I sensori plant based rendono l'irrigazione sempre più precisa

La sensoristica integrata in sistemi IoT consente di monitorare i bisogni della pianta in tempo reale, adeguando le strategie irrigue senza penalizzare la produzione

di **S. Gentile, M. Janni[2], C. Franceschini[2,3] G. Cotti[4], L. Corelli Grappadelli[3]**
[1]Consorzio Canale Emiliano Romagnolo, Bologna
[2]IMEM-CNR, Parma
[3]DISTAL, Università di Bologna, Bologna
[4] PlantBit SrL, Parma

La scarsità di acqua – tema che si affianca ormai stabilmente a quello di eccessi pluviometrici – continua ad essere al centro tra le problematiche di coltivazione delle varie specie frutticole, tra cui il pero non fa eccezione. La ricerca negli anni ha evidenziato la possibilità di ridurre i volumi irrigui senza penalizzazioni produttive in melo, kiwi, pesco, pero, con risparmi che si aggirano tra il 30 ed il 50% dei volumi prescritti da sistemi di supporto decisionale come quello reso disponibile dal Consorzio del Canale Emiliano-Romagnolo (Cer) sul portale Irriframe (***www.irriframe.it***). A fronte di queste potenzialità di risparmio idrico, si pone con maggiore evidenza la necessità di affrontare il tema dell'automazione nella gestione delle centraline di controllo degli impianti irrigui, che ormai da anni sono in grado di essere monitorate ed attivate da remoto, in modalità "Internet of Things". L'acronimo IoT si usa ormai quotidianamente per indicare appunto attuatori (in questo caso le centraline irrigue) che possono essere collegate alla rete, attraverso la quale vengono scambiati dati (es. da centraline meteo e/o altri sensori verso Irriframe) e impartiti ordini esecutivi (es. apertura/chiusura impianto irriguo, da Irriframe verso centralina irrigua). Questo assetto è stato già testato con successo in precedenti progetti finanziati dalla Regione Emilia-Romagna (es.: Smart, Specialized, Sustainable Orchards – S_3O), ma finora non venivano incluse, tra quelle trasmesse dal frutteto ad Irriframe, informazioni raccolte in tempo reale da sensori ***plant based***, ovvero installati sull'albero o parti di esso.

Il progetto Irrimia (***irri-mia.it***) - finanziato dalla Regione Emilia-Romagna attraverso il Fondo europeo di sviluppo regionale, Priorità 1, Azione 1.1.2 - si è dato un obiettivo alquanto ambizioso, introducendo una sperimentazione tesa non solo a validare le due tecnologie sensoristiche selezionate, verificandone l'accuratezza di misura, ma soprattutto mirante ad integrare questi sensori in schemi IoT che possano già essere adottati da aziende frutticole impegnate nella coltivazione di piante da frutto, per guidare l'irrigazione in modo sempre più preciso, riducendo i carichi di lavoro del frutticoltore. Diversi aspetti ecofisiologici sono già stati oggetto di una nota su questa rivista, che dimostrò non esservi controindicazioni - a livello di fotosintesi e relazioni idriche - alla riduzione del 30% dei volumi. Pertanto questi dati non vengono ripetuti in questo lavoro, che rife-



