



Università degli Studi della Basilicata

Dottorato di Ricerca in

“Cities and Landscapes: Architecture, Archaeology, Cultural Heritage, History and Resources”

TITOLO DELLA TESI

**Resilienza e sostenibilità delle filiere frutticole per la
valorizzazione dei territori:**

Irrigazione di precisione in *Actinidia chinensis* var. *chinensis*

Settore Scientifico-Disciplinare

“AGRI-03/A”

Coordinatore del Dottorato

Prof.ssa Antonella Guida

Dottorando

Dott. Roberto Di Biase

Relatori

Dott.ssa Alba N. Mininni

Prof. Bartolomeo Dichio

Ciclo XXXVII

Abstract

In uno scenario di cambiamento climatico impattante sulle condizioni ambientali utili alla coltivazione dell'actinidia nel mondo, il ciclo dell'acqua risulta essere estremamente influenzato in diverse aree geografiche. L'area mediterranea è caratterizzata da un ambiente ad evapotraspirazione, intensità luminosa e temperature dell'aria molto alte, deficit di pressione di vapore relativamente elevato, precipitazioni scarse e non distribuite durante la stagione irrigua. Queste condizioni ambientali sono estreme per il genere Actinidia che è poco tollerante in modo particolare agli stress termici e idrici. La definizione del fabbisogno idrico della coltura e l'adozione di strategie di irrigazione di precisione è indispensabile per evitare situazioni di stress da eccesso o deficit idrico che possono influenzare negativamente la qualità e la quantità delle produzioni. Negli areali produttivi dell'Italia, la gestione irrigua viene eseguita in modo empirico applicando convenzionalmente volumi irrigui stagionali tra i 10000 - 12000 m³ ha⁻¹, determinando situazioni di eccesso idrico con conseguente asfissia radicale e declino fisiologico della pianta. Il sito sperimentale per lo sviluppo di questo lavoro di tesi è un frutteto commerciale di Actinidia chinensis var. chinensis a polpa gialla di 10 anni situato in agro di Bernalda (Matera, Italia) parcellizzato sulla base di tre diversi sistemi di irrigazione quali spruzzatore, doppia ala gocciolante e quattro ali gocciolanti. Una prima parte del lavoro di tesi ha riguardato lo sviluppo di una strategia di irrigazione di precisione basata su un metodo di bilancio idrico con un meccanismo di regolazione da feedback, utilizzando misure in continuo dell'umidità del suolo tramite sonde di umidità multilivello per monitorare in continuo il contenuto di acqua lungo il profilo del suolo 0-60 cm. La strategia di irrigazione proposta ha consentito di adattare il volume irriguo al fabbisogno idrico effettivo della pianta portando un risparmio medio del volume utilizzato del 36% rispetto al volume irriguo teorico calcolato dal bilancio idrico basato sulle linee guida FAO, garantendo condizioni di umidità del suolo ottimali per lo sviluppo delle radici, evitando l'instaurarsi di condizioni che predispongono a fenomeni degenerativi dell'apparato radicale. Dal metodo di bilancio idrico ottimizzato e, quindi, dai volumi irrigui aggiustati settimanalmente tramite le sonde di umidità, per quattro stagioni irrigue dal 2021 al 2024 sono stati determinati gli ET_c annui coretti per la stima di K_c utili all'actinidia a polpa gialla negli areali del Mediterraneo, con valori che variano da valori medi minimi pari a 0,13 ad un massimo di 0,88 nei mesi di Aprile e Agosto.

Irrigare una coltura con volumi determinati sulla base delle reali condizioni di umidità del suolo è sicuramente il primo passo per attuare un'irrigazione di precisione che deve considerare anche il metodo irriguo con cui il volume viene distribuito.

L'efficienza e l'accuratezza nel distribuire l'acqua nel volume di suolo effettivamente interessato dalle radici è un concetto che non può essere più trascurato nella scelta del sistema di irrigazione. Il metodo irriguo a quattro ali gocciolanti a funzione indipendente (4DL) è la proposta di un sistema innovativo che potrebbe garantire il corretto equilibrio tra acqua e riduzione dell'umidità del suolo tramite l'utilizzo turnato di diverse porzioni di radici durante gli interventi irrigui. Rispetto ad un sistema a due ali gocciolanti (2DL) il 4DL, a parità di volume irriguo medio di 6157 e 6351 m³ ha⁻¹, ha mantenuto una condizione idrica ottimale del suolo in prossimità delle radici. La possibilità di avere metodi irrigui che consentono una distribuzione spazio-dinamica dell'acqua garantisce un arieggiamento continuo nelle diverse porzioni del suolo e una continua crescita delle radici assorbenti. Tale gestione irrigua permette di ottimizzare le performance fisiologiche della

pianta mettendola nelle condizioni di massimizzare la produzione determinando valori produttivi anche di 335 e 314 q ha⁻¹ rispettivamente per le tesi 4DL e 2DL. L'utilizzo dell'impianto irriguo a quattro ali gocciolanti per irrigazione dell'actinidia associato sempre al monitoraggio in continuo dell'umidità del suolo può essere e un metodo funzionale per aumentare il numero di strategie irrigue perseguibili nelle diverse fasi fenologiche del ciclo vegetativo della coltura e, pertanto, raggiungere tutti gli obiettivi di un'irrigazione di precisione.

Il monitoraggio dell'umidità del suolo potrebbe non essere sufficiente ad una gestione irrigua di precisione poiché non considera la condizione fisiologica della pianta. Tra i sensori di monitoraggio della pianta, i microtensiometri, che misurano in continuo il potenziale idrico del tronco (Trunk Water Potential - TWP), indicativo dello stato idrico della pianta, possono contribuire efficacemente a rilevare precocemente lo stress idrico. Per questo motivo, l'ultima parte del lavoro di tesi è rappresentata dalla valutazione delle risposte del TWP al contenuto idrico del suolo (Soil Water Content - SWC) e ai cambiamenti del deficit di pressione di vapore ambientale (VPD), valutando la relazione con il potenziale idrico del fusto (Stem Water Potential - SWP) derivato dalla camera di pressione di Scholander, convalidando il TWP come indicatore dello stato idrico dell'actinidia.

Considerando anche la correlazione tra TWP e SWP e la sua pronta risposta al declino del SWC, sembra che il microtensiometro sia abbastanza sensibile ai fattori della pianta e ambientali, supportando il suo potenziale impiego nella gestione dell'irrigazione dell'actinidia.

In a scenario of climate change affecting the environmental conditions suitable for kiwifruit cultivation worldwide, the water cycle is strongly affected in different geographical areas. The Mediterranean region is characterised by an environment of high evapotranspiration, intense light and air temperatures, relatively high vapour pressure deficit, low rainfall and uneven distribution during the irrigation season. These environmental conditions are extreme for the Actinidia species, which is particularly intolerant of thermal and water stress. Defining the crop's water requirements and applying precision irrigation strategies are essential to avoid stress situations due to water excess or deficit, which can negatively affect both the quality and quantity of production.

In Italian production areas, irrigation management is carried out empirically, conventionally applying seasonal irrigation volumes between 10,000 and 12,000 m³ per hectare, leading to situations of water excess that cause root asphyxia and physiological decline of the plant. The experimental site for the development of this thesis is a commercial orchard of Actinidia chinensis var. chinensis with yellow flesh, 10 years old, located in the Bernalda area (Matera, Italy), subdivided on the basis of three different irrigation systems: sprinkler, double drip line and four drip lines.

The first part of the thesis focused on developing a precision irrigation strategy based on a water balance method with a feedback control mechanism, using continuous soil moisture measurements through multi-level moisture probes to monitor water content along the 0-60 cm soil profile. The proposed irrigation strategy allowed the adaptation of the irrigation volume to the actual water needs of the crop, resulting in an average saving of 36% of the volume used compared to the theoretical irrigation volume calculated from the water balance based on FAO guidelines, ensuring optimal soil moisture conditions for root development and preventing the onset of conditions predisposing to degenerative phenomena in the root system.

From the optimised water balance method and the adjusted irrigation volumes monitored weekly by moisture probes, annual ET_c values were determined for four irrigation seasons from 2021 to 2024. These values, corrected for the estimation of K_c useful for yellow-fleshed kiwifruit in Mediterranean areas, varied from a minimum average of 0.13 to a maximum of 0.88 in April and August.

Irrigating a crop with volumes determined on the basis of actual soil moisture conditions is definitely the first step towards implementing precision irrigation, which must also consider the irrigation method by which the volume is distributed to the crop. Efficiency and accuracy in the distribution of water within the volume of soil actually affected by the roots is a concept that can no longer be neglected when selecting the irrigation system.

From the optimised water balance method and the adjusted irrigation volumes monitored weekly by moisture probes, annual ET_c values were determined for four irrigation seasons from 2021 to 2024. These values, corrected for the estimation of K_c useful for yellow-fleshed kiwifruit in Mediterranean areas, varied from a minimum average of 0.13 to a maximum of 0.88 in April and August.

Irrigating a crop with volumes determined on the basis of actual soil moisture conditions is definitely the first step towards implementing precision irrigation, which must also consider the irrigation method by which the volume is distributed to the crop. Efficiency and accuracy in the distribution of water within the volume of soil actually affected by the roots is a concept that can no longer be neglected when selecting the irrigation system.

The four-drip-line independent function irrigation method (4DL) is a proposal for an innovative system that could ensure the correct balance between water and soil moisture reduction by alternating the use of different root areas during irrigation interventions. Compared to a two-drip line system (2DL), the 4DL system maintained optimal soil water conditions close to the roots with average irrigation volumes of 6157 and 6351 m³/ha, respectively. The ability to use irrigation methods that allow for spatially dynamic water distribution ensures continuous aeration in different parts of the soil and continuous growth of the absorbing roots. This irrigation management makes it possible to optimise the physiological performance of the plant, putting it in conditions to maximise production, achieving yield values of 335 and 314 ql/ha for the 4DL and 2DL treatments respectively.

The use of the four-drip line irrigation system for kiwifruit irrigation, combined with continuous soil moisture monitoring, can be a functional method to increase the number of irrigation strategies applicable at different phenological stages of the crop's vegetative cycle, thus achieving all the objectives of precision irrigation.

Soil moisture monitoring may not be sufficient for precision irrigation management, as it does not take into account the physiological state of the plant. Among crop monitoring sensors, microtensiometers, which continuously measure trunk water potential (TWP), an indicator of plant water status, can effectively contribute to early detection of water stress. For this reason, the last part of the thesis consists of evaluating TWP responses to soil water content (SWC) and changes in environmental vapour pressure deficit (VPD), assessing the relationship with stem water potential (SWP) derived from the Scholander pressure chamber, and validating TWP as an indicator of water status in kiwifruit.

Considering also the correlation between TWP and SWP and its rapid response to decreasing SWC, it appears that the microtensiometer is sensitive enough to both crop and environmental factors, supporting its potential use in kiwifruit irrigation management.

Sommario

INTRODUZIONE.....	8
La diffusione dell'actinidia nel mondo e le sfide legate al cambiamento climatico.	8
Caratteristiche morfo-fisiologiche della specie e risposta agli stress idrici	9
Tecnologie di supporto alla gestione irrigua: prospettive e limiti	10
L' <i>Actinidia chinensis</i> var. <i>chinensis</i> e le necessità della definizione dei K_c	13
CAPITOLO 1: Stima del fabbisogno idrico e gestione irrigua di precisione basata sul meccanismo di aggiustamento dei volumi (feedback) attraverso monitoraggio in continuo del suolo e della pianta.....	19
MATERIALI E METODI	19
1.1 Il sito Sperimentale.....	19
1.2 Tesi sperimentali	19
1.3 La condizione del suolo	21
1.4 Monitoraggio dei parametri meteorologici	25
1.5 L' impianto irriguo	25
1.6 Determinazione del volume di suolo interessato dal l'irrigazione	27
1.7 Fabbisogno idrico della coltura e bilancio idrico del suolo	28
1.8 Misura dell'indice di area fogliare	29
1.9 Monitoraggio dello stato idrico del suolo	30
1.10 Monitoraggio dello stato idrico della coltura.....	30
1.10.1 Monitoraggio del potenziale idrico dello stelo e del tronco.....	30
1.10.2 Monitoraggio del flusso traspirativo.....	30
1.11 Determinazione dei parametri alla raccolta	31
1.11.1 Produzione	31
1.11.2 Qualità dei frutti.....	31
1.12 Determinazione dei coefficienti colturali sperimentali (K_{c-exp}) per <i>A. chinensis</i> var. <i>chinensis</i> attraverso modello inverso dei dati ottenuti con irrigazione di precisione	31
1.13 Analisi statistica	32
RISULTATI e DISCUSSIONI	33
1.14 Monitoraggio dei parametri meteorologici	33
1.15 Aggiustamenti ai volumi irrigui del bilancio idrico	34
1.15.1 Stato idrico del suolo.....	34
1.15.2 Stato idrico della coltura.....	36
1.16 Effetti del frazionamento dei volumi irrigui.....	41

1.16.1 Frazionamento del volume irriguo in H-VPD	41
1.16.2 Frazionamento del volume irriguo in L-VPD	42
1.19 Determinazione dei K_c per <i>Actinidia chinensis</i> var. <i>chinensis</i> negli ambienti mediterranei.....	46
Conclusioni	47
Bibliografia	48
CAPITOLO 2: Gestione dinamica e distribuzione spaziale del volume irriguo per l'irrigazione di precisione in actinidia.....	59
INTRODUZIONE.....	59
Effetti dell'eccesso idrico in actinidia	59
Effetti dell'irrigazione sulla struttura dei suoli	60
Effetti della mancanza di ossigeno tellurico sull'apparato radicale	62
Ipotesi sperimentale e obiettivo del lavoro:	64
Materiale e Metodi	65
2.1 Il sito sperimentale	65
2.2 Impianto irriguo	65
2.3 Determinazione della curva di ritenzione idrica, delle caratteristiche idrogeologiche e del volume di suolo interessato dall'irrigazione e bilancio idrico del suolo	67
2.7 Determinazione della produzione e analisi dei parametri quali- quantitativi.....	72
2.8 Analisi statistica	72
Risultati e Discussioni	73
2.9 Volumi irrigui applicati	73
2.10 Le strategie irrigue applicate nella stagione 2021.....	73
2.10.1 L'umidità del suolo durante la strategia irrigua A.....	75
2.10.2 L'umidità del suolo durante la strategia irrigua B.....	77
2.10.3 Risposte fisiologiche della pianta alle strategie A e B	79
2.11 Valutazione preliminare dello sviluppo dell'apparato radicale nei contenitori di suolo 1-4.	84
2.12 Le strategie applicate nella stagione irrigua 2023.....	86
2.13.1 Analisi della qualità.....	90
Bibliografia	92
Capitolo 3 : Microtensiometer-based trunk water potential as a plant water status indicator in kiwifruit under different soil water availability	99
Abstract	99
Introduction	100

Materials and methods	102
Experimental site.....	102
Weather variables and soil moisture monitoring	105
Trunk and stem water potential.....	105
Leaf gas exchange parameters	106
Modeling trunk water potential and statistical analysis	107
Results.....	107
Environmental conditions.....	107
Diurnal and seasonal trunk water potential patterns	109
Soil-plant-environment interactions.....	113
Relationship between trunk and stem water potential.....	116
Discussion.....	118
Coupling trunk water potential, VPD and soil water content.....	118
TWP vs SWP relationship	119
Limitations	121
Conclusions and potential use of TWP for irrigation management.....	122
References	124
1. Tables	132
2. Figures	134

INTRODUZIONE

La diffusione dell'actinidia nel mondo e le sfide legate al cambiamento climatico.

La coltivazione commerciale dell'actinidia è concentrata in diverse regioni geografiche (Ferguson, 1984; Pinto and Vilela, 2018; Sharma et al., 2020; Gao et al., 2022; Hazarika et al., 2022), sia nell'emisfero settentrionale che meridionale (Mian et al., 2022), in cui i climi sono specifici dell'areale di riferimento e variabili nel corso degli anni a causa della vulnerabilità ai cambiamenti climatici. Attualmente, le coltivazioni più importanti sono segnalate in Cina, che è il produttore più importante a livello mondiale, seguita da Nuova Zelanda e Italia, che è il terzo produttore su scala mondiale e il primo a livello europeo, con un'elevata capacità produttiva e circa 24.000 ettari coltivati (FAOSTAT, 2022). Sebbene l'actinidia sia originaria del sud-est asiatico e coltivata in zone caratterizzate da elevata umidità, abbondanti precipitazioni, lunga stagione di crescita priva di gelate e moderata intensità luminosa (Ferguson et al., 1984), la sua rilevanza commerciale e l'interesse economico per questa coltura hanno portato alla sua diffusione in tutto il mondo, comprese le aree mediterranee, dove la domanda evapotraspirativa dell'ambiente è elevata (Montanaro et al., 2009). In Italia la coltivazione dell'actinidia copre l'intera lunghezza della penisola, con condizioni ambientali molto variabili da nord a sud (Testolin e Ferguson et al., 2009; Ferguson et al., 2023). La variabilità delle condizioni climatiche italiane descritte possono influenzare la durata dell'intera stagione produttiva tramite le gelate tardive o danni dovuti alle basse temperature invernali, le alte temperature a nord e a sud che si protraggono fino ad inizio inverno incidendo sul grado di soddisfazione del fabbisogno in freddo, la distribuzione delle precipitazioni e la quantità di radiazione solare, che pongono infatti sfide climatiche importanti per la coltivazione nei nostri areali (Testolin e Ferguson, 2009).

Sebbene l'*Actinidia* spp. includa più di 50 specie, la maggior parte delle quali con un potenziale commerciale (Strick e Cahn, 1998), il suo mercato si è concentrato per oltre 30 anni sulla coltivazione di una sola cultivar (cv. 'Hayward') appartenente alla varietà *A. chinensis* var. *deliciosa* e ha iniziato ad aumentare il numero di cultivar disponibili in commercio solo negli ultimi anni (Mian et al., 2022).

A. chinensis var. *chinensis* (actinidia a polpa gialla) e *A. chinensis* var. *deliciosa* (actinidia a polpa verde) sono attualmente le specie di actinidia più importanti coltivate, interessando quasi l'intero commercio internazionale di actinidia (Ferguson et al., 2013). A causa della loro separazione geografica (*A. chinensis* var. *chinensis* proveniente dalla Cina orientale e meridionale e *A. chinensis* var. *deliciosa* dalla Cina occidentale e dalle altitudini più elevate (Ferguson et al., 2013), *A. chinensis* var. *chinensis* non è molto resistente al freddo (Strick e Cahn, 1998) e mostra un fabbisogno di ore in freddo inferiore rispetto ad *A. chinensis* var. *deliciosa* (Wang et al., 2018), dimostrando l'adeguata distribuzione e promozione di questa cultivar in areali più caldi. Nel 2022, due terzi dei frutti di actinidia esportati dalla Nuova Zelanda erano a polpa gialla, acquistando importanza anche in Italia dove, nel 2020, le cultivar a polpa gialla costituivano rispettivamente il 15% delle piantagioni e il 25% della produzione nazionale (Ferguson et al., 2023). In uno scenario di cambiamento climatico, numerose azioni possono essere messe in pratica in un'ottica di adattamento e con l'obiettivo di espandere la coltivazione

dell'actinidia in diversi areali a livello globale. Da un lato, l'ottimizzazione delle pratiche colturali e lo sviluppo di tecnologie per una gestione sostenibile del frutteto, attraverso un approccio olistico alle risorse naturali (suolo, acqua, elementi nutritivi); dall'altro il miglioramento genetico per l'introduzione di cultivar a basso fabbisogno in freddo e portinnesti tolleranti a stress biotici e abiotici.

Caratteristiche morfo-fisiologiche della specie e risposta agli stress idrici

Nell'actinidia la necessità di una programmazione irrigua più accurata e di un'applicazione dei volumi più precisa risulta si basa sulla conoscenza delle modalità di assorbimento di acqua da parte delle radici, essenziale per evitare condizioni di stress temporanee o irreversibili. L'actinidia è estremamente vulnerabile allo stress idrico, che presenta valori critici di potenziale idrico fogliare (LWP) inferiori a - 15 bar (FAO book 66, 2012), quindi sensibile sia a condizioni di deficit che di ristagno idrico (Dichio et al. 2024 in sottomissione), condizioni che si verificano facilmente durante la stagione di crescita. Le alte temperature e la domanda di evaporazione ambientale da un lato, e l'eccesso di acqua e le basse concentrazioni di ossigeno nella zona delle radici dall'altro, sono responsabili di diverse condizioni di stress idrico, che però possono essere efficacemente limitate attraverso una gestione ottimizzata dell'irrigazione.

