologiche per monitorare le richieste idriche delle piante sottoposte ai diversi volumi irrigui e allo stesso tempo validare e verificare le risposte dei vari sensori installati. Sono stati monitorati, tramite lo strumento Li-6800 (Li-Cor, Lincoln, Nr, Usa), l'attività fotosintetica (A =fotosintesi espressa in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), la traspirazione fogliare (E_{mm} =traspirazione espressa in $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e il grado di apertura degli stomi (g_{sw} =conduttanza stomatica espressa in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Sono state misurate anche le relazioni idriche degli alberi, attraverso la determinazione dei potenziali idrici del fusto mediante la camera di Scholander (Soil Moisture Corp, Model 3000F01).

Questi parametri sono indicatori che permettono di monitorare lo stato idrico e di stimare lo status fisiologico della pianta. Le misure sono state ripetute in diversi momenti della giornata, in particolare alle ore 9:00/10:00, 12:00/13:00 e 15:00/16:00 in modo da monitorare l'attività della pianta e confrontarla con la risposta dei sensori. Inoltre, ad intervalli di 10-15 giorni, è stato monitorato l'accrescimento diametrico dei frutti, su un campione di 4 frutti cartellinati per pianta, per un totale di 12 frutti a trattamento.

Osservando le risposte fisiologiche nella stagione 2024, le piante non hanno mostrato fenomeni di stress idrico, probabilmente favorito dalle frequenti precipitazioni avvenute durante il periodo estivo. Tuttavia, nel mese di Luglio è stato osservato che nelle piante irrigate con la tecnica Uldi70 si hanno i valori di traspirazione fogliare (E_{mm}) significativamente più alti rispetto alle altre tesi sia a mezzogiorno che nel pomeriggio. Tuttavia, questo trend non è stato osservato nei valori di apertura stomatica (g_{sw}), che non evidenziano differenze statisticamente significative. Nella stagione 2025 non sono state invece osservate differenze significative tra le diverse tesi. Tuttavia nel mese di luglio si è osservato che i valori di potenziale idrico al pomeriggio hanno i valori più negativi nella tesi Uldi70, a conferma che, ricevendo acqua più tardi nella giornata, queste piante siano soggette ad un leggero stress idrico, pur senza raggiungere valori significativi.

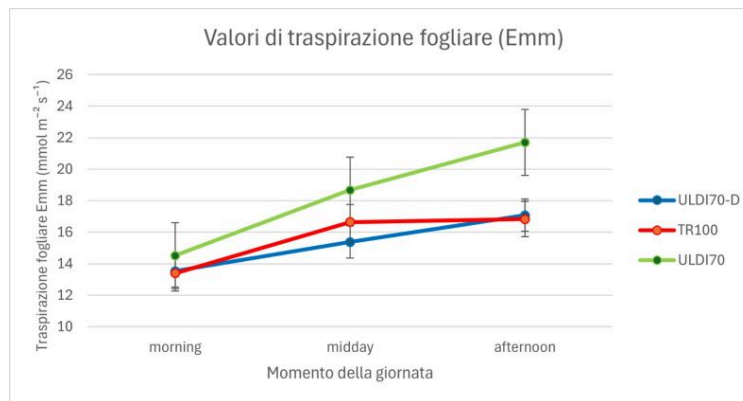
Dai valori medi dell'attività fotosintetica nel trattamento irrigato al 100% con Irriframe (Tr100), si hanno valori statisticamente inferiori rispetto alle altre tesi nel pomeriggio, ma allo stesso tempo le piante hanno i valori di conduttanza stomatica che non mostrano differenze rilevanti.

Infine, la crescita dei frutti in entrambe le stagioni non ha evidenziato differenze nella crescita ponderale, e i frutti delle piante irrigate al 70% del fabbisogno hanno mostrato lo stesso comportamento delle altre. Per quanto riguarda i dati qualitativi non distruttivi, ottenuti con il Da-Meter, si è evidenziato che sia nel 2024 che nel 2025 nella tesi Uldi70 i frutti erano più maturi (IDA 1.6-1.7) rispetto alle tesi Tr100 e Uldi70-D, dove la maggior parte dei frutti aveva valori di IDA tra 1.7 e 1.9. Considerando che il valore di riferimento alla raccolta per Abate Fétel è 1.8 IDA, i frutti dei trattamenti Tr100 e Uldi70-D erano quindi idonei per la conservazione.