Bioristor installato su branca di Pero

I sensori plant based

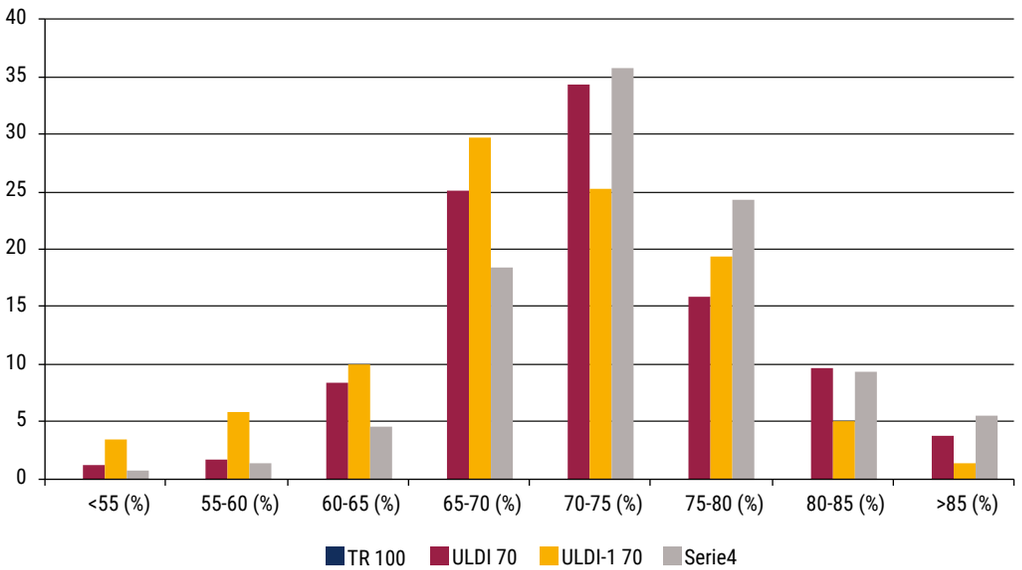
Tra le soluzioni di sensori di questo tipo che sono già o stanno per affacciarsi sul mercato, il progetto ha selezionato il TreeTalkerCyber, proposto da Nature 4.0, una azienda italiana supportata da ricercatori dell'Università di Viterbo, e costituito da una suite di sensori in grado di monitorare diversi parametri, come ad esempio i flussi di linfa nel tronco, dati meteoclimatici, emissione di radiazione da parte della chioma.
Questi dati vengono processati con algoritmi proprietari dell'azienda che lo propone e il fabbisogno irriguo calcolato può così essere inviato al sistema esperto di Irriframe che integra questo dato con altri di propria derivazione, per giungere alla determinazione ancora più precisa del volume irriguo da restituire, operando poi direttamente sulla centralina irrigua, che viene avviata e fermata senza alcun intervento umano, appunto in modalità IoT. Un altro sensore *plant based* di concezione alquanto innovativa è il Bioristor, un transistor elettrochimico organico (Organic Electro Chemical Transistor) proposto dall'istituto Imem-Cnr di Parma. Questo sensore viene inserito nei tessuti delle piante stesse ed è in grado di monitorare in modo continuativo ed in tempo reale i cambiamenti nella composizione ionica della linfa delle piante. Attraverso algoritmi sviluppati da Imem, questo dato viene correlato con la quantità di linfa xilematica che attraversa la pianta. L'elemento sensibile del Bioristor è rappresentato da una fibra naturale, che viene ottenuta da tessuti vegetali, e questo ne amplia moltissimo la facilità di applicazione a parti della pianta alquanto diverse: dai fusti ai germogli, fino al picciolo (potenzialmente) di foglie o di frutti.

risce invece dati produttivi e di efficienza idrica nell'arco dei 3 anni di prova, confrontando tre strategie irrigue: 100% consiglio Irriframe integrato dai sensori, o 70% dello stesso volume, distribuito secondo due modalità, di cui una tesa ad assicurare una migliore idratazione dell'albero nelle ore più calde della giornata.

Impianto e trattamenti irrigui

La sperimentazione è stata condotta nel triennio 2024-2026 presso il centro Acqua Campus del Cer a Budrio (BO), in un pereto di cv. ***Abate Fetel*** innestato su MH e protetto da rete antigrandine. Il sesto di impianto, pari a 3,8 × 0,83 m, corrisponde a una densità di circa 3.150 piante/ha.
La prova è stata organizzata secondo un disegno a blocchi randomizzati, con tre trattamenti irrigui e quattro repliche, per un totale di 12 parcelle. Per i rilievi produttivi sono state considerate 6 piante per parcella, per complessive 72 piante. I tre trattamenti si differenziavano per volume irriguo restituito, intensità di erogazione e orario di somministrazione:
- TR 100 (tradizionale): restituzione del 100% del fabbisogno idrico stimato dal Dss Irriframe, con intensità di erogazione comprese tra 2,5 e 3,0 mm h^{-1};
- Uldi 70 (Ultra Low Drip Irrigation): restituzione del 70% del fabbisogno stimato da Irriframe, con intensità di 0,4-0,5 mm h^{-1} e distribuzione indicativamente compresa tra le ore 9:00 e le 19:00, in modo da avvicinare l'erogazione idrica al periodo di maggiore attività traspiratoria della pianta;
- Uldi -1-70 (Ultra Low Drip Irrigation Delay): restituzione del 70% del fabbisogno stimato da Irriframe, con intensità di 0,6-0,8 mm h^{-1} e avvio ritardato dell'irrigazione, indicativamente dalle ore 12:30 alle 21:00. La strategia era finalizzata a indurre un moderato deficit idrico nelle ore mattutine e a concentrare la restituzione in prossimità del picco di Vpd e nelle prime ore serali, con l'obiettivo di sostenere l'idratazione e l'accrescimento del frutto.