Considerata la sensibilità dell'actinidia agli stress idrici, è importante considerare la forma e il funzionamento del sistema radicale di questa coltura, con l'obiettivo di una maggiore efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (Xiloyannis et al., 1993; Clothier e Green, 1994). Studi precedenti hanno rivelato un'attività preferenziale delle radici superficiali, con tassi massimi di assorbimento vicino alla superficie del suolo e ridotti in profondità (Green e Clothier, 1995), supportando l'efficacia dell'irrigazione ad alta frequenza nell'actinidia (Clothier e Green, 1994). Il modello di assorbimento da parte delle radici cambia in base alla maggiore o minore disponibilità di acqua quindi, è chiaro che le piante di actinidia modificano rapidamente le dinamiche di assorbimento radicale in risposta a livelli distinti di acqua disponibile nella zona delle radici (Green e Clothier, 1995). Le misurazioni del contenuto idrico del suolo sono quindi efficaci nel fornire informazioni sulla velocità con cui l'acqua viene assorbita o persa dalla zona delle radici (Al-Yahyai, 2012) e come i valori di acqua disponibile (AD) si modificano nel corso delle diverse fasi fenologiche.

Sebbene l'actinidia sia attualmente coltivata con successo nei paesi del Mediterraneo, come Italia e Grecia, le condizioni atmosferiche durante l'estate raggiungono solitamente valori critici che, in combinazione con un apporto idrico inadeguato (Chartzoulakis et al., 1993), possono portare alla formazione, anche temporanea durante il giorno, di un deficit idrico della pianta. È stato segnalato che lo stato idrico del suolo influisce sulla crescita della pianta così come sulla conduttanza stomatica, sulla traspirazione e sull'attività fotosintetica (Chartzoulakis et al., 1993; Gucci et al., 1996). Diversi studi hanno indagato il comportamento dell'actinidia in condizioni di carenza idrica evidenziando una riduzione sia del tasso di traspirazione, che del flusso d'acqua nel tronco che della conduttanza stomatica entro pochi giorni dalla comparsa dello stress, con risultati più gravi nelle piante in vaso rispetto a quelle coltivate in pieno campo, dove lo stress tende a svilupparsi più gradualmente (Chartzoulakis et al., 1993; Gucci et al., 1996). Tuttavia, parliamo di una coltura con elevata conduttività idraulica del fusto, che influisce positivamente sul recupero relativamente rapido dei parametri di scambio gassoso dopo la re-irrigazione (Gucci et al., 1997). Montanaro e collaboratori (2007) hanno studiato la risposta dell'apparato

fotosintetico del actinidia e la capacità di acclimatazione ai molteplici stress estivi concomitanti, imposti dagli ambienti mediterranei, combinati con lo stress da siccità, dimostrando che il actinidia riduce la conduttanza stomatica migliorando i quenching non fotochimici, riducendo l'acquisizione di carbonio per la conservazione dell'acqua. Inoltre, il rapido recupero dell'apparato fotosintetico e dei parametri di scambio gassoso spiegano la sua capacità di reversibilità ai processi morfologici e fisiologici indotti dalla siccità, confermando che l'actinidia è in grado di affrontare condizioni di carenza idrica temporanea. Studi precedenti hanno dimostrato che l' actinidia è estremamente vulnerabile al ristagno e alle basse concentrazioni di ossigeno nella zona radicale, che esercitano effetti dannosi sia sui parametri di crescita che sugli scambi gassosi (Savé e Serrano, 1986; Smith et al., 1990). Le caratteristiche dei portinnesti hanno grande rilevanza nel determinare la risposta della piante a condizioni di eccesso idrico. Diversi studi

hanno valutato le risposte fisiologiche di diversi genotipi di actinidia allo stress da ristagno idrico, anche con l'obiettivo di identificare genotipi tolleranti e descrivere i meccanismi di tolleranza al ristagno idrico (Li et al., 2021). *A. chinensis* var. *deliciosa* (cv. 'Hayward') è stata segnalata come un portinnesto sensibile allo stress da ristagno idrico, a cui risponde con una rapida diminuzione della conduttanza stomatica, della traspirazione e dei tassi fotosintetici netti con gravi compromissioni di foglie e radici (Li et al., 2021). *A. macrosperma* e *A. valvata* hanno mostrato un declino più graduale negli scambi gassosi fogliari e nell'attività fotosintetica in condizioni di stress da ristagno idrico (Beppu et al., 2022; Li et al., 2021) e, quindi, una maggiore tolleranza, che può coinvolgere adattamenti sia metabolici che morfologici delle radici (Li et al., 2021), suggerendo la loro capacità di gestire l'instaurarsi di condizioni temporanee di ristagno idrico.

Tecnologie di supporto alla gestione irrigua: prospettive e limiti

La scarsità della risorsa idrica è tra le sfide principali da affrontare a livello globale nel prossimo futuro. Per il settore agricolo, l'irrigazione è fondamentale per massimizzare le rese. Un uso sostenibile dell'acqua in agricoltura racchiude l'insieme delle tecniche volte a garantire la produttività dell'agro-ecosistema e le sue funzioni ecologiche, economiche e sociali. È opportuno ribadire che l'irrigazione di precisione utile alla sostenibilità si può raggiungere solo integrando le conoscenze di ecofisiologia del frutteto con le innovazioni tecnologiche (es. "Information Communication Technology" - ICT e "Internet of Things" - IoT), che rendono possibile il monitoraggio costante dei parametri del sistema suolo-pianta-atmosfera con tecnologie di telerilevamento e sensori di prossimità del suolo e della pianta.

Nel caso l' actinidia i suoi tratti anatomici, tra cui grandi dimensioni delle foglie, elevato tasso di traspirazione e bassa resistenza al flusso d'acqua, caratterizzano questa specie come una pianta altamente esigente e consumatrice di acqua (Chartzoulakis et al., 1993). Per queste ragioni, la definizione e l'adozione di strategie di irrigazione innovative volte a ottimizzare l'uso della risorsa idrica e a limitare le perdite e, allo stesso tempo, a soddisfare i fabbisogni idrici della pianta sono essenziali. Gli elevati volumi di irrigazione stagionali fino a 10-12.000 m³ ha⁻¹, (Holzapfel et al., 2000) sono ancora applicati in modo convenzionale nei frutteti di actinidia diffusi negli areali del mediterraneo, tuttavia una gestione di precisione dell'irrigazione, basata sull'aggiustamento dei volumi attraverso il monitoraggio dell'umidità del suolo, ha dimostrato

che i volumi di irrigazione potrebbero essere sostanzialmente ridotti per il actinidia (Mininni et al., 2021), ottenendo importanti risparmi idrici (ca. 30%).

Per rendere sempre più efficiente l'irrigazione dell'actinidia sarà necessario conoscere:

1. la quantità di acqua da apportare per soddisfare il fabbisogno irriguo della coltura, al fine di garantire la qualità e quantità delle produzioni (massimo profitto), riducendo al minimo la quantità di acqua non produttiva (acqua persa per evaporazione, percolazione e ruscellamento);
2. le fasi fenologiche nelle quali più di tutte una carenza idrica assume un peso maggiore nell'alterazione delle performance fisiologiche della pianta;
3. avere a disposizione strumenti flessibili per il supporto alla decisione irrigua (DSS), che permettano di adeguare i parametri sito-specifici e, quindi, di modificare la programmazione irrigua.

Il punto 1. pone il quesito fondamentale per una gestione irrigua ottimale, ovvero determinare il fabbisogno idrico reale della pianta e quindi il volume irriguo da somministrare. Il metodo che i ricercatori e tecnici hanno ritenuto più affidabile per stimare il volume irriguo da restituire all'agro ecosistema è rappresentato dal bilancio idrico del suolo, che consiste nel contabilizzare tutte le uscite di acqua (evapotraspirazione, percolazione, ruscellamento) e le entrate (pioggia utile, apporti da falde e irrigazioni). A livello di ricerca ci sono molti lavori (Rajput et al., 2024; Aghelpour et al., 2022; Hu Z. et al., 2022; Y. Li et al., 2010) finalizzati al perfezionamento dei metodi per stimare e/o misurare le diverse componenti del bilancio idrico e in modo particolare, l'evapotraspirazione di riferimento (ET_0), i coefficienti culturali (K_c), la pioggia utile (P_u) e altri parametri specifici del sito e della coltura. Tutte queste informazioni sono molto utili per perfezionare e automatizzare le procedure di calcolo del fabbisogno idrico delle colture e per addivenire al consiglio irriguo (turni e volumi di adacquamento). Ad oggi sono disponibili diversi modelli di DSS che utilizzano il bilancio idrologico su base fisica, accoppiati a modelli idraulici per stimare il movimento dell'acqua nel suolo e a modelli di crescita delle colture e rese produttive, per valutare la risposta alla disponibilità idrica (Irrisat, Irriweb, SIRR-Mod, ecc.). Questi modelli sono molto utili quando applicati a livello di areali vasti (es. distretti irrigui) per stimare il totale dei fabbisogni irrigui delle colture e per orientare il governo dell'acqua a livello consortile. Quando, invece, questi strumenti vengono applicati su scala aziendale per la gestione irrigua, presentano molti limiti legati alla limitata accuratezza nella misura delle variabili sito-specifiche e all'assenza di un adeguato livello di automatismo nell'apprendimento ("machine learning"), basato sulla verifica in situ dell'effetto del volume irriguo ipotizzato e al successivo affinamento del modello. Alcuni modelli come, per esempio, Aquacrop proposto dalla FAO, restituiscono informazioni molto utili per la gestione irrigua e risposte produttive per le colture annuali erbacee, mentre, come dichiarato da molti autori, (Karim et al., 2017; Ahansal et al., 2022; Turner et al., 2004; Ferreira et al., 2017; Fernández et al., 2017) presentano diversi limiti di applicazione per le colture arboree. Inoltre, a livello nazionale non è presente una copertura 4G idonea all'applicabilità di DSS o tecnologie IoT, e si stima che solo l'11 % dei frutteti in Italia abbia una buona copertura di rete (Sozzi et al., 2024).

Un errore spesso presente nei DSS è quello di computare il bilancio idrico sull'intera superficie del frutteto, a prescindere dalla reale superficie di suolo bagnata dal sistema irriguo. Tale approccio va bene per gli impianti ad aspersione che bagnano tutta la superficie e per le colture orticole, per le quali le distanze d'impianto sono strette. In frutticoltura, invece, con distanze tra i filari mediamente di 5 m e con sistemi irrigui localizzati, questo rappresenta un errore metodologico rilevante.

Questi sistemi di supporto, quindi, lavorano molto bene sulle colture ortive ma trovano limitazioni nell'impiego su quelle arboree infatti a differenza dalle ortive i sistemi arborei:

1. Hanno un ciclo produttivo dove l'esito della produzione annua è influenzata anche dalla gestione irrigua dell'anno precedente;
2. un'elevata variabilità di comportamento (vigoria, sviluppo di area fogliare e diversa risposta alle disponibilità idriche) tra le specie e tra diverse cultivar all'interno della stessa specie che complica la gestione non potendo standardizzare;
3. un'elevata variabilità nel rapporto tra volume di suolo interessato dall'irrigazione e il volume di suolo esplorato dalle radici. Questo dipende principalmente dalle caratteristiche dell'apparato radicale della specie - portinnesto e dal sistema irriguo utilizzato.

Considerate le difficoltà riscontrate nelle colture arboree, insieme all'ampiezza degli areali di coltivazione e su come questi incidono sulla determinazione delle variabili climatiche è possibile identificare gli errori più comuni commessi da un DSS che provengono:

1. dalla stima dell' ET_0 dovuta alla non precisa misura dei parametri ambientali o all'inadeguatezza delle equazioni utilizzate per la sua stima;
2. dalle diverse condizioni climatiche del frutteto rispetto alla stazione meteorologica dalla quale viene fornito il dato di ET_0 ;
3. dall'utilizzo di coefficienti colturali (K_c) per la stima dei volumi irrigui i cui valori che non tengono conto delle caratteristiche specifiche della coltura (altezza delle piante, LAI, copertura del suolo da parte della chioma, cultivar con epoche di raccolta molto differenti, forma di allevamento, carica dei frutti, ecc.) e dell'enorme diversità delle caratteristiche ambientali dei siti di coltivazione;
4. dalla non corretta stima della pioggia utile (P_u) caduta realmente nel frutteto: possibili divergenze nei valori rispetto alla stazione meteorologica e la non corretta stima della quantità di pioggia che viene intercettata dalla porzione di suolo non interessato dalle radici;
5. dalla non corretta stima del volume di suolo esplorato dalle radici e interessato dall'irrigazione e delle caratteristiche idrologiche (acqua disponibile - AD e acqua facilmente disponibile - AFD);

Riguardo a quest'ultimo punto quando il volume di suolo considerato per il bilancio idrico e per le restituzioni di acqua di irrigazione è sovrastimato rispetto a quello reale ne consegue una sovrastima dei volumi irrigui per ogni intervento irriguo. Apporti di acqua maggiori della capacità di trattenimento da parte del volume di suolo bagnato dall'irrigazione, determinano una perdita di quantitativi importanti di acqua per percolazione in strati profondi e, quindi, non utilizzati dalla pianta.

A conclusione di questa disamina è auspicabile riferire che in frutticoltura, i programmi di supporto alla decisione irrigua DSS, basati su bilanci idrici artificiali trovano ancora scarsa applicazione, in quanto le informazioni derivanti presentano un elevato grado di incertezza legato proprio ad errori inevitabili nella stima delle diverse componenti, specialmente per la scarsa disponibilità di dati climatici (Arnell et al. 1999; Uhlenbrook et al., 1999; Mroczkowski et al., 1997; Hooper et al., 1988; Schaake, J. C. et al. 1996; Ferreira et al., 2017; Fernández et al., 2017)

***L'Actinidia chinensis* var. *chinensis* e le necessità della definizione dei K_c**

Il fabbisogno idrico della coltura dipende dall' ET_0 e dalle caratteristiche della specie (cultivar, portinnesto, numero di frutti, LAI). Le linee guida per il calcolo del fabbisogno idrico delle colture risiedono nel metodo FAO 56 (Allen et al., 1998), che utilizza il semplice approccio di determinare l'evapotraspirazione delle colture (ET_c) come il prodotto di un coefficiente di coltura (K_c) e l'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) che si riferisce ad un prato di festuca con una gestione ottimale e standardizzata, calcolata con l'equazione di Penman-Monteith (PM- ET_0) della FAO:

$$- \quad ET_c = ET_0 \times K_c$$

L'equazione PM- ET_0 viene spesso utilizzata per il calcolo diretto dell' ET_0 delle colture che nel metodo FAO 56 ha adottato il concetto di condizioni standard e ottimali delle colture come base per la tabulazione dei valori di K_c . Pertanto, K_c ed ET_c in FAO 56 si riferiscono ai potenziali tassi di evapotraspirazione delle colture in condizioni di produzione ottimali e ben irrigate. I valori di K_c per la maggior parte delle colture agricole durante la stagione produttiva aumentano da un valore minimo in corrispondenza della ripresa vegetativa fino ad un K_c massimo, quando la coltura raggiunge circa la copertura totale della chioma. La recessione è netta dopo il raggiungimento di una copertura completa nella stagione del raccolto. L'entità della declinazione invece dipende principalmente dalle particolari caratteristiche di crescita delle colture (Jensen et al., 1990) e dalla gestione dell'irrigazione durante la stagione tardiva (Allen et al., 1998). L'indice di copertura fogliare (LAI) quindi, è una variabile essenziale che incide nei valori stagionali di K_c per le diverse fasi fenologiche perché è espressione della quantità di luce intercettata dalla chioma (m^2 di foglia per m^2 di area di suolo) (Green et al., 2003) e modifica il tasso di traspirazione (ET_c) e l'intercettazione delle precipitazioni (Alton 2016; Asner et al., 1998; Boussetta et al., 2013; Jarlan et al., 2008).

Quindi spesso i valori tabulati per condizioni ottimali di un frutteto differiscono dal campo e dalla pratica comune in cui lo stato della coltura spesso non risulta essere in tali condizioni, a causa di irrigazione insufficiente o non uniforme, bassa densità colturale, gestione agronomica e

del suolo meno adeguata e/o salinità. I valori di K_c tabulati in FAO si riferiscono inoltre a condizioni climatiche standard e devono essere adattati al clima locale (eq. 62 e 65 della FAO 56) (Pereira et al. 2020) ma soprattutto allo stato attuale della coltura in campo.

Nel caso dell'actinidia a polpa gialla, a seguito della mancanza di informazioni sulle piante, per la stima dell'evapotraspirazione di queste cultivar vengono comunemente utilizzati i valori di K_c specifici per l'*Actinidia chinensis* var. *deliciosa* 'Hayward' irrigata con 10.000 - 12.000 m³ ha⁻¹ (Holzapfel et al., 2000) utilizzando impianti ad aspersione che bagnano tutta la superficie di suolo. I K_c riportati nel quaderno FAO 66 (Xiloyannis et al. 2012) variano da 0,5 (aprile, fase iniziale di crescita) a 1,1 (luglio, fase di crescita rapida nell'emisfero settentrionale) nel corso della stagione di crescita e si riferiscono all'*Actinidia chinensis* var. *deliciosa* 'Hayward' irrigata con circa 10.000 m³ con sistemi irrigui ad aspersione che bagnano tutta la superficie. Al fine dell'ottimizzazione dell'uso della risorsa idrica, e per facilitare le operazioni di gestione dei frutteti, si è passati ad impianti irrigui localizzati (spruzzatori e linee gocciolanti), che bagnano generalmente una porzione di suolo variabile dal 30 al 50%. La distribuzione localizzata dell'acqua irrigua permette una riduzione delle perdite di evaporazione e una migliore gestione della risorsa idrica. Tale condizione richiede certamente una rideterminazione dei coefficienti colturali K_c , in particolare quando l'evapotraspirazione colturale ET_c viene calcolata con il metodo del singolo coefficiente colturale FAO 56 piuttosto che con metodo che prevede la differenziazione tra evaporazione dal suolo (K_e) e la traspirazione della pianta (K_{cb}) "dual crop coefficient approach" $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0$. Questo metodo permette di avere stime più precise del fabbisogno idrico del sistema arboreo ed è più utilizzato nei sistemi di supporto alle decisioni basati su modelli matematici.

Ai fini irrigui il metodo a singolo coefficiente colturale è di più semplice applicazione, ma richiede un adeguamento dei K_c alle condizioni del sito (sviluppo area fogliare, vigoria, fasi fenologiche della coltura, impianto irriguo, superficie bagnata dall'irrigazione, superficie di suolo ombreggiata dalla proiezione della chioma ecc). Sulla base di quanto riportato finora, si evidenzia la difficoltà di calcolare un K_c accurato e sito specifico. Pertanto, l'utilizzo solo del bilancio idrico non è rappresentativo delle reali esigenze idriche della coltura e la sua applicazione senza un processo di monitoraggio dello stato idrico della pianta e del contenuto idrico del suolo potrebbe portare a situazioni di carenza o eccesso idrico.

Il metodo della FAO 56 (Allen et al., 1998) è quindi un metodo indiretto per stimare la richiesta idrica della coltura mediante i tassi di ET_c ma vi sono anche metodi diretti per farlo come ad esempio quello di utilizzare i lisimetri di pesatura per misurare direttamente ET_0 ed ET_c rilevando le variazioni di peso dell'unità suolo/coltura (Howell et al., 1995a,b; Schneider et al., 1998; Marek et al., 2006), oppure quello di combinare insieme l'utilizzo di sensori di flusso linfatico (Sap Flow) e sistemi eddy covariance su *Vitis vinifera* (Poblete-Echeverría e Ortega-Farias, 2017) al fine di modellare i K_c rispetto a coltura ed areale di riferimento. Considerando quindi che secondo Allen et al., 1998 $K_c = ET_c / ET_0$ la possibilità di arrivare a definire un valore di ET_c sito - specifici e coltura - specifici rappresenta uno dei punti fondamentali per determinare un allineamento di valori dei K_c .

Sensori per il monitoraggio in continuo dello stato idrico del suolo e della pianta

Il previsto peggioramento dello scenario dei cambiamenti climatici trattato in precedenza impone una gestione corretta e sempre più precisa della risorsa idrica nella coltivazione di fruttiferi, adattando i volumi di irrigazione alle esigenze fisiologiche delle piante e alle condizioni idriche ambientali e del suolo. L'irrigazione di precisione, oltre a scegliere in maniera mirata sistemi e strategie di irrigazione, supporta l'uso di metodi e tecnologie innovative sviluppate per aumentare la produttività idrica delle colture (Fernández, 2017). Oltre ai sensori che monitorano i parametri ambientali del frutteto (temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione, vento, ecc.) che rappresentano ormai una tecnologia affermata nella gestione irrigua di un frutteto si rendono necessari anche sensori che monitorano in continuo lo stato idrico del suolo e delle piante a fine di rendere possibile l'implementazione di strategie di irrigazione sempre più precise.