In generale, nei due anni di sperimentazione a livello fisiologico non sono state individuate marcate differenze tra le diverse restituzioni irrigue e le piante hanno mostrato l'attitudine ad adattarsi ad una restituzione idrica inferiore al fabbisogno stimato. Tuttavia nel periodo in cui si sono registrate le temperature più elevate (come, ad esempio, il mese di luglio), le piante sembrano mostrare una risposta al momento in cui viene eseguito l'intervento irriguo come evidenziano i dati di potenziale idrico. Infatti, nella tesi Uldi70 sono stati osservati valori più negativi rispetto alle altre tesi. Iniziare il turno irriguo nella seconda parte della giornata consente di abbassare le perdite di acqua per traspirazione senza compromettere il processo fotosintetico.

1 di 6 < >



Irrigazione del pero "Data-Driven"

La gestione dell'irrigazione nei moderni sistemi frutticoli si affida in misura crescente a Sistemi di Supporto alle Decisioni (Dss), i quali stimano il fabbisogno idrico della coltura principalmente attraverso due approcci: la modellizzazione del **bilancio idrico del suolo**, basata su dati ambientali e coefficienti colturali (Kc), e il **monitoraggio diretto dello stato idrico del terreno tramite sensori**. Sebbene utili, entrambe le metodologie condividono una limitazione fondamentale: **non "interrogano" direttamente la pianta, ma ne deducono le necessità in maniera indiretta**.

Questa disconnessione si rivela particolarmente critica in condizioni di stress abiotico, sempre più frequenti. Durante ondate di calore intenso, ad esempio, le piante possono attivare meccanismi di difesa, come la chiusura stomatica, riducendo drasticamente la traspirazione per conservare acqua. In tali scenari, i modelli basati sul bilancio idrico, spinti dall'elevata domanda evapotraspirativa dell'ambiente, continuano a stimare un consumo idrico che in realtà non avviene, portando ad un'errata valutazione del fabbisogno e a potenziali sprechi d'acqua. D'altra parte, i sensori nel suolo, pur fornendo indicazioni preziose sul trend di umidità, spesso presentano dati di difficile interpretazione in valore assoluto e non riescono a cogliere con precisione l'effettiva dinamica di assorbimento radicale.

La sperimentazione condotta dimostra come l'**integrazione di sensori fisiologici in vivo, capaci di interagire direttamente con la linfa delle piante**, possa superare queste criticità. Questo approccio fornisce una **quantificazione diretta e in tempo reale del consumo idrico effettivo della pianta (ETc)**, catturando la sua reale risposta alle condizioni ambientali, incluse le fasi di stress in cui l'attività fotosintetica e traspiratoria si riducono.

L'integrazione di questi dati all'interno di un Dss per l'irrigazione rappresenta un cambiamento di paradigma: la



transizione da una gestione basata su stime indirette a una gestione data-driven, basata sullo stato fisiologico reale e misurato della coltura.

Monitorare direttamente la pianta permette non solo di ottimizzare l'efficienza d'uso dell'acqua — come evidenziato dai risultati produttivi delle tesi deficitarie — ma anche di rendere la gestione irrigua più resiliente agli estremi climatici. In questo modo, è possibile fornire alla coltura l'acqua di cui ha realmente bisogno, nel momento in cui ne ha bisogno, conciliando massimizzazione delle performance produttive e sostenibilità della risorsa idrica.

Queste ricerche sono state compiute nell'ambito delle attività finanziate dalla Regione Emilia Romagna attraverso il Fondo europeo di sviluppo regionale – Tipo di operazione Priorità 1, Azione 1.1.2.