FIG. 1 RIPARTIZIONE NELLE CLASSI DI CALIBRO PER LE TRE ANNATE DI SPERIMENTAZIONE 2024-2026



Monitoraggio dello stato idrico

Nel corso della prova sono stati utilizzati sistemi TreeTalkerCyber installati sulle piante per monitorare in continuo il flusso linfatico, le variazioni del diametro del fusto e le condizioni microclimatiche in prossimità della chioma. I dati di flusso linfatico, rilevati mediante tecnica Heat Pulse Velocity (Hpv), sono stati elaborati per stimare il consumo idrico della pianta e confrontati con le misure ottenute dalla restante strumentazione presente nel sito sperimentale.
I dati microclimatici sono stati inoltre utilizzati per calcolare l'evapotraspirazione di riferimento (ET0) mediante l'equazione di Penman-Monteith. I valori ottenuti sono stati confrontati con quelli stimati da Irriframe con il metodo di Hargreaves, per valutare le differenze associate alle condizioni microclimatiche specifiche del frutteto.

Il consumo idrico stimato mediante i sensori di flusso linfatico è stato confrontato con quello calcolato dal bilancio idrico di Irriframe e le differenze osservate sono state utilizzate per affinare il modello. I dati di flusso linfatico sono stati elaborati e rapportati alla densità d'impianto per ottenere una stima del consumo idrico della coltura espressa in mm, confrontabile con quella fornita da Irriframe. Attraverso un collegamento Web-Api, il dato misurato sulla pianta è stato quindi trasferito al Dss e utilizzato per aggiornare giornalmente il bilancio idrico e il conseguente consiglio irriguo.

Monitoraggio con Bioristor

Il Bioristor è un sensore inserito direttamente nei tessuti della pianta e utilizzato per monitorarne in continuo lo stato idrico attraverso le variazioni del segnale ionico. Nel 2024 i dati raccolti sono stati utilizzati per individuare gli episodi di stress idrico e sviluppare un algoritmo per il consiglio irriguo. Nel 2025 l'algoritmo è stato applicato alla gestione di una parcella sperimentale e confrontato con una tesi irrigata al 70% del fabbisogno ottimale. I dati delle prime due stagioni hanno inoltre permesso di sviluppare uno stress index, successivamente applicato in campo nel 2026 mediante una versione evoluta del sensore. L'andamento dell'indice è stato quindi confrontato con gli interventi irrigui e le precipitazioni.

Rilievi produttivi e analisi statistica

Al termine di ciascuna stagione sono state rilevate le produzioni di 6 piante per ciascuna parcella, per un totale di 72 piante. Per ciascun trattamento sono stati determinati il numero di frutti per pianta, la produzione per pianta, il peso medio dei frutti, la distribuzione nelle classi di calibro e la resa commercializzabile. L'efficienza d'uso dell'acqua (Wue) è stata calcolata come rapporto tra la produzione ottenuta e il volume di acqua irrigua distribuito ed espressa in g L^{-1}. I dati sono stati sottoposti ad analisi della varianza (Anova) secondo un disegno a blocchi randomizzati, considerando nel modello gli effetti del trattamento irriguo e del blocco. Le differenze tra i trattamenti sono state considerate significative per $p < 0,05$.



Piante in prova con le strumentazioni in vivo e relativi gateway datalogger

Dati produttivi

La *tabella 1* riporta sinteticamente i principali parametri produttivi e di efficienza rilevati nel corso dei tre anni di prova. Per tutti i parametri produttivi non si sono rilevate differenze tra i tre trattamenti testati, in nessuna delle annate, a dimostrazione che la riduzione del 30% nei volumi consigliati da Irriframe per il pero si può attuare senza penalizzazioni, consentendo in questo modo un considerevole risparmio idrico nell'irrigazione di precisione in questa specie.