Per monitorare in continuo la condizione reale dell'umidità dei suoli le aziende fornitrici di tecnologie in agricoltura offrono numerosi sensori che lavorano con diverse tecnologie in grado di stimare il livello di umidità di acqua nei micropori del terreno.

Le sonde per la misura dell'umidità del suolo si differenziano a seconda della tecnologia e, in particolare, del principio fisico che utilizzano per misurarla. Quelle che ad oggi trovano più applicazioni nel settore sono:

1. **Sonde TDR (*time domain reflectometry*)** che sfruttano il principio della riflettometria nel dominio del tempo, una tecnica tradizionalmente utilizzata per determinare la posizione spaziale delle faglie in cavo, successivamente adattata per stimare il contenuto idrico del suolo (Hoekstra e Delaney, 1974; Topp et al., 1980) e la conducibilità elettrica massiva del suolo contemporaneamente (Dalton et al., 1984);

2. **Sonde FDR (*frequency domain reflectometry*)** che utilizzano la capacità o l'impedenza elettrica per misurare l'umidità del suolo (Alpana Shukla, 2014); si basano sul principio della permittività elettrica ed impedenza, ovvero la capacità di un corpo di lasciarsi attraversare da un impulso elettrico;

3. **Sonde a matrice granulare (GMS)** sono utilizzate per stimare il potenziale matriciale del suolo misurando la resistenza elettrica del suolo, convertita in letture calibrate della tensione idrica del suolo (Cardenas-Lailhacar et al., 2010);

Con la moderna irrigazione le sonde di umidità del suolo sono i mezzi più importanti per monitorare le condizioni idriche del suolo in un frutteto e per l'integrazione in sistemi di *Decision support system* (DSS) in grado di gestire un sistema di irrigazione automatizzato basato su un continuo feedback dello stato idrico del suolo e capace di processi di autoapprendimento al fine di garantire il mantenimento di contenuto idrico del suolo ottimale a livello della zona radicale, favorendo la fisiologia, la crescita e la qualità delle piante (Dukes, 2005).

Le tecniche per rilevare le risposte alla siccità delle piante hanno dimostrato che un potenziale problema con gli approcci tradizionali basati sul monitoraggio dell'umidità del suolo è che molte

caratteristiche fisiologiche delle piante rispondono direttamente ai cambiamenti dello stato dell'acqua nei tessuti vegetali, piuttosto che ai cambiamenti nel contenuto di acqua del suolo (McCutchan e Shackel 1992; Jones 2004). La decisione di programmare le irrigazioni basandosi sullo stato di umidità del suolo rappresenta il primo passo per un'irrigazione di precisione ma risulta meno appropriata quando, ad esempio, un certo livello di deficit idrico delle piante è considerato favorevole nel tentativo di controllare il flusso di carboidrati verso strutture riproduttive come i frutti (Chalmers et al. 1981; Fereres ed Evans 2006; Naor 2006). Di conseguenza, è stato suggerito che una maggiore precisione nell'applicazione dell'irrigazione può essere ottenuta utilizzando misurazioni basate sulle piante (Jones 1990; Jones 2004), che rientrano in un approccio gestionale chiamato "pianta parlante" (Udink ten Cate 1978), ovvero l'uso della pianta stessa come indicatore dei requisiti di irrigazione. Questo implica una misura rigorosa e sensibile dello stato idrico della pianta.

Vari ricercatori hanno proposto l'uso del potenziale idrico dello stelo (SWP) come un indicatore robusto e diretto dello stato idrico della pianta, che può essere utile nella programmazione dell'irrigazione (Begg e Turner 1970; Garnier e Berger 1985; McCutchan e Shackel 1992; Naor et al. 1995, 1997; Shackel et al. 1997; Goldhamer 2003; Naor e Cohen 2003; Intrigliolo e Castel 2004; Doltra et al. 2007). Tuttavia, l'uso del classico metodo della camera a pressione (Begg e Turner 1970; McCutchan e Shackel 1992) per determinare il SWP adatto per la programmazione o il controllo automatico dell'irrigazione, trova molte limitazioni a causa della sua natura distruttiva e alla manualità dell'operatore. Sebbene sia possibile utilizzare igrometri automatici per fusti (Dixon e Tyree 1984), questi strumenti sono notoriamente inaffidabili nella pratica (Naor e Cohen 2003; Jones 2004; Doltra et al. 2007), fornendo dati validi solo in mani esperte (Jones 2007).

La nuova frontiera dei monitoraggi dello stato idrico della pianta così come di altri suoi parametri fisiologici è rappresentata da sensori quali:

1. **Sensori sap flow** che tramite il calore pulsato misurano il flusso di linfa a livello del tronco con un'interruzione minima del flusso di linfa (Swanson e Whitfield 1981; Cohen et al., 1981). Le misure sono affidabili, utilizzano una tecnologia poco costosa, forniscono una buona risoluzione temporale del flusso di linfa e sono adatte alla raccolta e all'archiviazione automatica dei dati. Sono possibili misurazioni sequenziali o simultanee su numerosi alberi (Green and Clothier et al., 1988);

2. **Microtensiometri** per il monitoraggio continuo dello stato dell'acqua. Misurano il potenziale idrico in base a un sensore di pressione micro elettromeccanico che può effettuare misurazioni in situ (Pagay et al., 2014). Un metodo promettente per la determinazione del potenziale idrico del tronco, in quanto può essere automatizzato fornendo dati continui in unità di pressione facili da interpretare come il tradizionale metodo del potenziale idrico dello stelo della camera a pressione (Blanco e Kalcsits et al., 2021);

3. **Sonde a pressione di turgore (Zim Probe)**, costituite da un microcapillare che viene introdotto nelle cellule vegetali, da una camera di pressione contenente il trasduttore di pressione e da un'asta metallica azionata a motore che può essere utilizzata per modificare il volume della camera di pressione. L'intero dispositivo è riempito con olio siliconico. Quando il

microcapillare viene introdotto nella cella, la pressione di turgore viene trasmessa dall'olio silconico al trasduttore di pressione (Husken, et. al., 1978);

4. **Sensori Treetoscope**, sono sensori di flusso di linfa che forniscono informazioni sull'irrigazione e recuperano tramite algoritmi la gestione del livello di stress del suolo (Jamal et al. 2024). Sono sensori già diffusi nel comparto agricolo- produttivo ma tutt'oggi non sono utilizzati per scopi scientifici.

Obiettivi del lavoro:

La disamina svolta sulle necessità e scenari che oggi interessano l'*Actinidia chinensis* nel mondo determina gli obiettivi del lavoro di tesi:

1. **Stima del fabbisogno idrico e gestione irrigua di precisione basata sul meccanismo di aggiustamento dei volumi attraverso monitoraggio in continuo del suolo e della pianta**
 - 1.1 definizione e validazione della strategia di aggiustamento dei volumi irrigui in base al monitoraggio in continuo del contenuto idrico del suolo;
 - 1.2 Valutare la strategia del frazionamento del volume irriguo giornaliero e come questa incide sullo stato idrico della pianta e sul comportamento fisiologico in condizioni ambientali estreme;
 - 1.3 Determinare il fabbisogno idrico e i coefficienti colturali dell' *Actinidia chinensis* var. *chinensis*.
2. **Definizione di strategie di Gestione dinamica e distribuzione spaziale del volume irriguo per l'irrigazione di precisione in actinidia**
 - 2.1 Valutare la capacità di assorbimento differenziata della pianta in relazione alla distribuzione dell'umidità nel comparti di suolo;
 - 2.2 Valutare la capacità di mantenere lo stato idrico e flussi traspirativi ottimali quando viene distribuito il volume irriguo giornaliero in comparti di suolo distanti dal fusto;
 - 2.3 effetto dell'allargamento del volume di suolo bagnato dall'irrigazione sull'espansione dell'apparato radicale nei comparti di suolo più lontani dalla pianta .
3. **Valutazione del Potenziale idrico del tronco, rilevato in continuo attraverso il microtensimetro, come indicatore dello stato idrico delle piante di actinidia in diverse condizioni disponibilità di acqua nel suolo**
 - 3.1 Valutare la risposta del microtensimetro al contenuto idrico del suolo e al VPD dell'ambiente
 - 3.2 Esaminare le correlazioni tra TWP e SWP

3.3 Valutare l'idoneità del microtensiometro ai fini della suo possibile uso per l'irrigazione di precisione dell'actinidia in ambienti mediterranei, definendo potenzialità e limitazioni.

CAPITOLO 1: Stima del fabbisogno idrico e gestione irrigua di precisione basata sul meccanismo di aggiustamento dei volumi (feedback) attraverso monitoraggio in continuo del suolo e della pianta

Obiettivo del lavoro

Per rendere più efficiente l'irrigazione e affrontare i problemi sopra descritti, è necessario conoscere e studiare tutte quelle variabili che gravano sui fattori del bilancio idrico. La sola conoscenza degli effetti delle variabili ambientali e delle condizioni dei suoli sulla fisiologia della pianta non basta per definire il reale fabbisogno idrico di questa, ma bisogna ampliare le conoscenze sulle loro dinamiche di influenza. In questo modo sarà possibile determinare non solo i volumi irrigui necessari alla coltura ma anche definire le modifiche da apportare sulla base delle variazioni della richiesta idrica della pianta in tutte le sue fasi del ciclo produttivo. Gli obiettivi di questo studio sono stati: 1) utilizzare il monitoraggio in continuo del contenuto idrico del suolo e dello stato idrico della pianta al fine di apportare delle correzioni al volume irriguo; 2) valutare l'effetto del frazionamento del volume giornaliero sulla risposta fisiologica della pianta; 3) determinare fabbisogno idrico e i coefficienti colturali dell' *Actinidia chinensis* var. *chinensis*.

MATERIALI E METODI

1.1 Il sito Sperimentale

Il sito sperimentale è un frutteto commerciale di piante di actinidia di 10 anni, situato a Bernalda, Metaponto (Sud Italia, 40°24'N 16°46'E). L'area, di circa 0,7 ettari, è coltivata con la cultivar 'Zesy 002' (*A. chinensis* var. *chinensis*), innestata su portainnesto D1, con una densità di impianto di 5 × 2 m per 1000 piante/ha. La sperimentazione è stata condotta dal 2021 al 2024. Nei primi 3 anni sono stati condotti studi finalizzati alla definizione della strategia irrigua di precisione, mentre nel 2024 è stato applicato il metodo di gestione per validare e valutare la fattibilità tecnica.

1.2 Tesi sperimentali

Il disegno sperimentale è stato impostato individuando nel campo una parcella sperimentale suddivisa in tre filari per un numero totale di 42 piante, 14 per singolo filare a loro volta suddivise in egual numero in due tesi irrigue gestite con sistema irriguo a microirrigatori (Fig. 1.1).

Tutte le piante presentano cordoni di allevamento di pari lunghezza dotati di un equilibrato numero di inserzioni brancali, con produzione storica omogenea e presentanti caratteri asintomatici per malattie e fisiopatie. Le due tesi, seppur irrigate con analogo metodo e volume irriguo, sono state differenziate per la strategia e, di conseguenza, per la programmazione irrigua definendo così una:

1. gestione convenzionale (C) dove l'intero volume giornaliero viene somministrato alle piante in un unico intervento irriguo;
2. una gestione innovativa (I) dove il volume giornaliero viene somministrato in più interventi irrigui giornalieri variabili;

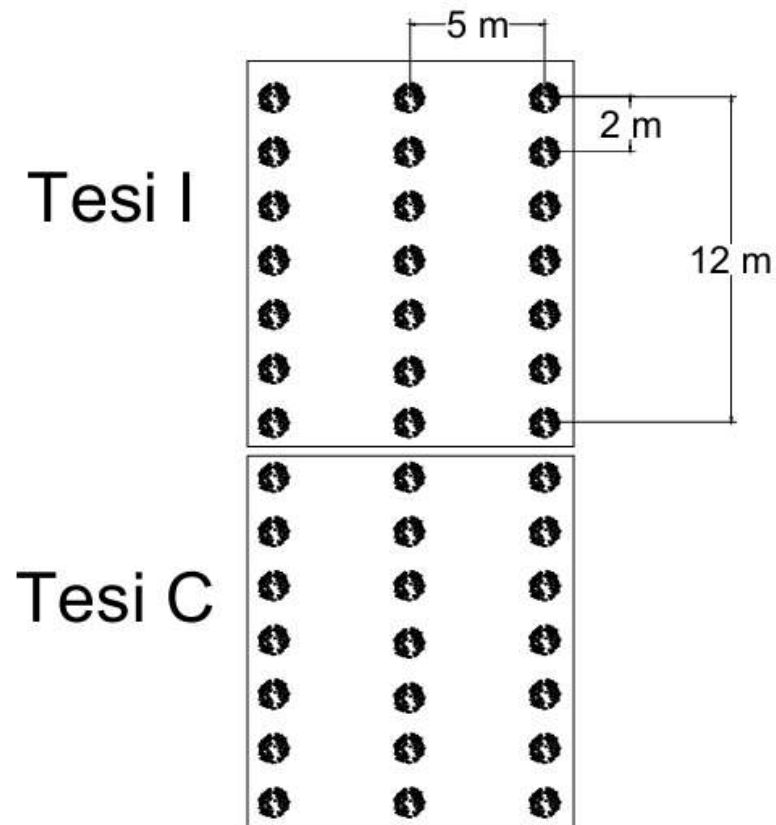


Fig. 1.1 Disegno sperimentale e disposizione delle tesi nel campo.

In tabella 1 è mostrato un esempio di un giorno di programmazione irrigua seguita dai due trattamenti irrigui C e I.

Tab. 1 esempio di programmazione irrigua nelle tesi C e I.

Data	Microsprinkler (I)			Microsprinkler (C)		
	durata intervento irriguo		Volume	durata intervento irriguo		Volume
	inizio (ore)	fine (ore)	(m ³ ha ⁻¹)	inizio (ore)	fine (ore)	(m ³ ha ⁻¹)
08/07/2023	07:00	07:30	15			
	12:00	12:30	15	07:30	09:00	45
	15:00	15:30	15			

1.3 La condizione del suolo

Nel 2021 primo anno di sperimentazione sono state eseguite le analisi del suolo per la valutazione delle caratteristiche chimico-fisiche e per la capacità di scambio cationico (C.S.C). Lo strato di 0-30 cm componente il franco di coltivazione interessato dalle radici presenta una tessitura franco argillosa-sabbiosa con sensibile presenza di scheletro, le sue caratteristiche idropedologiche deducibili dalla tessitura (permeabilità moderata e buona capacità di ritenzione idrica) risultano influenzate dallo scheletro stesso. Caratterizzato da una reazione pH mediamente alcalina, presenta un livello di salinità normale; tuttavia, i livelli di sostanza organica sono risultati piuttosto bassi, motivo per cui nel corso della prova è stato sostenuto con concimazioni migliorative per tale condizione (Tab.2). Per quanto riguarda il profilo nutrizionale presenta un livello di azoto basso con fosforo e potassio abbondanti (Tab.2) questa condizione rende più agevole l'utilizzo delle concimazioni azotate che, spesso, se in eccesso, potrebbero causare danni ai tessuti fogliari. Lo strato di 0-30 cm ha una elevata C.S.C. Nella Tab. 3 sono riportati i valori delle analisi anche per gli strati più profondi del profilo 30 - 60 cm.

Tab. 2 Analisi delle proprietà chimico-fisiche del suolo ospitante le piante in prova per gli intervalli di profondità 0-30 e 30-60 cm eseguite alla realizzazione degli impianti irrigui nel primo anno di sperimentazione (2021).

Parametro	Valore	Unità	Parametro	Valore	Unità
ANALISI CHIMICO - FISICA (0-30 cm)			ANALISI CHIMICO - FISICA (30-60 cm)		
Scheletro	SEN		Scheletro	TRA	
Sabbia	58	%	Sabbia	67	%
Limo	14	%	Limo	11	%
Argilla	18	%	Argilla	22	%
Tessitura	FAS		Tessitura	FAS	
REAZIONE (1:2.5)	pH 8,1		REAZIONE (1:2.5)	pH 8,3	
COND. Elet.(1:2.5)	mS/cm 0,851	mS/cm	COND. Elet.(1:2.5)	mS/cm 0,306	mS/cm
CALCARE TOT.	16,2	%	CALCARE TOT.	19,7	%
CALCARE Att.	4	%	CALCARE Att.	3,8	%
S.O.	1,04	%	S.O.	0,20	%
ANALISI NUTRIENTI			ANALISI NUTRIENTI		
N totale	0,074	%	N totale	0,018	%
P	28	ppm	P	10	ppm
Fe	18,8	ppm	Fe	11,2	ppm
Mn	9,6	ppm	Mn	9,4	ppm
Cu	1,6	ppm	Cu	0,8	ppm
Zn	2,4	ppm	Zn	0,6	ppm
Ca	2850	ppm	Ca	2700	ppm
Mg	440	ppm	Mg	300	ppm
K	418	ppm	K	184	ppm
Na	281	ppm	Na	260	ppm

Tab. 3 Analisi della capacità di scambio cationico (C.S.C.) del suolo ospitante le piante in prova per gli intervalli di profondità 0-30 e 30 - 60 cm eseguite alla realizzazione degli impianti irrigui nel primo anno di sperimentazione (2021).

ANALISI C.S.C (0-30 cm)				ANALISI C.S.C (30-60 cm)			
Parametro	Valore/100g	unità	Saturazione %	Parametro	Valore/100g	unità	Saturazione %
C.S.C	20,21	meq		C.S.C	17,6	meq	
Ca	14,25	meq	70,5	Ca	13,5	meq	76,7
Mg/K	3,67	meq	18,2	Mg/K	2,50	meq	14,2
K	1,07	meq	5,3	K	0,47	meq	2,7
Na	1,22	meq	6,0	Na	1,13	meq	6,4
Saturazione basica			100	Saturazione basica			100
Mg/K	3,43			Mg/K	5,32		

Di tale terreno sono state determinate le sue caratteristiche idrologiche attraverso la curva di ritenzione idrica del suolo Fig.1, la risultante mostra una capacità di campo (CIC) del 39,48% ($v v^{-1}$), un punto di appassimento (PA) del 18,49% ($v v^{-1}$) e acqua disponibile (AD) del 20,99% ($v v^{-1}$) Tab.4.

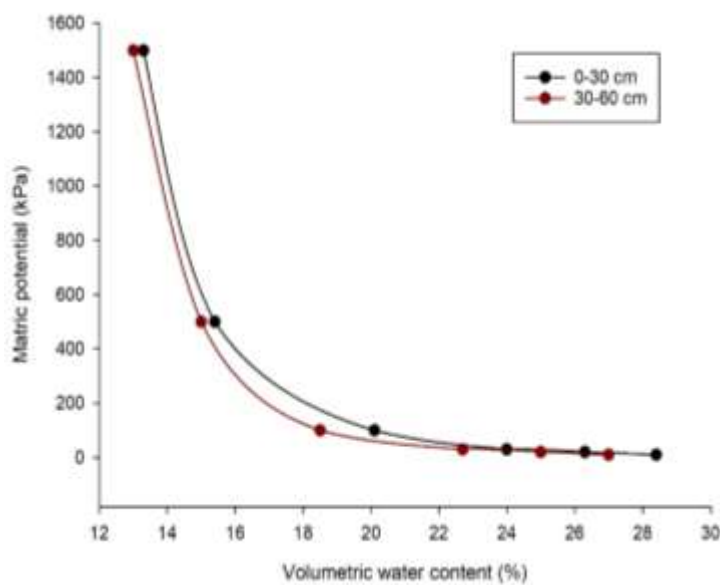


Fig. 1 Curve di ritenzione idrica del suolo misurate per gli strati 0-30 e 30-60 cm del sito sperimentale.

Tab. 4 Caratteristiche del suolo e contenuto di acqua disponibile per la tesi Sprinkler nel profilo del suolo (0-60 cm).

Parametri	Unità	Sprk
		I
Volume di suolo	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	1,526
Densità apparente	$\text{t}(\text{m}^3)^{-1}$	1,39
CIC	% (v v^{-1})	39,48
PA	% (v v^{-1})	18,49
AD	% (v v^{-1})	20,99
AD	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	320
AFD (0-60 cm)	% AW	11%
AFD (0-60 cm)	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	35

1.4 Monitoraggio dei parametri meteorologici

I parametri ambientali sono stati acquisiti da due diverse stazioni meteorologiche. I valori annui di ET_0 Penman Monteith (PM) sono stati acquisiti dalla stazione meteo n. 39 dell'ALSIA AASD Pantanello situata ad 1 km dal sito sperimentale, in agro di Bernalda (Metaponto), essendo tale stazione dotata di tutti i sensori tra cui radiometro per la misura della radiazione incidente, necessari per calcolo dell' ET_0 PM.

Le variabili climatiche di umidità e temperatura dell'aria e relativo deficit di pressione di vapore (VPD) sono state acquisite invece da una stazione installata in campo al fine di avere una disponibilità di dati climatici a livello sito-specifico. La stazione del sito sperimentale riportata in Fig. 2, è posizionata al di sopra della chioma del frutteto, a circa 5 m da terra.

Il deficit di pressione del vapore (VPD) è stato calcolato utilizzando la temperatura dell'aria e l'umidità relativa secondo la formula basata sul metodo di Tanner and Sinclair (1983):

- $Esat = 0.61078 \text{ EXP}(17,27 \cdot T^{\circ}\text{aria} / (T^{\circ}\text{aria} + 237,3))$
- $Eact = Esat \cdot \text{Umidità aria} / 100$
- $VPD = Esat - Eact$



Fig. 2 Stazione meteo installata nel sito sperimentale.

1.5 L' impianto irriguo

L'impianto irriguo della parcella è composto da una linea irrigua principale in polietilene PN5 posto all'altezza di 1,70 m dal piano di campagna in corrispondenza del cordone di allevamento delle piante sulla quale sono innestati a metà tra due piante contigue gli spruzzatori pendenti al suolo, distanti 70 cm da questo, producendo un diametro (d) di bagnatura di 1,80 cm ($r=90$ cm). La portata dell'impianto è di $35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ servito sia da consorzio che da pozzo, con collegamento a cascata tra i due al fine di garantire copertura irrigua anche in casi di sospensione idrica consortile.

L'impianto è stato reso automatizzato tramite un sistema irriguo "Irrifarm" della Pan. Agri s.r.l. Basilicata, Italia, specializzato per programmazioni irrigue in remoto.

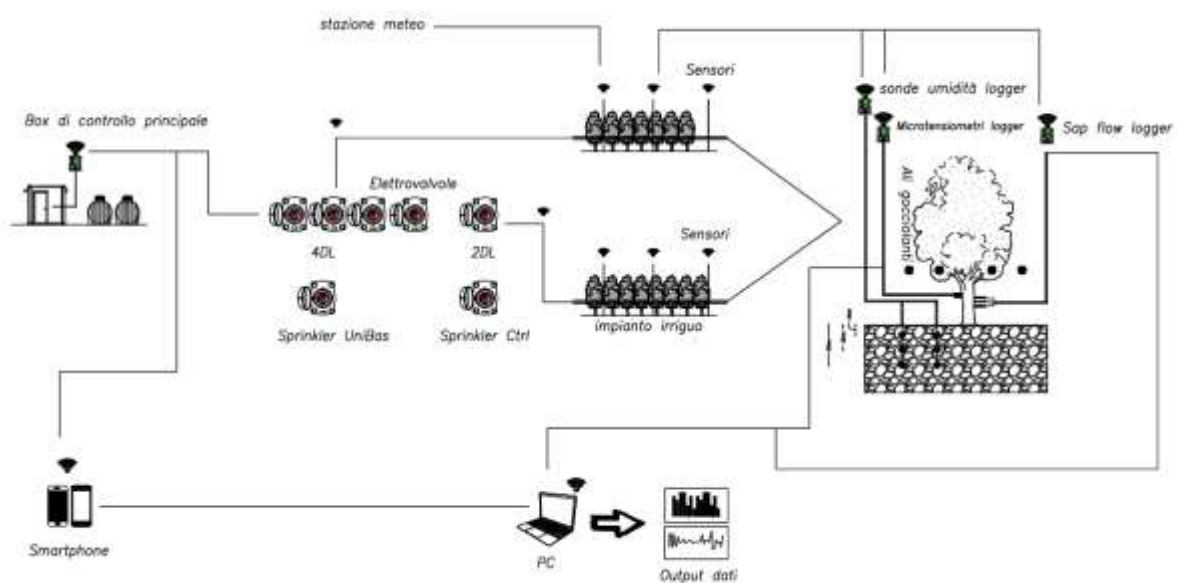
Il sistema Irrifarm permette di gestire in maniera automatizzata diversi settori irrigui semplicemente controllando a distanza un diverso numero di elettrovalvole installate in capo ai tubi di mandata dell'irrigazione. Le elettrovalvole hanno portate da 0,23 a 6,8 m³ h⁻¹, dotate di un misuratore di portata analogico, a cui è stato aggiunto un contaltri classico per consentire l'applicazione di diversi trattamenti irrigui e il monitoraggio dei volumi somministrati, di un misuratore di portata digitale generale (10-100 L di impulso elettrico⁻¹) e di un programmatore automatico di irrigazione per il controllo a distanza dell'erogazione dell'acqua Fig.4.



Fig. 4 sistema irriguo automatizzato “Irrifarm”, Pan. Agri

Il sistema irriguo nella prova è stato integrato alla sensoristica presente in campo Fig.5, quindi le programmazioni irrigue automatizzate venivano corrette settimanalmente, per volume e numero di interventi, tramite l'analisi degli output dei sensori installati in campo e in base alla valutazione delle condizioni meteo, di umidità del suolo e fisiologiche della pianta misurate in continuo nel sito.

Fig. 5 Schema concettuale della regolazione dei volumi irrigui tramite feedback sensoristico.



1.6 Determinazione del volume di suolo interessato dall'irrigazione

Il volume di suolo interessato dall'irrigazione è stato calcolato a due diverse profondità, rispettivamente per lo strato 0-30 e 30-60 cm considerando due cilindri sovrapposti parametrizzati con diametro (d) pari a quello del cerchio che si forma dalla superficie di bagnatura di suolo a seguito della frammentazione dello spruzzatore e l'altezza (h) pari alla capacità di penetrazione dell'acqua all'interno degli strati profondi.

A questo punto come mostrato nella Fig. 3 è stato determinato il volume dei cilindri secondo la formula:

$$V = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 h$$

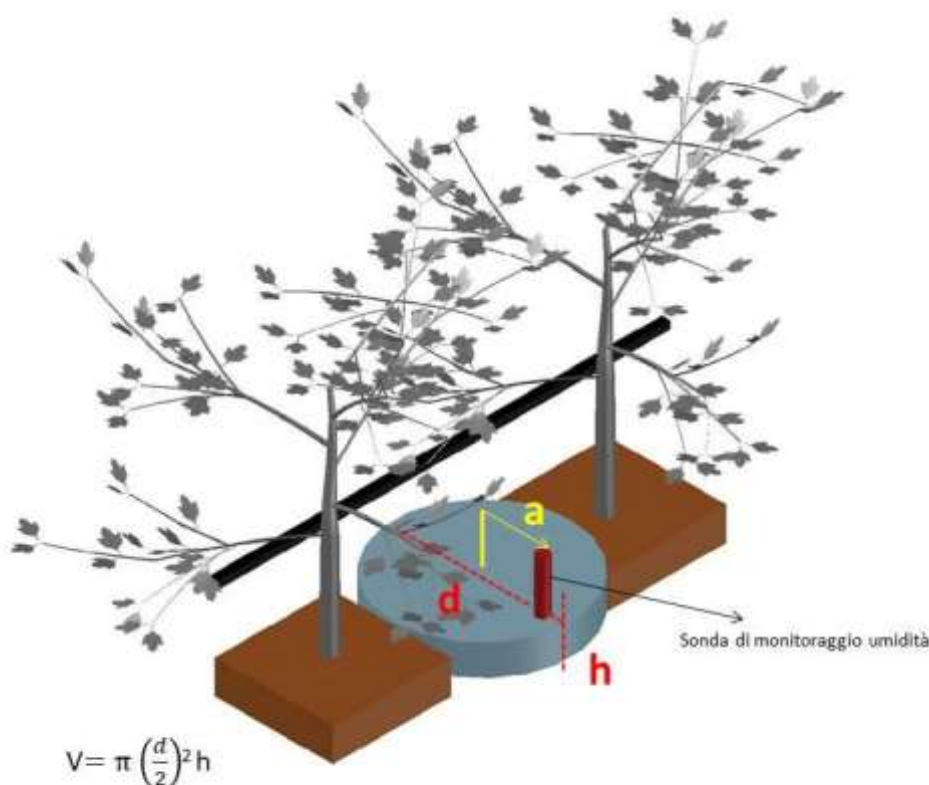


Fig. 3 Schema rappresentativo del dimensionamento del volume di suolo interessato dall'irrigazione nelle tesi C e I dove " d " è il diametro del cilindro pari ad 1,90 m " h " l'altezza e " a " la distanza che intercorre tra il centro del cilindro e la posizione in cui è installata la sonda per il monitoraggio dell'umidità.

1.7 Fabbisogno idrico della coltura e bilancio idrico del suolo

Il fabbisogno idrico della coltura ovvero l'evapotraspirazione colturale (ET_c) è stato determinato utilizzando la relazione semplificata: $ET_c = ET_0 \times K_c$ dove ET_0 è l'evapotraspirazione di riferimento (mm) e il K_c il coefficiente colturale.

L'irrigazione richiesta netta (NIR - net irrigation requirement) è stata calcolata secondo la formula $NIR = ET_c - PU$, dove PU è la pioggia utile che è stata calcolata considerando quella intercettata dalla superficie bagnata dall'irrigazione.

I volumi di irrigazione da distribuire (GIR - Gross irrigation requirement) sono stati calcolati con la formula:

- $GIR = NIR \div AE$

dove AE è l'efficienza di applicazione dell'acqua, riportato nel documento FAO Irrigation and Drainage Nr. 66 (Fereres et al., 2012).

Per la gestione dell'irrigazione è stato utilizzato il metodo del bilancio idrologico applicato al volume di suolo bagnato dall'irrigazione e esplorato dall'apparato radicale (contenitore), considerando, la capacità di ritenzione idrica, AD (acqua disponibile) e AFD (acqua facilmente disponibile) e il suo depauperamento (deficit idrico del contenitore) dovuto dai processi di assorbimento radicale della coltura e evaporazione dal suolo (ET_c). Per la gestione dell'irrigazione è stata considerata la soglia minima del contenuto idrico del contenitore pari all' AFD (11% di AD) (Calabritto et al. 2024),

Il volume irriguo da applicare è stato stimato giornalmente secondo la seguente formula (FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER n. 66):

$$IV_{\text{stimato}} = [NIR/AE] \times 10 \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)}$$

Dove: IV_{stimato} è il volume di irrigazione stimato ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$); NIR l'irrigazione netta richiesta e AE è l'efficienza di applicazione del metodo di irrigazione pari al 95% per entrambe le tesi. Il coefficiente colturale K_c utilizzato è considerato specifico per l'actinidia, varia da 0,5 a 1,1 durante la stagione, ed è riportato nel documento FAO Irrigation and Drainage Nr. 66 (Xiloyannis et al., 2012).

Il metodo del bilancio idrologico (processo predittivo feedforward) spiegato è stato accoppiato al monitoraggio in continuo del contenuto idrico del suolo (processo feedback) al fine di correggere eventuali errori cumulati per la stima delle diverse componenti del bilancio idrologico e quindi aggiustare il volume irriguo (Ferreira, 2017; Casadeus et al. 2012).

Il volume di irrigazione applicato è stato regolato durante tutta la stagione operando meccanismi di aggiustamenti basati sul monitoraggio in continuo del contenuto idrico nel volume di suolo bagnato dall'irrigazione. Nel caso in cui il contenuto idrico del suolo, in particolare negli strati più profondi, fosse superiore all'80-90% della CIC, i volumi di irrigazione venivano ridotti del 15-20%, viceversa quando i valori di umidità del suolo erano inferiori al

11% dell'AD, veniva applicato un aumento del 15-20% dei volumi (Mininni et al., 2022; Calabritto et al., 2024).

1.8 Misura dell'indice di area fogliare

In accordo con altri autori (Zarate-Valdez et al., 2012; Zhu et al., 2023;) nei trattamenti C e I l'indice LAI è stato monitorato tramite una tecnica di stima di area fogliare utilizzata per piante forestali, scattando delle foto tramite smartphone con lente fish eye (Zhu et al., 2023).

In campo sono stati eseguiti rilievi a cadenza bisettimanale per le stagioni irrigue dal 2021 al 2023, per tutte le fasi fenologiche di sviluppo fino alla raccolta 9 scatti con metodo fish eye

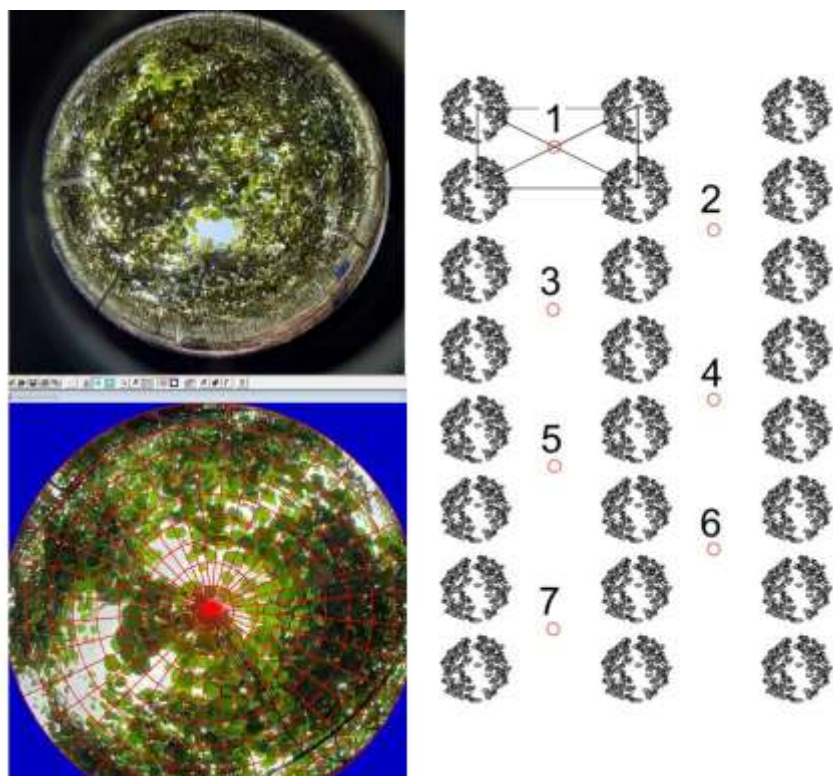


Fig 6. Metodologia di definizione dei quadranti di scatto Fish Eye ed elaborazione delle foto in GLA

per singola tesi irrigua, mezz'ora prima dell'alba o mezz'ora dopo il tramonto in modo da escludere eventuali effetti della luce irradiante.

Come mostra lo schema in Fig. 6 le postazioni di scatto sono state individuate scegliendo le piante più rappresentative di ogni tesi e sistemate posizionandosi sull'interfila in corrispondenza del punto dove tendevano ad incrociarsi le diagonali dei rettangoli spaziali definiti dal sesto d'impianto considerando ai quattro vertici.

Successivamente le foto sono state elaborate tramite un software di analisi d'immagine open access, Gap Light Analyzer (GLA) Version 2.0, image processing software (Fraser et al., 1999), determinando così i valori di LAI medio.

1.9 Monitoraggio dello stato idrico del suolo

Il contenuto idrico volumetrico del suolo (SWC) è stato monitorato in entrambe le tesi usando sonde a tecnologia FDR multiprofilo da 60 cm, modello/serie III Drill & Drop, (Sentek Sensor Technologies Stepney, Australia), configurata con hardware SDI-12 - RS232/48. Con sensori di misura distribuiti nel totale della lunghezza ogni 10 cm, monitorando così progressivamente i profili di suolo a 5, 15, 25, 35, 45, 55 cm. Tali sonde consentono di monitorare in continuo l'umidità e rilevare le oscillazioni istantanee e gli andamenti in ogni strato del suolo. Tutte le sonde in campo sono dotate di un trasmettitore che si interfaccia con Irrimax LIVE, un portale web specifico per Sentek che consente di visualizzare in tempo reale gli andamenti di umidità del suolo misurati dalle sonde, in accordo con Tenreiro et al., 2022.

Rispetto al cilindro di suolo bagnato riportato in Fig.3, le sonde sono posizionate a 50 cm di distanza dal centro del cilindro verso l'interfila, una distanza minore al raggio della circonferenza determinata dalla superficie di bagnatura, con diametro d pari ad 1,90 m.

1.10 Monitoraggio dello stato idrico della coltura

1.10.1 Monitoraggio del potenziale idrico dello stelo e del tronco

Lo stato idrico della pianta e le sue variazioni in risposta ai diversi trattamenti irrigui applicati sono stati monitorati tramite misure in continuo del potenziale idrico della pianta.

Il potenziale idrico della foglia non traspirante (SWP), il parametro più rappresentativo dello stato idrico di una pianta (Abrisqueta et al. 2015) e il più stabile ed affidabile durante il giorno (Intrigliolo e Castel 2004; Intrigliolo e Castel 2006), è stato misurato sia a livello delle foglie non traspiranti tramite la camera a pressione di Scholander (SPC) (Modello 1000, PMS Instrument Company, Corvallis, OR, USA) con azoto pressurizzato secondo la procedura raccomandata da McCutchan and Shackel (1992), che a livello del tronco (TWP) tramite microtensiometri installati a livello dei vasi xilematici di 2 piante per ciascun metodo (FloraPulse Davis, CA, USA), che misurano in continuo i valori di TWP misurati ad intervalli temporali di 20 minuti.

In entrambe le tesi, C e I, sono stati misurati i valori di potenziale idrico dello stelo a predawn (PSWP) e a midday (MSWP) alcuni andamenti giornalieri, individuando 5 foglie per punto di misura, da almeno 3 piante per tesi. Le foglie sono state coperte con fogli di alluminio per l'ambientamento, al fine di annullare la traspirazione.

1.10.2 Monitoraggio del flusso traspirativo

Su sei piante per ciascuna delle tesi C e I sono stati installati i sensori Sap Flow per il monitoraggio del volume di flusso linfatico a livello dello xilema. Sono sensori composti da una termocoppia e uno scambiatore di calore ad impulsi, già validati su actinidia (Green e Clothier, 1995). Il principio per la misura dei flussi xilematici si basa sulla rilevazione da parte della termocoppia dei movimenti di linfa riscaldata dallo scambiatore, acquisendo il dato con timing di 20 minuti tra una lettura e la successiva. tre canali (modello HP3TC, Tranzflo NZ Ltd., Palmerston North, Nuova Zelanda). Le sonde sono state installate nei tronchi a un'altezza di circa 0,75 m dal suolo. Una sonda di temperatura (il sensore principale) è stata posizionata a una distanza di 15 mm a valle della sonda del riscaldatore. Un altro sensore (il sensore di

riferimento) è stato posizionato a una distanza di 40 mm a valle della sonda del riscaldatore. Una parte del tronco della pianta vicino ai sensori è stata quindi avvolta in un foglio di alluminio per l'isolamento termico. La densità del flusso di linfa (Q_s , cm h⁻¹) è stata misurata utilizzando il metodo T-max heat-pulse (Cohen et al., 1981; Green et al., 1989, 2003) con una leggera modifica nella spaziatura del sensore (5 mm di distanza in più tra il riscaldatore e il sensore) per risolvere le densità di flusso di linfa molto elevate ($J_s < 100$ cm h⁻¹) previste durante la metà del giorno in queste piante di kiwi. La spaziatura più ampia migliora anche la risoluzione di basse portate fino a circa 1 cm h⁻¹ (Green et al., 2003). È stato utilizzato un data logger Campbell (modello CR1000, Campbell Scientific, Logan, USA) per controllare l'uscita del riscaldatore e misurare il tempo di aumento massimo della temperatura (t_M , s) in seguito all'applicazione di un breve impulso di calore (4 s). Le densità del flusso di linfa sono state calcolate dai valori t_M utilizzando l'approccio delineato da Green et al. (2003, 2009). I calcoli includono una correzione per gli effetti delle ferite indotti dalla sonda. Per i fori di perforazione da 2,0 mm di diametro si assume un diametro della ferita di 2,8 mm.

1.11 Determinazione dei parametri alla raccolta

1.11.1 Produzione

La produzione è stata determinata raccogliendo i frutti totali di 5 piante presenti in sperimentazione andando così a rilevare per ciascuna pianta il numero totale dei frutti e il peso di ciascun frutto, su filari differenti fuori dall'area di prova ma in corrispondenza delle parcelle sperimentali inoltre sono stati raccolti i frutti di 5 piante gestite secondo i protocolli aziendali. Secondo le linee guida dei disciplinari di produzione Zespri i frutti sono stati classificati in base al peso come frutti commerciali (con peso > 72 g) e frutti piccoli (con peso < 72 g) e in base alle caratteristiche estetiche come frutti commerciali (con peso adeguato e forma classica della cultivar), frutti deformi (frutti con schiacciate equatoriali tali da non essere idonei ai parametri estetici riportati dei disciplinari) e marcio (frutti con marcescenze in corso e/o con danni meccanici subiti durante la fase di allevamento predisponenti a perdita della consistenza).