La solidità di questo assunto si desume anche dalle forti differenze produttive registrate tra le annate, in cui però non si sono mai registrati

TAB. 1 PRODUZIONE TOTALE, PRODUZIONE >65MM DIAMETRO (% E PESO), VOLUMETRIA APPLICATA, EFFICIENZA USO DELL'ACQUA (WUE), NUMERO FRUTTI PER PIANTA E PESO MEDIO FRUTTI

Trattamenti	Annata	resa totale (q/ha)	resa comm. 65+ (%)	resa comm. 65+ (q/ha)	numero frutti pianta	sign.	peso medio (grammi)	sign.	piogge + irrigazioni (mm)	W.U.E. (g/l)	sign.
TR 100	2024	496,0	88,6	438,4	65,4	ab	241,5	ab	552,4	8,980	
ULDI 70	2024	484,3	80,9	390,6	73,7	a	213,4	b	513,9	9,423	
ULDI-1 70	2024	428,8	93,3	400,4	51,1	b	265,7	a	520,6	8,237	
TR 100	2025	157,9	90,2	142,0	18,4		269,6		503,3	3,138	
ULDI 70	2025	125,7	93,2	116,9	13,8		286,4		409,8	3,066	
ULDI-1 70	2025	119,3	91,5	109,0	13,5		280,2		402,5	2,964	
TR 100	2026	272,2	86,5	233,1	36,6		124,4		611,4	4,4520	b
ULDI 70	2026	276,7	76,0	210,1	41,9		134,8		508,8	5,4388	a
ULDI-1 70	2026	270,1	82,7	220,1	35,1		155,3		508,8	5,3090	a

effetti negativi della ridotta idrometria sulla produzione ettariale. Infatti, se da un lato il 2024 è stato caratterizzato da produzioni elevate, con rendimenti di prodotto commercializzabile vicini o superiori alle 40 t/ha, il 2025 - a causa di numerosi fattori ambientali - ha registrato valori alquanto bassi per tutti i trattamenti (compresi tra 11 e 15 t/ha), mentre il 2026 ha raggiunto valori intermedi attorno alle 21-23 t/ha. Per quanto riguarda le due prime annate, il numero di frutti per pianta è risultato diverso, con valori inferiori per la tesi Uldi -1-70, intermedi per il controllo, e più alti nella tesi Uldi 70 (***tab. 1***); tuttavia il peso medio dei frutti nella tesi a rilascio ritardato è risultato il maggiore, riportando quindi le produzioni ettariali agli stessi livelli delle altre due tesi.

Anche nel 2025, pur senza registrare differenze tra i tre trattamenti, si è confermata la risposta fisiologica al numero di frutti per pianta: a fronte di minore produzione, il peso medio è risultato alquanto maggiore (di oltre 50 g/frutto nella tesi Uldi 70 del 2025 su quelli del 2024). Tuttavia, nel 2024, la distribuzione idrica ritardata del terzo trattamento ha ovviato a questo handicap, inducendo dimensioni del frutto molto simili (attorno ai 270 g) a quelle 2025, a dimostrazione degli effetti positivi sulla crescita dei frutti che si possono ottenere con strategie di diversa temporizzazione dell'intervento irriguo, conseguenti ad un accoppiamento più stretto tra strategia di restituzione e fisiologia di accrescimento del frutto.

Nel 2026 invece, a fronte di produzioni e numero di frutti per pianta intermedi, le dimensioni dei frutti sono risultate alquanto ridotte, verosimilmente a causa dei lunghissimi periodi di caldo estremo (sopra i 35 °C) registrati in questa ultima estate. A dimostrazione dell'importanza dell'ora del giorno in cui avviare l'irrigazione, la restituzione ritardata dell'acqua, effettuata nel terzo trattamento, ha spostato in tutte le tre annate una distribuzione dei calibri dei frutti verso valori più elevati rispetto al controllo (pur senza raggiungere la significatività), ed al trattamento Uldi-70, come si può rilevare dalla ***figura 1***.