1.11.2 Qualità dei frutti

L'analisi dei parametri qualitativi di un frutto è fondamentale al fine di determinare il momento idoneo alla raccolta. Su 90 frutti per ciascuna tesi sono stati misurati: sostanza secca (%), zuccheri solubili (Brix°) tramite un rifrattometro digitale ATAGO™ PAL-1 portatile, consistenza tramite penetrometro digitale (Fruit Texture Analyzer FTA 53220/15 Turoli ®) e colore della polpa tramite un colorimetro modello CR-400 / CR-410 (Konica Minolta).

1.12 Determinazione dei coefficienti colturali sperimentali (K_{c-exp}) per *A. chinensis* var. *chinensis* attraverso modello inverso dei dati ottenuti con irrigazione di precisione

Per determinare dei K_{c-exp} utili alla gestione irrigua dell' *A. chinensis* var *chinensis*, per ogni stagione irrigua dal 2021 al 2024 è stata applicata una procedura inversa di calcolo rispetto al metodo FAO 56 partendo dall' ET_c annua della coltura.

Considerando il metodo FAO 56 (Allen et al., 1998):

$$1. \quad ET_c = ET_0 \times K_c$$

Secondo il metodo di bilancio idrico semplificato riportato in Mininni et al., 2022:

$$2. \quad IV_{\text{stimato}} = [(ET_c - PU)/em] \times 10 \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)}$$

Durante le stagioni irrigue sono state applicate correzioni dei volumi somministrati secondo la metodologia del capitolo 1.6 ottenendo alla fine della stagione irrigua un nuovo volume irriguo cumulato IV_{exp} , modificato rispetto al IV_{stimato} , quindi indirettamente un aggiustamento periodico dell' ET_c e, pertanto, dei fabbisogni idrici della coltura. In questo caso, è stato possibile calcolare su un arco temporale settimanale un $ET_{c\text{-exp}}$ derivato dall'applicazione dei nuovi volumi irrigui:

$$3. \quad ET_{c\text{-exp}} = IV_{\text{exp}} \times em + PU$$

$$4. \quad K_{c\text{-exp}} = ET_{c\text{-exp}} \div ET_0$$

1.13 Analisi statistica

Le relazioni tra i diversi parametri indicatori dello stato idrico delle piante, del suolo, le variabili meteorologiche e i valori di produzione e qualità sono state studiate e verificate nel corso dell'elaborato utilizzando T- test e ANOVA implementati in MatLab e Simulink R2023b.

RISULTATI e DISCUSSIONI

1.14 Monitoraggio dei parametri meteorologici

Durante il periodo di prova l'areale oggetto delle sperimentazioni è stato caratterizzato tramite l'analisi delle variabili climatiche, sia come valori storici (2000-2021) (dati non mostrati) che per singoli anni di sperimentazione rispettivamente 2021, 2022 e 2023. Come mostrato in Fig.7 (A) tramite un'analisi cumulativa dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 e delle precipitazioni è stato possibile determinare per gli anni 2021, 2022, 2023 il deficit idrico ambientale rispettivamente di 900, 804 e 773 mm.

Nella Fig.7 (B) viene rappresentato per tutti e tre gli anni l'andamento medio giornaliero del Vapor Pressure Deficit (VPD). Nell'arco dei tre anni di prova, il 2021 e il 2022 hanno raggiunto valori medi più alti di VPD rispetto al 2023, i picchi stagionali sono stati rilevati il 14 Agosto 2021, 25 Luglio 2022 e 21 Agosto 2023 con valori rispettivamente di 2,12, 2,32 e 1,89 kPa.

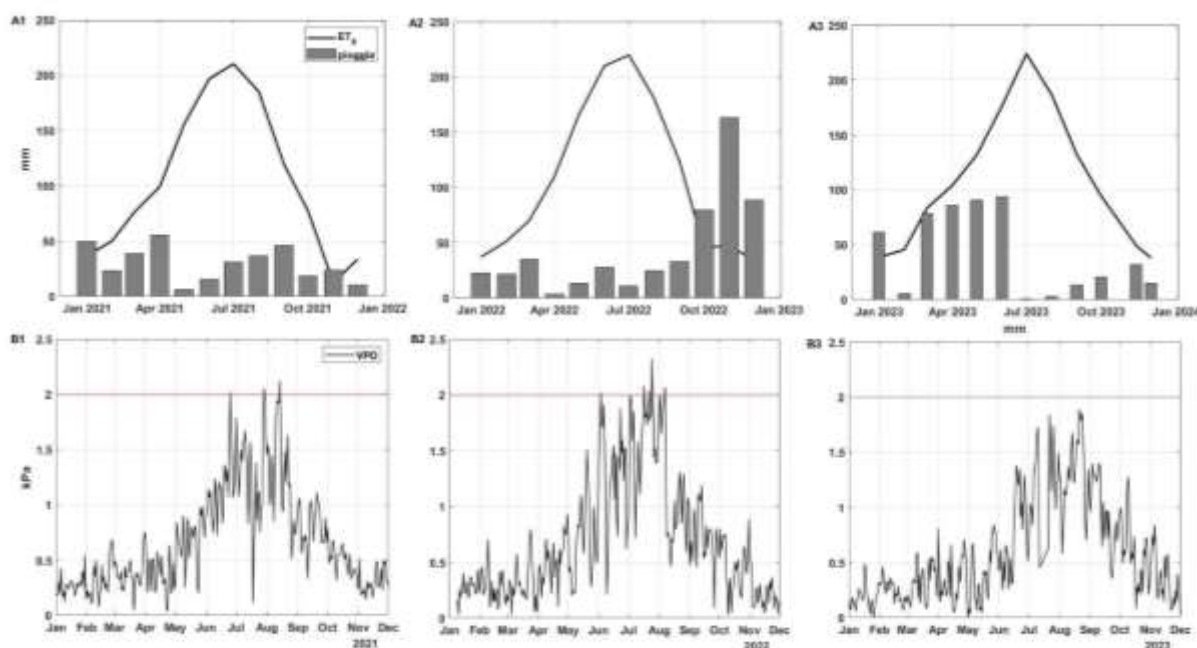


Fig. 7 Evapotraspirazione di riferimento ET_0 (mm) e precipitazioni (mm) cumulate mensilmente (A1, A2 e A3), Vapor Pressure Deficit medio (kPa) (B1, B2 e B3) relativi alle stagioni 2021, 2022 e 2023.

1.15 Aggiustamenti ai volumi irrigui del bilancio idrico

1.15.1 Stato idrico del suolo

I volumi irrigui distribuiti nel corso delle stagioni irrigue sono stati modificati mediante aggiustamenti settimanali basati sulle oscillazioni di SWC monitorate con le sonde di umidità, accertandosi che queste rientrassero nei valori soglia compresi tra la CIC e il limite di AFD nel suolo.

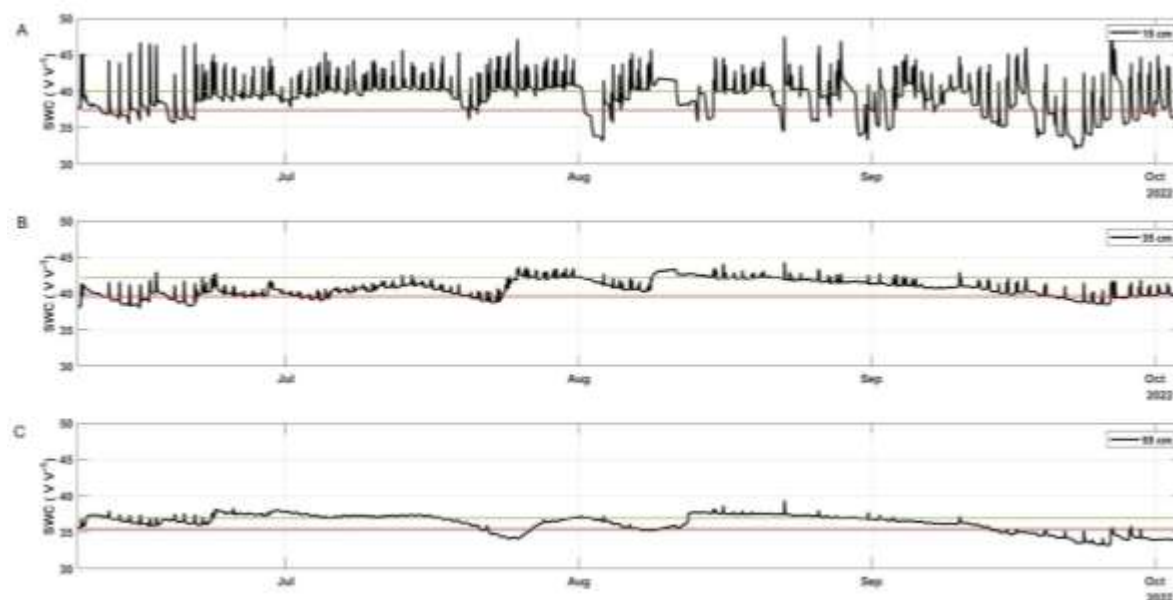


Fig. 8 Andamento dell'umidità del suolo per la stagione irrigua 2022 misurato in continuo per la tesi "I". I pannelli A, B e C identificano gli andamenti di umidità degli strati di suolo a 15, 35 e 55 cm e le linee verdi e rosse rispettivamente il valore di CIC e il limite di AFD per ogni strato.

I valori di CIC e i limiti di AFD sono stati calcolati per ogni singolo strato di suolo monitorato, considerando la diversa capacità di assorbimento da parte dell'apparato radicale all'impoverimento della AFD per diverse profondità. Nel caso di *A. chinensis* var. *chinensis*, l'AFD per gli strati di suolo profondi 15, 35 e 55 cm è stata fissata al 25 % dell' AD nello strato di 15 cm e 7% dell'AD nello strato di 35 e 55 cm (Calabritto et al., 2024). Come mostrato in Fig. 8, risultanti pari a 40 e 37 %, 42 e 39%, 38 e 35% rispettivamente per le profondità di 15, 35 e 55 cm. Sulla base di questi valori, i volumi irrigui nella tesi I sono stati aumentati o diminuiti ogni qualvolta che l'umidità saliva sopra la soglia di CIC (linea verde) o scendeva sotto quella del limite di AFD (linea rossa) (Fig.8).

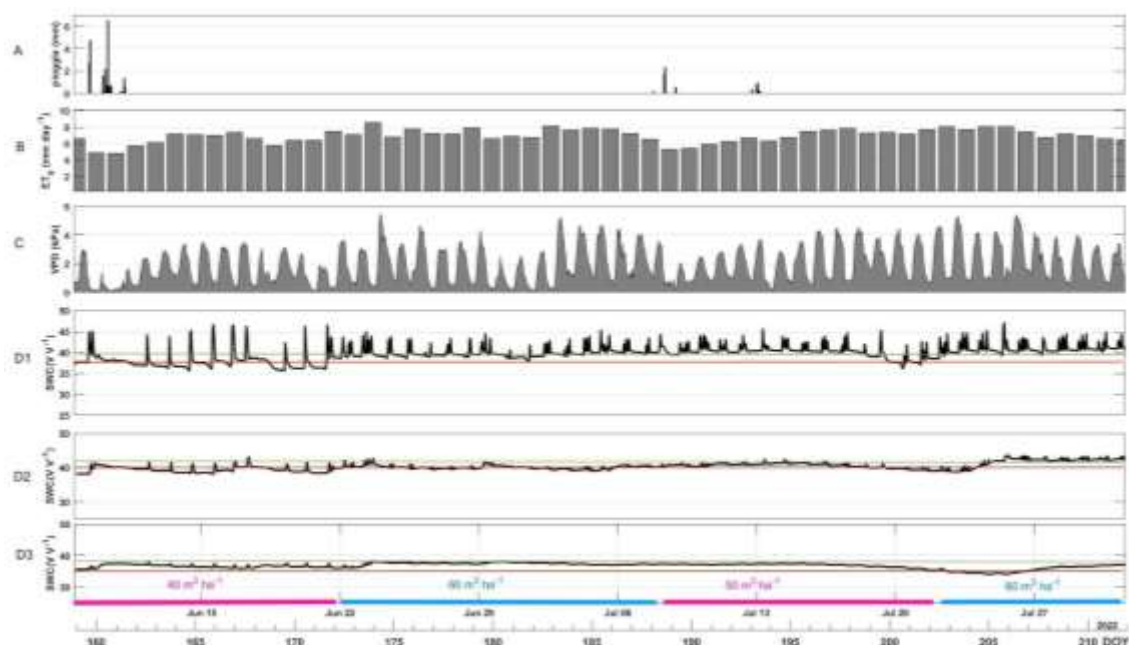


Fig. 9 Esempi di aggiustamento del volume irriguo nel mese di Giugno 2022 per la tesi I. A) pioggia utile (mm), B) ET_0 giornaliero, C) Deficit di pressione di vapore (VPD), D1) andamento umidità strato profondo 15 cm di suolo, D2) andamento umidità strato profondo 35 cm di suolo e D3) andamento umidità strato profondo 55 cm di suolo.

La distribuzione di volumi irrigui senza considerare le condizioni ambientali del sito è un errore sempre più ricorrente nelle programmazioni irrigue. I volumi derivanti dal bilancio idrico derivano da K_c specifici per una determinata coltura ma spesso tali valori non sono adatti a diversi areali, caratterizzati da condizioni climatiche differenti (Libardi et al., 2019) oppure per alcune colture non sono stati ancora definiti (García et al., 2020) come nello specifico caso in studio, quindi è necessario durante la stagione irrigua monitorare oltre alle umidità del suolo anche i parametri climatici che a seconda del loro andamento influenzare i volumi teorici calcolati.

La Fig. 9 mostra com'è stata gestita la tesi "I" durante il periodo di Giugno - Luglio (DOY da 159 a 212) della stagione irrigua 2022, un dettaglio degli aggiustamenti volumetrici eseguiti sulla base dell'umidità degli strati di suolo in maniera integrata agli andamenti dei parametri ambientali, in particolare piogge (Fig.9 A) e VPD (Fig.9 C).

Dal DOY 161 al DOY 162 infatti c'è stata una sospensione delle irrigazioni a seguito di precipitazioni di intensità media tra 4 e 6,5 mm ma comunque influenti sui valori di VPD. In questi giorni l'irrigazione è stata sospesa per poi riprendere al DOY 163 quando i valori di SWC avevano raggiunto il limite di AFD. Alla ripresa irrigua il volume di $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ applicato è risultato insufficiente a riportare l'umidità del suolo nel range di AFD, questa condizione ha imposto un aumento sia volumetrico a $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ giornalieri e sia dei turni irrigui, dividendolo in tre interventi giornalieri riuscendo così anche in condizioni di elevato VPD (5,50 kPa - DOY 175), a preservare un andamento di SWC nei range di AFD nello strato di suolo dei 15 cm (Fig.8 D1), asciugando lentamente gli strati più profondi dei 35 e 55 cm (Fig.8 D2 e D3). Al DOY 189 il VPD si è ridotto raggiungendo valori prossimi a 2 kPa, infatti allo stesso DOY anche il volume

irriguo è stato ridotto da 60 a 50 m³ ha⁻¹ riuscendo fino al DOY 200 a mantenere l'umidità ottimale nella zona dei 15 cm di profondità del suolo. Durante il DOY 200 il volume è stato nuovamente aumentato.

Gli aggiustamenti volumetrici assieme alla suddivisione dei volumi irrigui in più interventi irrigui giornalieri ha comportato una minore quantità di acqua applicata per singolo intervento con minori fluttuazioni dell'umidità del suolo, riducendo la percolazione dell'acqua negli strati più profondi. In questo modo, è possibile garantire una maggiore disponibilità idrica e promuovere un rapido assorbimento da parte delle radici attive vicino alla superficie in relazione alle esigenze idriche della pianta. Questo risultato è in accordo con Clothier e Green (1994), che sostengono una maggiore efficienza ottenuta attraverso l'applicazione di minori quantità di acqua di irrigazione ma con maggiore frequenza. L'adozione di più interventi irrigui giornalieri potrebbe essere molto importante soprattutto nei periodi di elevata richiesta idrica ambientale, evitando l'insorgere di un lieve stress idrico che potrebbe verificarsi nelle ore più calde influenzando la fisiologia della pianta, come riportato da Torrez-Ruiz et al., 2016.

1.15.2 Stato idrico della coltura

Lo stato idrico delle piante è stato monitorato sia in continuo che puntualmente tramite misure di SWP e TWP. La Fig. 10 mostra il risultato delle misure di SWP a predawn e midday in riferimento alla tesi "I" durante il periodo che va dal 28 Luglio al 28 Settembre della stagione irrigua 2022. I valori di SWP misurati a midday, compresi tra -4 e -6,8 bar indicano una condizione idrica ottimale che per l'actinidia è identificata da valori di potenziale fogliare (LWP) a midday compresi tra -4 e -7 bar (Clearwater et.al., 2004).

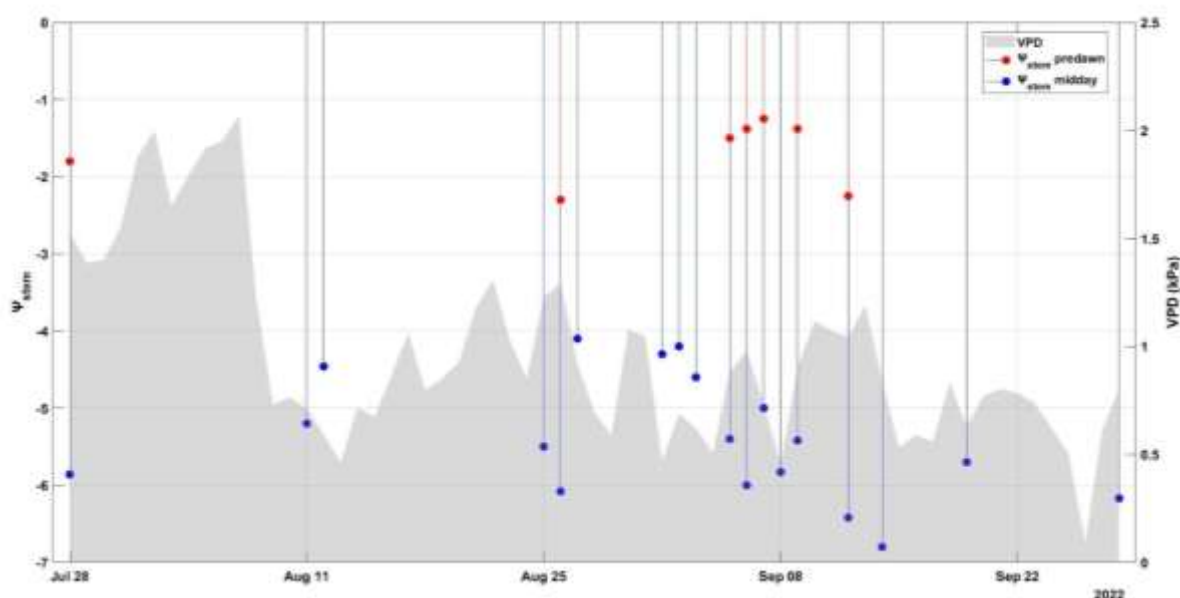


Fig. 10 Valori di potenziale idrico dello stelo SWP della tesi I misurato a predawn e midday durante la stagione irrigua 2022.

Per modificare dinamicamente la programmazione irrigua e adattare il volume alle condizioni fisiologiche reali della pianta in campo lo SWP risulta essere l'indicatore dello stato idrico delle piante più efficiente (Ramírez Cuesta 2023,), (Turner et al., 1990; Fereres e Goldhamer et al.,

1990; Huguet et al., 1992; Shackel et al., 1997) e il meno variabile e affidabile (Intrigliolo e Castel 2004; Intrigliolo e Castel 2006), in particolare quello misurato a mezzogiorno, diventando uno strumento valido per la programmazione dell'irrigazione (Ghrab et al., 2013).

Appurato che il monitoraggio dello stato idrico della coltura tramite SWP è essenziale per una idonea programmazione irrigua, si rende necessaria la possibilità di poterlo monitorare in continuo (Mininni., 2024; Di Biase in stampa;). La figura 11. B mostra l'andamento di TWP misurato durante il mese di Agosto 2022 nella parcella sperimentale I, assieme agli andamenti di umidità per gli strati di 15, 35 e 55 cm rispettivamente C1, C2 e C3 e all' ET_0 giornaliero A.

Durante il periodo considerato in Fig. 11 la strategia irrigua prevedeva la somministrazione di un volume irriguo di $70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ suddiviso in quattro interventi irrigui giornalieri da 30 minuti ad intervento rispettivamente nelle fasce orarie 7:15 - 7:45, 11:30 - 12:00, 13:45 - 14:15 e 17:14 - 17:45, messi in evidenza dai picchi della curva dei grafici C1, C2 e C3. All'approccio gestionale basato sulla consultazione dei livelli di umidità nel range di AFD è stato possibile aggiungere quello del monitoraggio del TWP che potrebbe aiutare a migliorare le strategie di irrigazione in base allo stato idrico delle piante (García-Tejera et al., 2021). Ad un cambio del volume irriguo da 70 a $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in data 24 Agosto, dettato anche dalla variazione di ET_0 da 6.7 a 4.8 mm, il TWP continua a mantenere delle oscillazioni giornaliere con picchi al midday prossimi a -2 bar indicando uno stato idrico ottimale per la pianta (Mininni et al., 2024; Di Biase et al., in stampa).

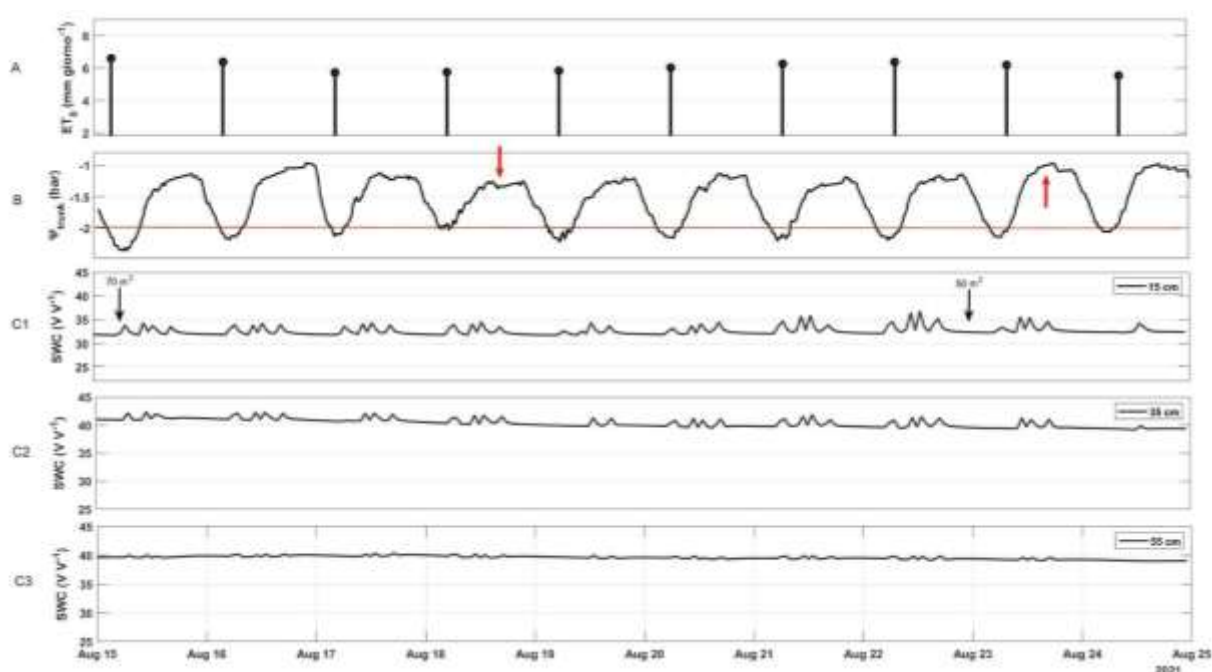


Fig. 11 Andamento giornaliero orario di ET_0 (A), Andamento del potenziale idrico del tronco TWP monitorato in continuo (B) e andamento del contenuto idrico del suolo (SWC) monitorato in continuo per le profondità 15 (C1), 35 (C2) e 55 cm (C3) per il periodo 15 - 25 Agosto 2021 nella tesi I.

I LWP, SWP e TWP misurati a midday sono parametri essenziali da inserire nella scelta di una idonea strategia e programmazione irrigua in quanto correlati in modo soddisfacente alle risposte fisiologiche e produttive di varie colture, in *Prunus domestica* (Lampinen et al. 1995;

2001), *Vitis labrusca* (Naor e Wample 1996) e *Malus domestica* (Naor et al. 1995), è stato anche correlato con la risposta stomatica (Naor et al. 1997; Naor 1998; Shackel 2007). Tuttavia altrettanto importante è il potenziale idrico dello stelo a predawn (PSWP). Misurato prima dell'alba a flussi di traspirazione fogliare bloccati o, comunque, minimi, PSWP risulta essere determinato direttamente dal contenuto idrico del suolo ed è considerato un parametro essenziale per identificare lo stato idrico della pianta, capace di influenzare le performance produttive della stessa (Arnell 1999).

Sulla base di quanto descritto, in figura 11 B, seppur riducendo il volume irriguo da 70 a 50 m³ ha⁻¹ i valori di potenziale idrico del tronco a predawn (PTWP) subiscono una variazione dal 19 al 24 Agosto aumentando da -1,3 a -0,97 bar (freccie rosse in Fig 11 B) delineando una condizione fisiologica ottimale della pianta e, quindi, un miglioramento della condizione di umidità del suolo anche se attuata una riduzione dei volumi che risultano essere sufficienti alla reidratazione notturna della pianta.

Secondo diversi autori l'elevata richiesta di risorsa idrica da parte dell'agricoltura favorisce sempre più l'adozione di moderne tecnologie e strumenti gestionali per ottimizzare le irrigazioni (Pereira et al., 2009, 2017, 2020;). Questo porta a considerare l'utilizzo di più sensori utili a interpretare le risposte della pianta all'irrigazione. In figura 12 è mostrato un estratto l'andamento medio annuale del flusso traspirativo della tesi irrigua "C" dall' 8 Agosto (DOY 220) al 20 Settembre (DOY 263) 2023. In tale intervallo di tempo i volumi sono stati determinati e, successivamente, regolati basandosi esclusivamente sui parametri del bilancio idrico come l'ET₀, sul VPD e sugli andamenti di SWC determinati dalle sonde. Successivamente, a fini sperimentali al periodo di gestione considerato è stato abbinato l'andamento medio dei flussi traspirativi della tesi.

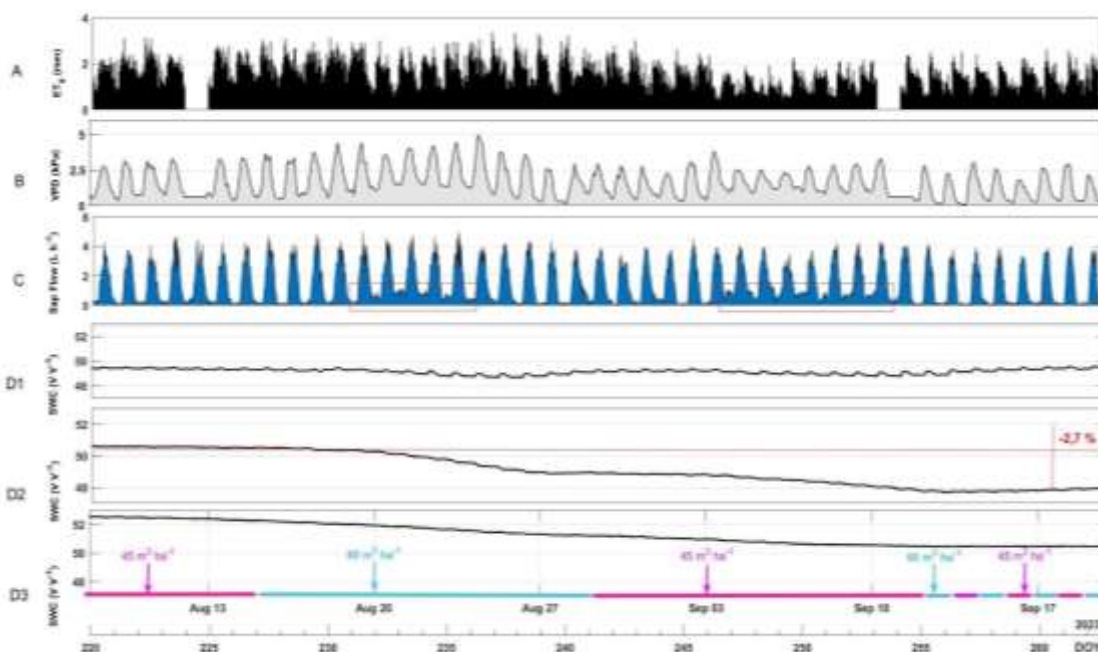


Fig. 12 Andamento giornaliero orario dell' ET₀ (A), del deficit di pressione di vapore ambientale (VPD) (B), del flusso traspirativo delle piante (C) e dei contenuti idrici del suolo per gli strati di

suolo di 15, 35 e 55 cm di profondità, rispettivamente D1, D2 e D3 misurati per la tesi "C" durante l'intervallo dall' 8 Agosto al 20 Settembre della stagione irrigua 2023.

In Fig. 12 sono stati eseguiti aggiustamenti del volume irriguo nello strato di suolo interessato dalle radici assorbenti D1. Dal DOY 227 la programmazione irrigua è stata modificata da 45 a 60 m³ ha⁻¹ che nell'intervallo da DOY 232 a 234 è risultato addirittura insufficiente, infatti alla riduzione del SWC dello strato dei 15 cm Fig. 12 D1 si è innescata una riduzione dello strato dei 35 cm e 55 cm rispettivamente Fig. 12 D2 e D3. Ciò è avvenuto perché l'apparato radicale ha spostato gli assorbimenti nei contenitori più profondi con lo svuotamento di quello superficiale, in linea con quanto riportato da Clothier e Green 1994. Successivamente, dal DOY 237 al 263 il contenuto idrico dei primi 15 cm Fig. 12 D1 si è dapprima stabilizzato e poi è aumentato lentamente seppur applicata una riduzione del volume da 60 a 45 m³ ha⁻¹. Alla riduzione del volume corrisponde una riduzione del 50% del VPD, da 5 kPa DOY 236 a 2,5 kPa, riducendo la domanda evapotraspirativa ambientale rendendo il volume irriguo somministrato utile a contenere le oscillazioni nello strato superficiale di 15 cm (Fig. 12 D1), ma lasciando asciugare i 35 e 55 cm D2 e D3. Dal DOY 225 c'è stato un cambio della strategia irrigua per cui, con intervallo giornaliero, l'alternanza di volumi di 60 e 45 m³ ha⁻¹ ha permesso a valori relativamente bassi di VPD di stabilizzare la riduzione negli strati più profondi, garantendo così un innalzamento graduale dell'umidità nel profilo dei 15 cm (Fig. 12 D1).

In questo periodo di gestione irrigua è stata analizzata la risposta dei sensori sap flow Fig. 12 C: al netto delle oscillazioni di umidità provocate dai continui aggiustamenti le piante mostravano flussi traspirativi costanti, con picchi al midday costanti tra i 3 e 4.5 L ha⁻¹, rispetto a flussi che dovrebbero avere piante di actinidia ben irrigate prossimi a 5,5 - 6 L ha⁻¹ (Green et al. 1989,1995 e 2022;). Considerando i valori misurati di flusso traspirativo misurati è possibile analizzare la gestione irrigua applicata alla tesi C, dove il volume giornaliero veniva somministrato nella sua totalità con un unico intervento alle 6:00 del mattino, incideva sulla quantità di acqua traspirata rispetto alla tesi I che presenta valori traspirativi più alti, con un volume giornaliero somministrato in più interventi in numero variabile da 3 a 4. Oltre alle due diverse strategie irrigue seguite, la tesi I ha diversificato l'andamento stagionale del LAI per il 2022 e 2023 come riportato in Fig. 12.1, mantenendo valori di copertura fogliare e quindi di superficie traspirante sempre più alti. Tale indice è espressione della quantità di luce intercettata dalla chioma (m² di foglia per m² di area di suolo) (Green et al., 2003) e modifica il tasso di traspirazione (ET_c) e l'intercettazione delle precipitazioni (Alton, 2016; Asner et al., 1998; S. Boussetta et al., 2013; Jarlan et al., 2008).

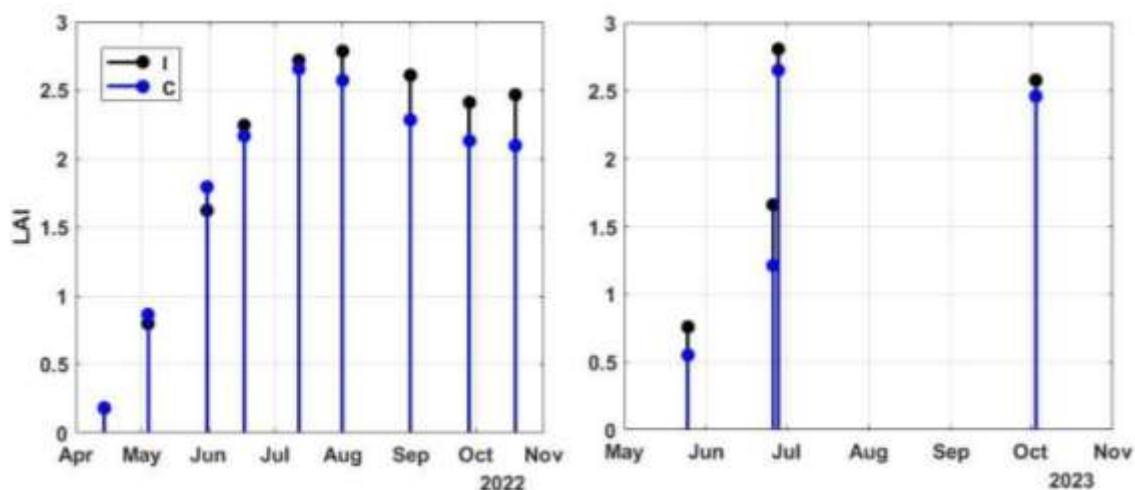


Fig. 12.1 Andamento del LAI per le tesi C e I durante le stagioni irrigue 2021 e 2022.

Nella Fig. 12 C, a partire dal DOY 231 al 237 e dal 247 al 254 si nota un fenomeno di minima traspirazione notturna delle piante in particolare nelle fasi in cui l'umidità dei primi 15 cm di suolo (Fig. 12 D1) tende a diminuire. La maggior parte del trasferimento suolo-vegetazione-atmosfera (SVAT) (Levine e Salvucci, 1999; Hupet et al., 2002), così come i modelli del continuum suolo-pianta-atmosfera (SPAC) (Coelho et al., 2003) presuppongono l'assenza di assorbimento di acqua da parte delle radici durante la notte, perché si presume che la traspirazione sia pari a zero così come la maggior parte delle piante presentano il sistema fotosintetico C3 o C4, motivo per cui si è comunemente pensato che mantengano i loro stomi chiusi di notte, tuttavia, questo potrebbe non essere sempre il caso, poiché è stato dimostrato che, in media, l'actinidia utilizza il 20% della sua acqua durante le ore di buio (Green et al. 1989). In casi in cui la domanda evapotraspirativa ambientale (VPD) sia elevata durante il giorno, come dal DOY 231 al 237, la pianta potrebbe tendere ad aumentare il flusso traspirativo notturno, durante il calo giornaliero del VPD per forzare l'idratazione dei tessuti ridotta durante il giorno a seguito del SWC in riduzione. Questo risultato è in accordo con quanto riportato da Sun et al. 2022 su piante perenni in Australia. Studi preliminari su vite ed altre specie infatti forniscono la prova che la traspirazione notturna può essere una componente importante del bilancio idrico dell'intera pianta (*Water Use Efficiency* - WUE), in particolare in condizioni di stress da siccità. Tuttavia, analogamente a quanto avviene per la WUE, le stime di respirazione notturna, su scala fogliare, potrebbero non essere necessariamente correlate con le perdite d'acqua dell'intera pianta (Escalona et al. 2013;). Questo fenomeno descritto è stato riscontrato anche in Fig. 39 A e B del Cap. 2.12 dove nel periodo dal 4 all'11 Settembre 2023 l'andamento del flusso traspirativo (Fig.39 A) di una tesi irrigua a doppia ala gocciolante a una riduzione di SWC media dell'umidità del suolo dell'1,5% circa nel profilo 0-30 cm si innescava un fenomeno di traspirazione notturna e il TWP a predawn tende a non raggiungere lo zero (Fig.39 B), la pianta, quindi, traspira anche di notte per aumentare la reidratazione. Tale fenomeno scompare dal quando il TWP a predawn ritorna a valori ottimali e l'umidità del suolo torna prossima al 50% a seguito di un aggiustamento del volume irriguo da 45 a 60 m³ ha⁻¹.

1.16 Effetti del frazionamento dei volumi irrigui

Nel capitolo 1.13.2 dall'analisi preliminare degli andamenti traspirativi medi della tesi C è stata sottolineata l'importanza di indagare riguardo alla strategia di somministrazione dei volumi irrigui. In particolare valutare gli effetti di un unico o più interventi giornalieri sui flussi traspirativi giornalieri. te di circa

La Fig 13 mette a confronto i flussi traspirativi delle tesi sperimentali C e I con le proprie umidità del suolo mediate per i profili 0-30 e 30-60 cm gestite con una diversa strategia irrigua basata sulla differenziazione del numero di interventi irrigui giornalieri a parità di volume erogato misurati in condizioni di alto e basso VPD rispettivamente H-VPD e L-VPD.

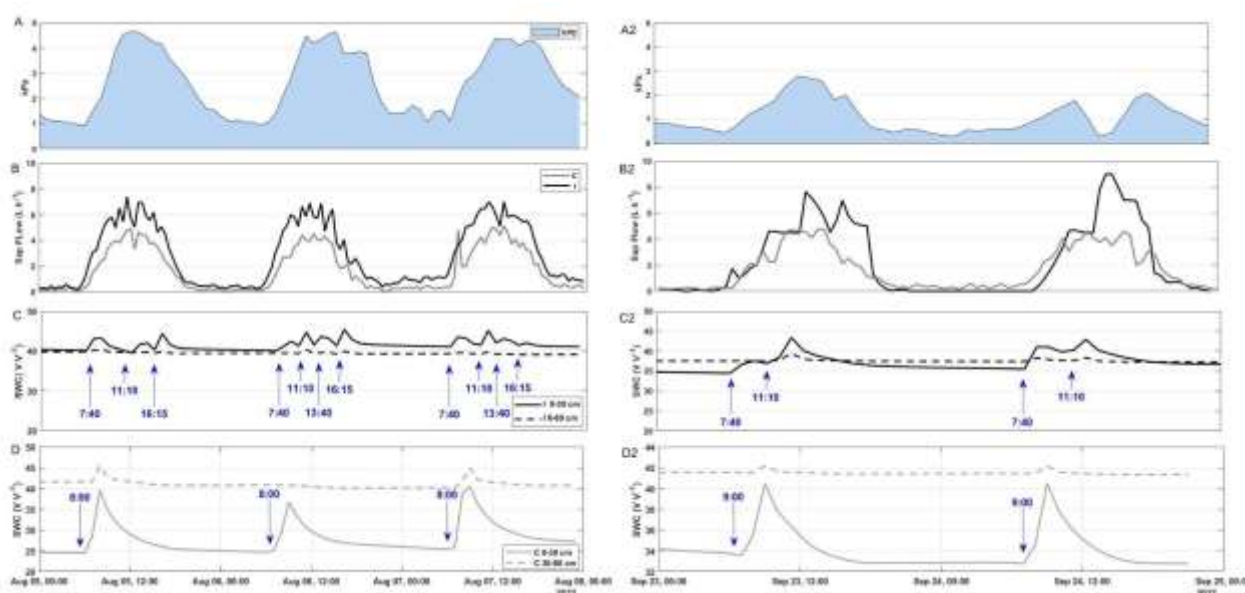


Fig. 13 Confronto delle strategie irrigue seguite nelle tesi C e I in giorni ad elevato H-VPD (A) e basso L-VPD (A2), andamento dei flussi traspirativi medi delle tesi C e I in H-VPD (B) e L-VPD (B2), andamenti delle umidità medie degli strati 0-30 cm e 0-60 cm per la tesi I in H-VPD (C) e L-VPD(C1) e andamenti delle umidità medie degli strati 0-30 e 30-60 cm per la tesi C a H-VPD (D) e L-VPD (D1) per la stagione irrigua 2022.