Efficienza d'uso dell'acqua

Come è stato indicato in precedenza, considerando gli apporti irrigui delle prime due annate si può apprezzare una riduzione nel 2025 dei volumi applicati, che riflette - seppur parzialmente - l'effetto della presenza/assenza



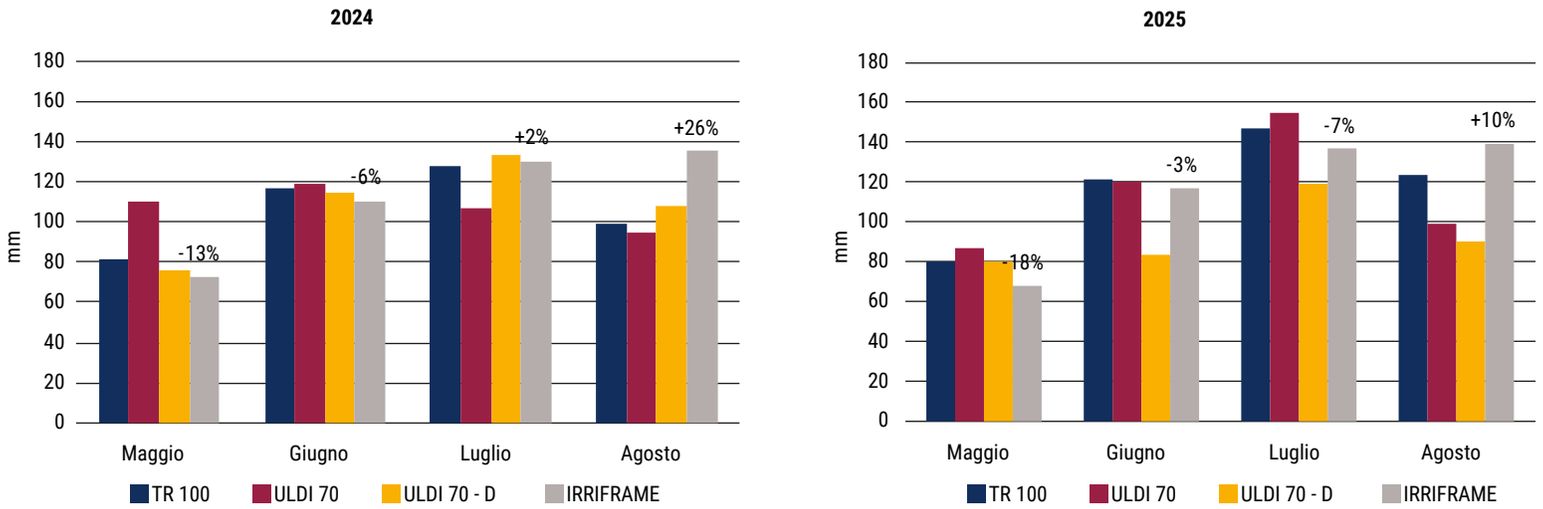
Installazione della sensoristica in vivo TreeTalker

di frutti: in presenza di un maggior numero di centri di accumulo di carboidrati (i frutti) nel 2024, si rileva un maggior consumo d'acqua, a fronte però di una maggiore efficienza, come dimostrato dal rapporto tra frutta prodotta e acqua utilizzata (circa 9 vs. 3, ***tab. 1***).

Questo si può spiegare con lo stimolo alla



FIG. 2 CONFRONTO MENSILE TRA IL CONSUMO IDRICO DELLA COLTURA STIMATO MEDIANTE FLUSSO LINFATICO (SAP FLOW) E TRAMITE STIMA DEL BILANCIO IDRICO DI IRRIFRAME



Nota: Le percentuali indicano lo scostamento della stima Irriframe rispetto al dato ottenuto mediante sap flow.

fotosintesi, che induce maggiore apertura stomatica, in presenza di un numero più elevato di frutti. Nel 2026 si sono applicati volumi irrigui abbastanza in linea con il 2024 (che però vedeva un carico di frutti ben più elevato), ma il risultato ponderale medio per frutto non ha rivelato un vantaggio (come era stato nel 2025), proprio per l'andamento estremamente caldo e siccitoso dell'annata. In questo caso quindi, l'efficienza d'uso dell'acqua è risultata solo leggermente più alta di quella del 2025. Per quanto riguarda questo parametro, non si sono verificate differenze tra i trattamenti nelle annate 2024 e 2025, mentre nel 2026 i due trattamenti in deficit sono risultati più efficienti del controllo, ad ulteriore dimostrazione dell'effetto positivo, sulla funzionalità fisiologica dell'albero, di lievi stati di stress idrico durante la giornata (*tab. 1*).

Sap flow e Irriframe

La stima del consumo idrico ottenuta mediante i sensori di flusso linfatico è stata confrontata, su base mensile, con quella derivata dal bilancio idrico di Irriframe. Per semplicità di rappresentazione viene qui riportato all'interno della *figura 2* il confronto relativo alla tesi TR100, assunta come riferimento rispetto alla restituzione irrigua standard del Dss.

Nei due anni considerati emerge una tendenza stagionale comune. Nelle fasi iniziali della stagione Irriframe ha generalmente sottostimato il consumo rilevato mediante sap flow: nel 2024 lo scostamento è stato pari a circa -13% in maggio e -6% in giugno, mentre nel 2025 ha raggiunto circa -18% in maggio e -4% in giugno. Nel mese di luglio le differenze si sono ridotte, risultando pari a +2% nel 2024 e -7% nel 2025. In agosto la tendenza si è invece invertita in entrambe le annate, con una sovrastima da parte di Irriframe pari a circa +26% nel 2024 e +11% nel 2025.

Il confronto suggerisce quindi che lo scostamento tra il consumo misurato direttamente sulla pianta e quello stimato dal modello non sia costante durante la stagione, ma possa variare anche in funzione della fase stagionale e delle condizioni ambientali. Questo risultato rafforza l'interesse dell'integrazione dei dati plant-based nel Dss, utilizzandoli per correggere dinamicamente il bilancio idrico e rendere il consiglio irriguo maggiormente aderente alla risposta effettiva della coltura.

Il monitoraggio mediante TreeTalker®Cyber è proseguito anche nel 2026. L'intero dataset triennale sarà oggetto di un'analisi più approfondita, nella quale i dati di flusso linfatico saranno valutati congiuntamente alle variabili microclimatiche e alle altre informazioni acquisite nel corso della prova, al fine di approfondire le cause degli scostamenti osservati e la loro evoluzione durante la stagione.

Bioristor, misura in tempo reale

Nello stesso frutteto il sensore Bioristor è stato testato nel corso delle tre annate di sperimentazione con l'obiettivo di valutarne l'affidabilità nel monitoraggio continuo dello stato idrico delle piante e la possibilità di utilizzare il segnale rilevato direttamente sulla pianta per supportare la gestione dell'irrigazione. Nel 2024, durante una prima fase di monitoraggio protrattasi per 93 giorni consecutivi, il sensore ha consentito di individuare diversi episodi di stress idrico. Il confronto tra piante irrigate al 70% e al 100% del fabbisogno non ha tuttavia evidenziato differenze significative né nella risposta fisiologica né in quella produttiva, in accordo con i rilievi morfometrici e produttivi. Sulla base dei dati acquisiti nel corso di questa prima stagione è stato sviluppato un algoritmo per il consiglio irriguo, in grado di elaborare il segnale del Bioristor e fornire indicazioni sul momento in cui intervenire e sui volumi d'acqua da distribuire.

Nel 2025, tale approccio è stato applicato alla gestione irrigua di una parcella sperimentale, confrontata con una tesi irrigata al 70% del fabbisogno ottimale. Nel complesso, l'irrigazione guidata dal Bioristor ha consentito di ridurre i consumi idrici del 41%, senza evidenziare differenze significative nell'accrescimento progressivo dei frutti tra le tesi. Parallelamente, l'analisi congiunta dei dati raccolti nelle campagne 2024 e 2025



Sitofex®

QUANTITÀ E QUALITÀ IN PERFETTA ARMONIA

- Maggiore produzione e frutti più sviluppati
- Più frutti nei calibri più grandi
- Maggiore conservabilità in post raccolta
- Mantenimento delle caratteristiche varietali