1.16.1 Frazionamento del volume irriguo in H-VPD

In Fig. 13 A è riportato l'andamento misurato in continuo (con timing orario) di VPD per i giorni 5, 6 e 7 Agosto della stagione irrigua 2022, tali giorni sono uguali per valori massimi di VPD pari a 4,6 kPa circa e per integrali delle aree sottese dalla curva (rispettivamente 3640,3666 e 3950 unità minuto^{-1}) nella fascia oraria tra le 11:00 e le 14:00, in accordo con altri autori che descrivono i valori soglia da 2,70 a 3,92 kPa come giornate ad alto VPD (Rashid et al., 2018; Leonardi et al., 2000; Li et al., 2018;) i giorni dal 5 al 7 Agosto 2022 sono stati identificati come tali giornate. In Fig.13 B è riportato l'andamento dei flussi traspirativi della tesi C e I misurato in continuo in condizioni di H-VPD, l'andamento delle due tesi appare differenziato a livello traspirativo, dove la tesi C raggiunge il picco massimo traspirativo di 4,88 L h^{-1} alle ore 12:05 del

5 Agosto; diversamente le piante della tesi I mostrano picchi traspirativi quasi costanti nei tre giorni di circa 7 L h^{-1} .

A parità di condizioni ambientali nel periodo 5 - 7 Agosto 2022 le due tesi irrigue si differenziano unicamente per il timing di distribuzione del volume irriguo giornaliero di $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ suddiviso in tre interventi (rispettivamente alle ore 7:40, 11:10 e 16:15) il giorno 5 e in quattro interventi irrigui (rispettivamente alle ore 7:40, 11:10, 13:40 e 16:15) i giorni 6 e 7 Agosto per il trattamento I (Fig 13. C) e in un unico intervento alle ore 8:00 nel trattamento C (Fig 13. D), ben messo in evidenza dai picchi delle umidità del suolo in corrispondenza delle irrigazioni. I valori di umidità del suolo monitorata nelle tesi I e C (Fig. 13 C, D) evidenziano come l'unico intervento effettuato alle 8:00 nella C tende ad aumentare l'umidità anche negli strati profondi di 30 - 60 cm a causa di percolazione del volume irriguo per i giorni 5 e 7 Agosto, dove l'umidità in profondità varia dal 40 al 45%. Considerando che il 95% circa delle radici assorbenti fini del actinidia è situata, per terreni ben drenati, nello strato di suolo di 0-25 cm (Hughes et al., 1989) tale volume non risulta utile alla coltura. Questo risultato è in accordo con Clothier e Green, (1994), che sostengono una maggiore efficienza idrica ottenuta attraverso l'applicazione di minori quantità di acqua di irrigazione ma con maggiore frequenza.

1.16.2 Frazionamento del volume irriguo in L-VPD

La Fig. 13 A2 mostra l'andamento dei flussi traspirativi (Fig.13 B2) e delle umidità per le tesi C e I in condizioni di basso VPD (L-VPD) registrate nei giorni 23 e 24 settembre 2022 per valori massimi giornalieri di 2,78 e 2,07 kPa con rispettive integrali di 1678 e 1352 unità minuto^{-1} (Fig. 13 C2 e D2).

Il giorno 23 Settembre la condizione di VPD rientra in una condizione media di transizione dove c'è una riduzione importante nel picco a midday del VPD di 1,92 kPa rispetto ai giorni in Fig 13 A. Tale differenza è molto più marcata il giorno 24 Settembre dove raggiunge addirittura un delta a midday di 4,35 kPa rispetto ai valori medi dei giorni della Fig. 13 A.

Analizzando la Fig. 13 C2 e D2 è possibile notare che gli interventi irrigui giornalieri di $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ sono distribuiti in unico intervento nella tesi C alle ore 9:00 (Fig. 13 D2) e in due interventi per la tesi I alle ore 7:40 e 11:10 (Fig. 13 C2). Poiché era stata superata la data di raccolta, la strategia irrigua mirava al mantenimento dell'attività fisiologica delle piante per favorire l'accumulo delle riserve utili durante la schiusura delle gemme dell'anno successivo e per i momenti di massima richiesta da parte dei sink della pianta (accrescimento dei frutti e germogli). Anche in tale condizione, i flussi traspirativi delle tesi C e I (Fig. 13 B2) tendono a differenziarsi, in particolare nel giorno 24 Settembre dove in corrispondenza del basso valore di VPD a midday di 0,27 kPa la tesi I raggiunge un valore traspirativo di 9 L h^{-1} , rispetto ai $4,09 \text{ L h}^{-1}$ della C.

Dal confronto dei flussi traspirativi in condizioni di H-VPD e L-VPD delle tesi C e I deriva che, a livello traspirativo, è presente una differenza, tale condizione tende a non modificarsi in risposta al VPD, in quanto permane anche in giornate dove la domanda traspirativa è alta, questo è spiegato dalla diversa strategia irrigua seguita in C e I, differenziata dal numero di interventi irrigui giornalieri che riescono a garantire una maggiore efficienza idrica e performance della pianta (Dichio et al., 2024 in stampa, Clothier e Green, 1994;).

1.17 I volumi stagionali sperimentali

La gestione irrigua applicata nelle tesi tramite le correzioni al bilancio secondo il metodo in Cap.1.6, ha modificato nei tre anni di sperimentazione il volume irriguo somministrato durante le diverse fasi fenologiche. Seguendo questo approccio il $IV_{stimato}$ degli anni 2021, 2022, 2023 e 2024 derivante dal bilancio idrico calcolato dall' ET_c tramite i K_c del libro n° 66 FAO (Xiloyannis et al. 2012), ha subito le variazioni riportate in tabella 5:

Tab. 5 : Volumi irrigui derivanti dal bilancio idrico utilizzando i K_c FAO ($IV_{stimato}$) e dal bilancio sperimentale UniBas (IV_{exp}) per gli anni 2021, 2022, 2023 ,2024 per le tesi spruzzatori.

Volumi (IV)	2021	2022	2023	2024	MEDIA 21-24
Stimato ($m^3 ha^{-1}$)	8596	9053	8755	9044	8862
Sperimentale($m^3 ha^{-1}$)	6160	6133	6075	6690	6264

Dal confronto dei volumi irrigui utilizzati nelle tesi C e I con quelli stimati hanno subito una riduzione del 28, 32, 30 e 26% per le stagioni irrigue 2021, 2022, 2023 e 2024, con una riduzione media nei 4 anni dello sperimentale del circa 30% in meno di volume rispetto al teorico. (Fig.15 e Tab. 5).

A parità di volumi irrigui distribuiti nelle due gestioni durante gli anni 2021- 2024, le sonde di umidità del suolo hanno evidenziato differenze nel contenuto idrico del suolo a diverse profondità, a seguito della diversa strategia irrigua seguita tra C e I. L'ottimizzazione dei volumi e della distribuzione dell'irrigazione può essere ottenuta attraverso il monitoraggio dello stato idrico del suolo lungo tutto il profilo, che consente di regolare la programmazione irrigua, aumentando o diminuendo i volumi e suddividendo gli interventi irrigui, per garantire condizioni ottimali per l'attività dell'apparato radicale (Dichio et al., in stampa).

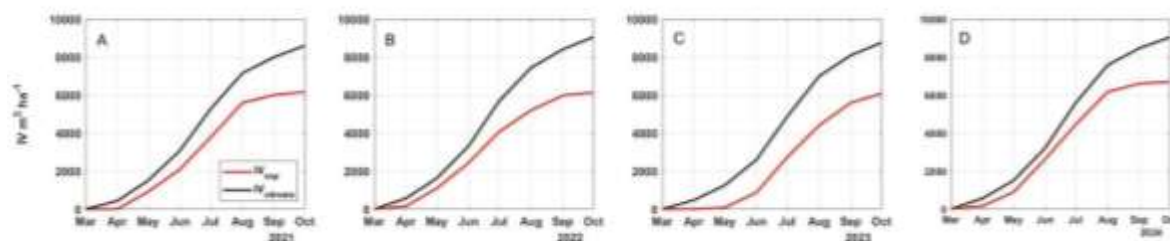


Fig. 14 : Andamento cumulato dei volumi irrigui stimati ($IV_{stimato}$) e sperimentali (IV_{exp}) applicati durante le stagioni irrigue 2021, 2022, 2023 e 2024.

1.18 Analisi delle produzioni

Per le tesi C e I sono state determinate le produzioni annuali per le parcelle sperimentali e riportate all'ettaro, le modalità di determinazione sono quelle riportate nel Cap 1.11.

La tesi aziendale (A) nel 2021 non è stata raccolta quindi i dati disponibili mostrano le produzioni dall'anno 2022 al 2024. Come mostrato nella tabella 6.1 tra le diverse tesi negli anni dal 2021 al 2023 non sussistono differenze statistiche nella produzione tramite test ANOVA (Tab. 6.1), mentre per l'anno 2024 le differenze tra le tesi I, C e A sono statisticamente significative, in particolare tra l'aziendale e la tesi spruzzatore sperimentale che presentano una differenza di 35 Ql ha⁻¹.

Tab. 6 : Produzioni delle tesi C, I e della parcella azienda (A)

Tesi	2021	2022	2023	2024
	Q ha ⁻¹			
I	304	283	274	306
C	301	223	293	290
Aziendale	----	280	287	271

Tab. 6.1 : Analisi statistica delle produzioni mediante test ANOVA per le tesi C, I e della parcella azienda "A". Significatività dei codici $p < 0,05 = *$; $p < 0,01 = **$; $p < 0,001 = ***$

Anno	Gruppo 1	Gruppo 2	p
2021	C	I	0,83
2022	I	C	0,6
	I	A	0,6
	C	A	1
2023	I	C	0,9
	I	A	0,4
	C	A	0,47
2024	I	C	1,30E-05***
	I	A	1,23E-10***
	C	A	5,70E-06***

1.18.1 Analisi della qualità

Dalle analisi qualitative eseguite alla raccolta (Tab.7) tra le tesi C e I durante i 4 anni di prova risultano alcune differenze sui parametri qualitativi misurati alla raccolta secondo la metodologia del Cap. 1.11.2.

Tra le tesi C e I nelle stagioni 2021, 2022 e 2023 sono state riscontrate differenze della consistenza dei frutti, che non sono risultate significative nel 2024. I valori misurati per la determinazione del colore della polpa invece risultano essere variabili negli anni mostrando differenze significative per le stagioni 2022 e 2024.

I solidi solubili non si differenziano negli anni mentre la sostanza secca e il peso dei frutti hanno differenza significativa solo nella stagione irrigua 2024, sostenendo quanto riportato nella tabella 6.1.

Tab. 7 Risultati delle analisi di qualità dei frutti effettuate alla raccolta nelle tesi C e I per gli anni 2021, 2022, 2023 e 2024. Significatività dei codici ns= non significativo, $p < 0,05 = *$; $p < 0,01 = **$; $p < 0,001 = ***$.

TESI	ANNO	PESO (g)	BRIX (°Bx)	SS (%)	CONSISTENZA (kg/cm ²)	COLORE (H°)
I	2021	91,65	8,16	17,73%	6,32	105,64
C		93,40	8,72	18,25%	6,57	104,94
Significatività		ns	**	***	**	ns
I	2022	97,94	9,64	18,72%	6,41	104,37
C		88,79	11,52	19,4%	6,00	101,84
Significatività		ns	***	**	*	**
I	2023	123,25	8,39	17,54%	6,18	102,82
C		127,89	8,10	16,83%	5,92	105,05
Significatività		ns	***	***	*	ns
I	2024	138,19	9	20,89%	7,8	108,14
C		125,53	7,8	20,97%	9,0	106,31
Significatività		*	**	ns	ns	**

1.19 Determinazione dei K_c per *Actinidia chinensis* var. *chinensis* negli ambienti mediterranei.

Dal metodo di bilancio idrico ottimizzato e quindi dai volumi irrigui aggiustati settimanalmente tramite le sonde di umidità, per quattro stagioni irrigue dal 2021 al 2024 sono stati determinati gli ET_c annui coretti utilizzati tramite la procedura riportata nel paragrafo 1.11 per la stima di K_c utili all'actinidia negli areali del Mediterraneo.

I IV_{exp} ridotti cumulati rispetto al $IV_{stimato}$ mostrati in Tab.5 hanno determinato nuovi valori annui di ET_{c-exp} riportati in Tab.7, da cui secondo la procedura spiegata nel Cap. 1.12 sono stati calcolati i K_{c-exp} come valori medi delle stagioni 2021-2024 (Tab.9). Il metodo utilizzato per mediare i K_c stagionali ha previsto il rapporto tra le somme di ET_c e ET_0 determinate per singolo mese e non la media derivante dai rapporti dei valori giornalieri di questi.

Tab. 8 Sintesi dei parametri utilizzati per la determinazione dei K_c sperimentali

Mese	2021			2022			2023			2024		
	ET_0	ET_{c-exp}	PU	ET_0	ET_{c-exp}	PU	ET_0	ET_{c-exp}	PU	ET_0	ET_{c-exp}	PU
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Aprile	87,9	26,23	67,78	107,9	0,0	0,0	95,9	7,86	78,56	111,04	17,11	14,31
Maggio	145,6	99,75	0,0	145,3	100,7	7,01	109,1	26,30	167,85	129,64	70,74	23,44
Giugno	168,5	115,09	10,94	182,3	124,7	30,59	153,2	93,65	110,03	181,57	165,30	0,00
Luglio	194,0	148,72	62,17	205,7	158,0	0,0	196,3	176,24	0,00	208,04	175,07	12,21
Agosto	170,3	157,06	74,38	164,6	129,9	106,52	183,7	158,18	0,00	172,82	163,49	10,38
Settembre	107,9	44,26	44,39	117,2	59,96	18,24	130,9	118,28	0,00	112,17	78,65	59,79
Ottobre	72,6	15,51	12,63	78,7	37,9	245,45	81,4	49,11	35,08	71,76	16,77	82,24
TOTALE	946,8	606,62	272,3	1001,7	611,16	407,81	950,5	623,62	391,52	887,58	687,14	202,38

Tab. 9 Valori finali dei K_c sperimentali determinati dalla gestione ottimizzata per *A. chinensis* var. *chinensis* nelle stagioni 2021,2022,2023 e 2024

Mese	K_{c-exp}				ET_0	ET_{c-exp}	PU	K_{c-exp}
					(mm)	(mm)	(mm)	
	2021	2022	2023	2024	Media 2021-2024			
Aprile	0,3	0,0	0,08	0,15	100,69	13,19	5,67	0,13
Maggio	0,69	0,69	0,24	0,55	132,42	70,02	6,99	0,56
Giugno	0,68	0,68	0,61	0,91	171,41	125,27	5,35	0,73
Luglio	0,77	0,77	0,90	0,84	200,99	169,24	2,62	0,82
Agosto	0,92	0,79	0,86	0,95	172,86	156,02	6,10	0,88
Settembre	0,41	0,51	0,90	0,70	117,03	75,56	8,43	0,64

Ottobre	0,21	0,48	0,60	0,23	76,12	30,95	9,91	0,39
					971,53	640,25	45,05	TOTALI

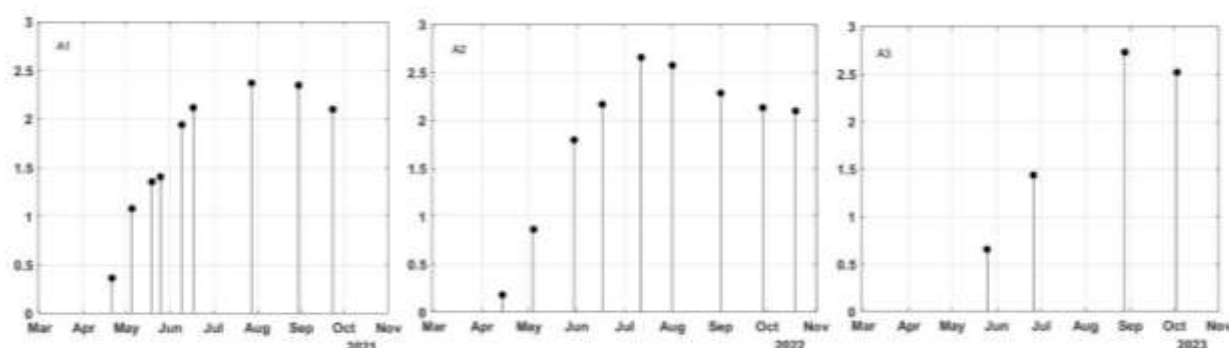


Fig. 15: Andamento dell'indice di superficie fogliare LAI per le stagioni 2021, 2022 e 2023 rispettivamente A1, A2, A3.

Conclusioni

La metodologia del bilancio idrico integrato alla tecnologia dei sensori contribuisce ad una gestione dell'irrigazione molto accurata. La scarsità della risorsa idrica rappresenta una delle principali sfide dell'agricoltura contemporanea (Mininni et al. 2022). La possibilità di ridurre le quantità di acqua utilizzate in agricoltura riuscendo a mantenere invariate le performance produttive delle piante risulta essere essenziale, ma un gestione come quella proposta non incide solo sul risparmio idrico, ma rende possibile anche la distribuzione precisa del volume di irrigazione durante la stagione, al fine evitare fenomeni estremi di deficit idrico o di ristagno d'acqua (Zhang et al., 2004), dove la saturazione o la sovrasaturazione della capacità di ritenzione idrica del suolo può facilmente diventare uno dei principali stress abiotici subiti dalle colture vegetali, con conseguente riduzione della produzione (Xing et al. 2024). Seppur l'integrazione delle sonde di umidità del suolo al bilancio è il primo passo per l'irrigazione di precisione risulta essere altrettanto importante sostenere le modifiche volumetriche applicate con la consultazione continua delle variabili ambientali e dei parametri fisiologici della pianta. Questo è un fattore importante per *A. chinensis* var. *chinensis* in quanto è stato appurato che rientra nelle colture che secondo Pereira et al., 2020 mancano di specifici K_c per la determinazione dei tassi traspirativi inoltre a seguito della veloce espansione geografica di questa coltura in ambienti a condizioni diverse da quelle originarie di coltivazione devono essere periodicamente adattati alle condizioni sito - specifiche.

Bibliografia

Aghelpour, P., & Norooz-Valashedi, R. (2022). Predicting daily reference evapotranspiration rates in a humid region, comparison of seven various data-based predictor models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(12), 4133–4155. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02249-4>

Ahansal, Y., Bouziani, M., Yaagoubi, R., Sebari, I., Sebari, K., & Kenny, L. (2022). Towards Smart Irrigation: A Literature Review on the Use of Geospatial Technologies and Machine Learning in the Management of Water Resources in Arboriculture. In *Agronomy* (Vol. 12, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020297>

Allen, R. G., & Pereira, L. S. (1998). *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*.

Alpana Shukla, Harsh Panchal, Mayank Mishra, P. R. Patel, H.S. Srivastava, Parul Patel, A.K. Shukla M. G. Science Institute, Navrangpura, Ahmedabad, Gujarat (2014). Soil Moisture Estimation using Gravimetric Technique and FDR Probe Technique: A Comparative Analysis *American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences* . Pag 89 – 92 AIJRFANS 14- 465;

Alton, P. B. (2016). The sensitivity of models of gross primary productivity to meteorological and leaf area forcing: A comparison between a Penman-Monteith ecophysiological approach and the MODIS Light-Use Efficiency algorithm. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.010>

Al-Yahyai, R. (2012) Managing irrigation of fruit trees using plant water status. *Agricultural Sciences*, 3, 35-43.

Abrisqueta I, Conejero W, Valdés-Vela M, Vera J, Ortuño M F, Ruiz-Sánchez M C (2015). Stem water potential estimation of drip-irrigated early-maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Comput Electron Agric* 114: 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.004>

Arnell, N. W. (1999). A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain.

Asner, G. P., Braswell, B. H., Schimel, D. S., & Wessman, C. A. (1998). Ecological research needs from multiangle remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 63(2), 155–165. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00139-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00139-9)

Begg JE, Turner NC (1970) Water potential gradients in Weld tobacco. *Plant Physiol* 46:343–346

Beppu, K., Ogihara, Y., Ohtani, M. and Kataoka, I. (2022). Comparison of waterlogging tolerance between *Actinidia macrosperma* and *Actinidia deliciosa*. *Acta Hort.* 1332, 219-226.

Blanco, V., & Kalcsits, L. (2021). Microtensiometers accurately measure stem water potential in woody perennials. *Plants*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/plants10122780>

Boussetta, S., Balsamo, G., Beljaars, A., Kral, T., & Jarlan, L. (2013). Impact of a satellite-derived leaf area index monthly climatology in aglobal numerical weather prediction model. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10), 3520–3542.

Bréda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2403–2417.

Calabritto, M., Mininni, A. N., di Biase, R., Pietrafesa, A., & Dichio, B. (2024). Spatio-temporal dynamics of root water uptake and identification of soil moisture thresholds for precision irrigation in a Mediterranean yellow-fleshed kiwifruit orchard. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1472093>

Di Biase, R., Calabritto, M., Pietrafesa, A., Laterza, D., Mininni, A. N., & Dichio, B. (2023, January). Continuous monitoring of trunk water potential by microtensiometers as a tool to assess kiwifruit plant water status under different irrigation systems. In *X International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 1409* (pp. 111-120).