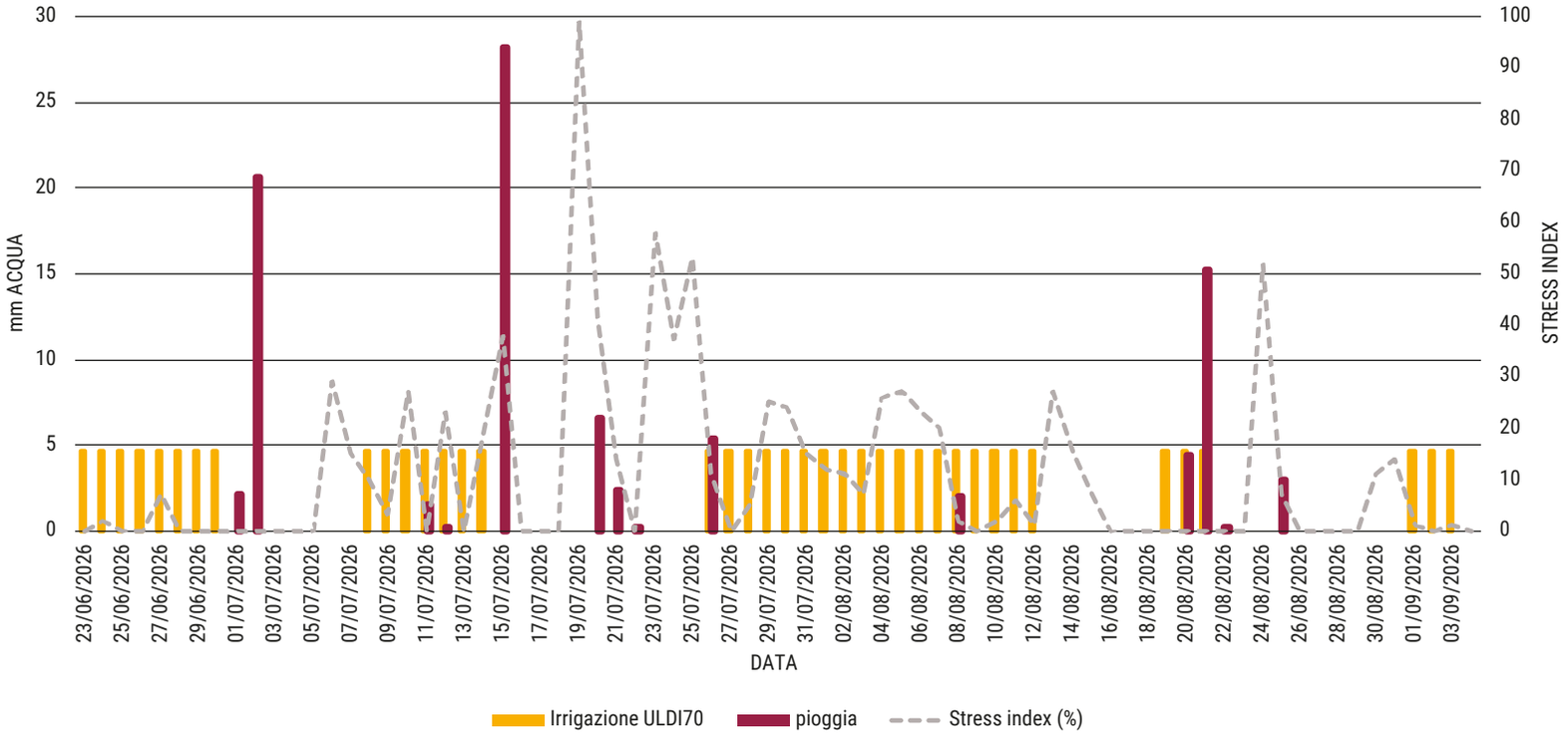
Aut. Ministero della Salute n. 12828 del 02/10/2006. Estensione per melo, pero e ciliegio autorizzata il 29/07/2026. Sitofex® è un prodotto autorizzato su actinidia, uva da tavola, melo, pero e ciliegio. Estensione d'impiego alla coltura del kiwi contro PSA autorizzata in data 11/12/2024. Usare i prodotti fitosanitari con precauzione. Prima dell'uso leggere sempre l'etichetta e le informazioni sul prodotto.

CONSULENZA PER ITALIA
Dr. Saverio D'Onza
Via Vespucci 42 | 56100 Pisa, Italy
T +39 347 7366995
saverio.donza@extern.alzchem.com

FABBRICANTE
Alzchem Trostberg GmbH
Dr.-Albert-Frank-Straße 32
83308 Trostberg, Germany
alzchem.com/it

alzchem group

FIG. 3 DESCRIZIONE DELL'INDICE DI STRESS ACQUISITO CON BIORISTOR, PIOGGE E IRRIGAZIONI EFFETTUATE NELLA PROVA 2026



ha permesso di sviluppare uno stress index, finalizzato a tradurre il segnale del Bioristor in un indicatore sintetico e continuo dello stato di stress idrico della pianta.

Nel 2026, grazie alla collaborazione con PlantBit Srl, è stata installata una versione più evoluta e "smart" del Bioristor, che ha consentito di applicare direttamente in campo lo ***stress index*** sviluppato negli anni precedenti. L'indice ha mostrato una chiara corrispondenza con la disponibilità idrica della pianta, aumentando rapidamente nei periodi con apporti idrici assenti o limitati e diminuendo in seguito a irrigazioni o precipitazioni (***figura 3***). I principali picchi di stress sono stati osservati intorno al 18–19 luglio e al 24–25 agosto, seguiti da rapide riduzioni in risposta agli apporti idrici. Questi risultati confermano la capacità del Bioristor di rilevare in modo continuo e tempestivo le variazioni dello stato idrico della pianta.

Risparmio idrico assicurato

Al termine di tre anni di sperimentazione, questo progetto evidenzia alcuni aspetti significativi di grande rilievo per la moderna frutticoltura. In primo luogo, si conferma la possibilità di ridurre fino al 30% i volumi irrigui calcolati con l'approccio standard di Irriframe senza penalizzazioni produttive o di dimensioni dei frutti. A questo proposito, la sperimentazione ha dimostrato come anche la modulazione oraria degli apporti (strategia Delay) rappresenti uno strumento agronomico efficace per sostenere l'idratazione del frutto durante i picchi di esigenza traspirativa (Vpd elevato).

L'uso di soluzioni sensoristiche capaci di misurare in tempo reale il consumo irriguo della pianta si rivela una soluzione oggi già adottabile: nel 2026 i sensori di flusso linfatico sono stati integrati con successo nel sistema Irriframe, permettendo di ricalibrare dinamicamente il bilancio idrico e di controllare direttamente la restituzione irrigua in modalità 100% IoT, senza necessità di interventi manuali. La totale assenza di differenze registrata nell'ultimo anno tra la tesi di controllo a pieno apporto (TR 100) e le due tesi gestite in deficit a bassissima portata (Uldi 70 continuo e Uldi 70-D con erogazione ritardata) dimostra in modo inequivocabile l'efficacia e la concreta fattibilità di questo approccio data-driven. Questa integrazione consente infatti di superare i limiti delle stime basate sui soli parametri ambientali, evitando inutili sovra-irrigazioni nei periodi in cui la pianta riduce la traspirazione per difendersi da stress termici estremi.

Anche i risultati ottenuti con il Bioristor confermano l'interesse dei sensori plant based per rendere sempre più precisa la gestione dell'irrigazione. Nei tre anni di prova il sensore si è dimostrato in grado di seguire in modo continuo e tempestivo le variazioni dello stato idrico della pianta, fornendo un'informazione direttamente legata alla sua risposta fisiologica. Particolarmente significativo è il risultato del 2025, quando l'irrigazione guidata dal Bioristor ha consentito di ridurre del 41% i consumi idrici senza penalizzare l'accrescimento dei frutti.

Lo sviluppo di uno specifico indice di stress, validato nel 2026 in relazione agli apporti irrigui e alle precipitazioni, rappresenta un ulteriore passo verso l'impiego operativo di questa tecnologia. La prospettiva è quella di integrare il segnale del Bioristor nei sistemi di supporto alle decisioni e nelle centraline irrigue, trasformando la risposta della pianta in un'informazione utile per stabilire quando e quanto irrigare e favorendo così un uso più efficiente dell'acqua.