Cardenas-Lailhacar, B., & Dukes, M. D. (2010). Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. *Agricultural Water Management*, 97(5), 666–672. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.009>

Chalmers DJ, Mitchell PD, Vanheek L (1981) Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J Am Soc Hortic Sci* 106:307–312

Chartzoulakis, K., Michelakis, N. and Vougioukalou, E. (1991). Growth and production of kiwi under different irrigation systems. *Fruits*, 46(1), 75-81.

Chartzoulakis, K., Noitsakis, B. and Therios, I. (1993). Photosynthesis, plant growth and dry matter distribution in kiwifruit as influenced by water deficits. *Irrigation science*, 14(1), 1-5.

Clearwater, M. J., Lowe, R. G., Hofstee, B. J., Barclay, C., Mandemaker, A. J. and Blattmann, P. (2004). Hydraulic conductance and rootstock effects in grafted vines of kiwifruit. *J Exp Bot*, 55:401, 1371–1382,

Clothier, B. E. and Green, S. R. (1994). Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 25(1), 1-12.

Coelho, M.B., Villalobos, F.J., Mateos, L., (2003) Modeling root growth and the soil–plant–atmosphere continuum of cotton crops. *Agric. Water Manage.* 60, 99–118.

Cohen M, Fuchs M and Green G C (1981) Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environ.* 4, 391–397.

Cradock-Henry, N.A. (2017). New Zealand kiwifruit growers' vulnerability to climate and other stressors. *Reg Environ Change* 17, 245–259.

Dalton FN, Herkelrath WN, Rawlins DS, Rhoades JD (1984) Time domain reflectometry: simultaneous in-situ measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224: 989–990

Dixon MA, Tyree MT (1984) A new stem hygrometer, corrected for temperature-gradients and calibrated against the pressure bomb. *Plant Cell Environ* 7:693–697

Doltra J, Oncins JA, Bonany J, Cohen M (2007) Evaluation of plant based water status indicators in mature apple trees under arid conditions. *Irrig Sci* 25:351–359

Dukes, M.D., (2005). Residential irrigation water use and control. In: Trimble, S.W., Stewart, B.A., Howell, T.A. (Eds.), *Encyclopedia of Water Science*. Marcel Dekker, New York, NY, doi:10.1081/E-EWS-120041736.

Escalona, J. M., Fuentes, S., Tomás, M., Martorell, S., Flexas, J., & Medrano, H. (2013) Responses of leaf night transpiration to drought stress in *Vitis vinifera* L. *Agricultural Water Management*, 118, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.018>

Ferreira, M.I. (2017). Stress coefficients for soil water balance combined with water stress indicators for irrigation scheduling of woody crops. *Horticulturae* 3 (2), 38 <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020038>.

Fereres, E., Goldhamer, D., (1990) Deciduous fruit and nut trees. In: Stewart, B.A., Nielsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph No. 30. American Society of Agronomy, Madison, pp. 987–1017.

Fereres E, Evans RG (2006) Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrig Sci* 24:55–57

Ferguson, A.R. (1984). Kiwifruit: a botanical review. In *Horticultural reviews*, J. Janick, ed. (Avi Publishing Company, Inc., Connecticut), p. 1-64.

Ferguson, A. R. (2013). Kiwifruit. *The Wild and the Cultivated Plants*. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 68, pp. 15–32). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394294-4.00002-X>

Ferguson, A. R., Huang, H. and Costa, G. (2023). History of Kiwifruit: Evolution of a Global Crop. In *Kiwifruit: Botany, Production and Uses*, A. C. Richardson, J. N. Burdon, A. R. Ferguson, eds. (CAB International, Boston), p. 1-15.

Fernández, J.E. (2017). Plant-based methods for irrigation scheduling of woody crops. *Horticulturae* 3 (2), 35 <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020035>.

Fernández, J.E., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V. and Cuevas, M.V. (2019). Does precision irrigation help to reduce water consumption in agriculture?. *Acta Hortic.* 1253, 199-206

- Fraser, G. W., Canham, C. D., & Lertzman, K. P. (1999). Gap light analyser (GLA): imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser Univ., Burnaby, Canada, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.
- G. Carbone, G. Montanaro, P. Pecora, C. Xiloyannis, B. Dichio (2009). Irrigation water demand and management for kiwifruit orchard located in Lazio region. *Italus Hortus*, 2009, Vol. 16, No. 5, 111-113 ref. 7.
- Gao, B., Yuan, S., Guo, Y., Zhao, Z. (2022). Potential geographical distribution of *Actinidia* spp. and its predominant indices under climate change. *Ecological Informatics*, 72, 101865.
- García, I. F., Lecina, S., Ruiz-Sánchez, M. C., Vera, J., Conejero, W., Conesa, M. R., Domínguez, A., Pardo, J. J., Lélis, B. C., & Montesinos, P. (2020). Trends and challenges in irrigation scheduling in the semi-arid area of Spain. *Water* (Switzerland), 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030785>
- García-Tejera, O., López-Bernal, Á., Orgaz, F., Testi, L., & Villalobos, F. J. (2021). The pitfalls of water potential for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 243.
- Garnier E, Berger A (1985) Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *J Hortic Sci* 60:47–56 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106522>
- González-Altozano, P., Pavel, E. W., Oncins, J. A., Doltra, J., Cohen, M., Paço, T., Massai, R., & Castel, J. R. (2008). Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. *Agricultural Water Management*, 95(5), 503–515. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.11.008>
- Goldhamer DA (2003) Irrigation scheduling with plant indicators: measurement. In: Stewart BA, Howell TA (eds) *Encyclopedia of water science*. Marcel Dekker, New York, pp 519–522
- Ghrab, M., Masmoudi, M. M., Mimoun, M. B., & Mechlia, N. B. (2013). Plant-and climate-based indicators for irrigation scheduling in mid-season peach cultivar under contrasting watering conditions. *Scientia Horticulturae*, 158, 59-67.
- Green, S.R., and B.E. Clothier (1988). Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *J. Exp. Bot.* 39:115–123.
- Green S R, McNaughton K J and Clothier B E (1989) Observations of night-time water use in kiwifruit vines and apple trees. *Agric. For. Meteorol.* 48, 251-261.
- Green, S. R. and Clothier, B. E. (1995). Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and soil*, 173(2), 317-328.
- Green, S. R., Kirkham, M. B., & Clothier, B. E. (2006). Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigation. In *Agricultural Water Management* (Vol. 86, Issues 1–2, pp. 165–176). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.008>

Green, S.R., Clothier, B.E., and Perie, E. (2009). A re-analysis of heat-pulse theory across a wide range of sap flows. *Acta Hort.* 846, 95–104 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.846.8>.

Green, S., McNaughton, K., Wünsche, J.N., Clothier, B., (2003). Modeling light interception and transpiration of apple tree canopies. *Agron. J.* 95, 1380–1387. Green, S.R., Clothier, B.E., 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat- pulse technique. *J. Exp. Bot.* 39, 115–123.

Green, S.R., McNaughton, K.G., Clothier, B.E., (1989) Nocturnal water use by kiwifruit and apples. *Agric. For. Meteorol.* 48, 251–261.

Green, S., Reyes, F., Dichio, B., Mastroleo, M. and Xylogiannis, E. (2022). Water use of yellow-fleshed kiwifruit during an annual cycle. *Acta Hort.* 1332, 187-194 DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.25 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1332.25>

Gucci, R., Massai, R., Xiloyannis, C. and Flore, J. A. (1996). The effect of drought and vapour pressure deficit on gas exchange of young kiwifruit (*Actinidia deliciosa* var. *deliciosa*) vines. *Ann.Bot.* 77: 605-613.

Gucci, R., Massai, R. and Xiloyannis, C. (1997). Mechanisms of drought avoidance in kiwifruit vines. *Acta Hort.* 444, 311-316.

Hazarika, B. N., Angami, T., Parthasarathy, V. A. (2022). Kiwifruit. In *Fruits: Tropical and Subtropical*, S.K. Mitra, B. Ghosh, I. Chakraborty, D. Sanyal, D. Majhi, eds., p. 391-457.

Hoekstra P, Delaney A (1974) Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J Geophys Res* 79:1699–1708

Holzappel, E. A., Merino, R., Mariño, M. A., & Matta, R. (2000). Water production functions in kiwi. *Irrigation Science*, 19(2), 73.

Hooper, R. P., A. Stone, N. Christophersen, E. de Grosbois, and H. M. Seip(1988), Assessing the Birkenes model of stream acidification using amultisignal calibration methodology, *Water Resour. Res.*, 24, 1308 –1316

Howell,T.A.,Schneider,A.D.,Dusek,D.A.,Marek,T.H.,Steiner,J.L.,(1995a). Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. *Trans. ASAE* 38 (4), 1019–1024.

Howell, T.A., Steiner, J.L., Schneider, A.D., Evett, S.R., (1995b). Evapotranspiration of irrigated winter wheat—Southern High Plains. *Trans. ASAE* 38 (3), 745–759.

Hu, Z., Bashir, R. N., Rehman, A. U., Iqbal, S. I., Shahid, M. M. A., & Xu, T. (2022). Machine Learning Based Prediction of Reference Evapotranspiration (ET₀) Using IoT. *IEEE Access*, 10, 70526–70540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187528>

Hughes, K. A., & Wilde, R. H. (1989). The effect of poor drainage on the root distribution of kiwifruit vines. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 17(3), 239–244. <https://doi.org/10.1080/01140671.1989.10428038>

Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y., Pelloux, G., (1992). Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 67, 631–640.

Hupet, F., Lambotr, S., Javaux, M., Vanclooster, M., (2002) On the identification of macroscopic root water uptake parameters from soil water content observations. *Water Resour. Res.* 38 (12), 1300, doi:10.1029/2002WR001556.

Husken, D., Steudle, E., & Zimmermann, U. (1978). Pressure Probe Technique for Measuring Water Relations of Cells in Higher Plants'. In *Plant Physiol.* <https://academic.oup.com/plphys/article/61/2/158/6076237>

Intrigliolo DS, Castel JR (2004) Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrig Sci* 23:93–102

Intrigliolo D S, Castel J R (2006). Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agric Water Manag*, 83:173–180. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.12.005>

Jamal, S. M., Yadav, R. K., & Dayal, J. (2024). Innovative soil management technologies for a changing climate. In *Transforming Agricultural Management for a Sustainable Future: Climate Change and Machine Learning Perspectives* (pp. 203–213). Cham: Springer Nature Switzerland.

Jarlan, L., Balsamo, G., Lafont, S., Beljaars, A., Calvet, J. C., & Mougin, E. (2008). Analysis of leaf area index in the ECMWF land surface model and impact on latent heat and carbon fluxes: Application to West Africa. *Journal of Geophysical Research*, 113, D24117. <https://doi.org/10.1029/2007JD009370>

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., (1990). Evaporation and irrigation water requirements. *ASCE Manuals and Reports on Eng. Practices* No. 70, Am. Soc. Civil Eng., New York, NY, 360 pp.

Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 19–35.

Jones HG (1990) Plant water relations and implications for irrigation scheduling. *Acta Hort* 278:67–76

Jones HG (2004) Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J Exp Bot* 55:2427–2436

Jones HG (2007) Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *J Exp Bot* 58:119–130

Karim, F., Karim, F., & Frihida, A. (2017). Monitoring system using web of things in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 110, 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.083>

Lampinen BD, Shackel KA, Soutwick SM, Olson WH, DeJong TM (2001) Leaf and canopy level photosynthetic responses of French prune (*Prunus domesitca* L. 'French') to stem water potential based on deWcit irrigation. *J Am Soc Hortic Sci* 79:638–644

Lampinen BD, Shackel KA, Soutwick SM, Olson WH, Yeager JT (1995) Sensitivity of yield and fruit quality of French prune to water deprivation at different fruit growth stage

Leonardi, C., Guichard, S., & Bertin, N. (2000). High vapour pressure de@cit in~uences growth, transpiration and quality of tomato fruits

Lertzman, K. P., Frazer, G. W., Sallaway, P., & Marinakis, D. (1999). GLA Version 2.0, Users Manual and Program Documentation ii Citation Modelling and Application Design Software Engineering GLA Version 2.0, Users Manual and Program Documentation iii ACKNOWLEDGEMENTS.

Levine, J.B., Salvucci, G.D., (1999) Characteristic rate scale and timescale of supply-limited transpiration under a Richards–Cowan framework. *Water Resour. Res.* 35, 3947–3954.

Li, Y., Horton, R., Ren, T., & Chen, C. (2010). Prediction of annual reference evapotranspiration using climatic data. *Agricultural Water Management*, 97(2), 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.001>

Li, Y., Zhou, L., Wang, S., Chi, Y., & Chen, J. (2018). Leaf temperature and Vapour Pressure Deficit (VPD) driving stomatal conductance and biochemical processes of leaf photosynthetic rate in a subtropical evergreen coniferous plantation. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10114063>

Li, Z., Bai, D., Zhong, Y., Abid, M., Qi, X., Hu, C. and Fang, J. (2021). Physiological responses of two contrasting kiwifruit (*Actinidia* spp.) rootstocks against waterlogging stress. *Plants*, 10(12), 2586

Libardi, L.G.P.; de Faria, R.T.; Dalri, A.B.; de Souza Rolim, G.; Palaretti, L.F.; Coelho, A.P.; Martins, I.P. Evapotranspiration and crop coefficient (K_c) of pre-sprouted sugarcane plantlets for greenhouse irrigation management. *Agric. Water Manag.* 2019, 212, 306–316

Marek, T., Piccinni, G., Schneider, A., Howell, T., Jett, M., Dusek, D., 2006. Weighing lysimeters for the determination of crop water requirements and crop coefficients. *Appl. Eng. Agric.* 22 (6), 851–856

- McCutchan H, Shackel KA (1992) Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *J Am Soc Hortic Res* 117:606–611
- Mian, G., Cipriani, G., Saro, S., Martini, M., & Ermacora, P. (2022). Potential of different *Actinidia* genotypes as resistant rootstocks for preventing kiwifruit vine decline syndrome. *Horticulturae*, 8(7), 627
- Mininni, A.N., Laterza, D., Tuzio, A.C., Di Biase, R. and Dichio, B. (2022). Soil water content monitoring as a tool for sustainable irrigation strategy in a kiwifruit orchard under semi-arid conditions. *Acta Hortic.* 1332, 203-210
- Mininni, A. N., Di Biase, R., Calabritto, M., Pietrafesa, A., Laterza, D., & Dichio, B. (2024). Continuous monitoring of stem water potential by microtensiometers as a tool to assess plant water status under different irrigation scheduling in kiwifruit. *ACTA HORTICULTURAE*.
- Montanaro, G., Dichio, B. and Xiloyannis, C. (2007). Response of photosynthetic machinery of field-grown kiwifruit under Mediterranean conditions during drought and re-watering. *Photosynthetica*, 45(4), 533-540
- Montanaro, G., Dichio, B. and Xiloyannis, C. (2009). Shade mitigates photoinhibition and enhances water use efficiency in kiwifruit under drought. *Photosynthetica*, 47, 363-371
- Mroczkowski, M., R. G. Paul, and G. Kuczera (1997), The quest for more powerful validation of conceptual catchment models, *Water Resour. Res.*, 33, 2325 – 2335
- Naor A, Klein I, Doron I (1995) Stem water potential and apple size. *J Am Soc Hortic Sci* 120:577–582
- Naor A, Wample RL (1996) Diurnal internodes growth rate in Weld grown ‘Concord’ (*Vitis labruscana*) grapevines. *J Am Soc Hortic Sci* 71:167–171
- Naor A, Gal Y, Bravdo B (1997) Crop load affects assimilation rate, stomata conductance, stem water potential and water relations of Weld-grown Sauvignon Blanc grapevines. *J Exp Bot* 314:675–1680
- Olivo N (2007) Diagnóstico del estado hídrico de la viña (*Vitis vinifera* L.) y puesta a punto del potencial hídrico de tallo como indicador para la programación de riego. Ph.D Thesis, University of Lleida, pp 53
- Naor A, Klein I, Doron I, Gal Y, Ben-David Z, Bravdo B (1997) The effect of irrigation and crop load on stem water potential and apple fruit size. *J Hortic Sci* 72:765–771
- Naor A (1998) Relations between leaf and stem water potentials and stomata conductance in three Weld-grown woody species. *J Hortic Sci Biotechnol* 73:431–436
- Naor A, Klein I, Hupert H, Greenblat Y, Peres M, Kaufman A (1999) Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution and water potentials. *J Am Soc Hort Sci* 124:189–193

Naor A, Cohen S (2003) Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from Weld-grown apple trees. *HortScience* 38:547–551

Naor A (2006) Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. In: Janick J (ed) *Horticultural reviews*, vol 32. Wiley, New York, pp 111–165

Pagay, V., Santiago, M., Sessoms, D.A., Huber, E.J., Vincent, O., Pharkya, A., Corso, T.N., Lakso, A.N., Stroock, A.D., 2014. A microtensiometer capable of measuring water potentials below 10 MPa. *Lab Chip* 14, 2806–2817. <https://doi.org/10.1039/>

Pereira, L. S., Paredes, P., Cholpankulov, E. D., Inchenkova, O. P., Teodoro, P. R., & Horst, M. G. (2009). Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management*, 96(5), 723-735.

Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. In *Agricultural Water Management* (Vol. 147, pp. 4–20). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>

Pereira, H., & Marques, R. C. (2017). An analytical review of irrigation efficiency measured using deterministic and stochastic models. *Agricultural Water Management*, 184, 28-35

Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. (2020). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual K_c approach. In *Agricultural Water Management* (Vol. 241). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>

Pinto, T., Vilela, A. (2018). Kiwifruit, a botany, chemical and sensory approach a review. *Adv. Plants Agric. Res*, 8(6), 383-390

Poblete-Echeverría, C. A., & Ortega-Farias, S. O. (2013). Evaluation of single and dual crop coefficients over a drip-irrigated Merlot vineyard (*Vitis vinifera*L.) using combined measurements of sap flow sensors and an eddy covariance system. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19(2), 249–260. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12019>

Rajput, J., Singh, M., Lal, K. (2024). Data-driven reference evapotranspiration (ET₀) estimation: a comparative study of regression and machine learning techniques. *Environ Dev Sustain* 26, 12679–12706 <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03978-4>

Rashid, M. A., Andersen, M. N., Wollenweber, B., Zhang, X., & Olesen, J. E. (2018). Acclimation to higher VPD and temperature minimized negative effects on assimilation and grain yield of wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.018>

S.R. Green and B.E. Clothier (1995) Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. In *Plant and Soil* (Vol. 173)

Savé, R. and Serrano, L. (1986). Some physiological and growth responses of kiwi fruit (*Actinidia chinensis*) to flooding. *Physiologia Plantarum*, 66: 75-78

Schaake, J. C., Koren, V. I., Duan, Q. Y., Mitchell, K., & Chen, F. (1996). Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 101(D3), 7461–7475. <https://doi.org/10.1029/95JD02892>

Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., Yeager, J., (1997) Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTech* 7, 23–29

Shackel KA (2007) Water relations of woody perennial plant species. *J Int Sci Vigne Vin* 41:121–129

Sharma, A., Thapa, S., & Khatiwada, M. P. (2020). Production, marketing and future prospects of kiwifruit in Nepal. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 8(2), 179-186

Smith, G. S., Judd, M. J., Miller, S. A. and Buwalda, J. G. (1990). Recovery of kiwifruit vines from transient waterlogging of the root system. *New phytologist*, 115(2), 325-333

Schneider, A.D., Howell, T.A., Moustafa, A.T.A., Evett, S.R., Abou-Zied, W., 1998. A simplified weighing lysimeter for monolithic or repacked soils. *Appl. Eng. Agric.* 14 (3), 267–273

Sozzi, M., Kayad, A., Ferrari, G., Zanchin, A., Grigolato, S., & Marinello, F. (2021). Connectivity in rural areas: A case study on internet connection in the Italian agricultural areas. 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, MetroAgriFor 2021 - Proceedings, 466–470. <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628665>

Strik, B. C. and Cahn, H. (1998). Growing kiwifruit

Swanson R H and Whitfield D W A (1981) A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.* 32, 221–239

Tenreiro, T. R., Jeřábek, J., Gómez, J. A., Zúmr, D., Martínez, G., García-Vila, M., & Fereres, E. (2022). Simulating water lateral inflow and its contribution to spatial variations of rainfed wheat yields. *European Journal of Agronomy*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126515>

Testolin, R., & Ferguson, A. R. (2009). Kiwifruit (*Actinidia* spp.) production and marketing in Italy. In *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* (Vol. 37, Issue 1, pp. 1–32). <https://doi.org/10.1080/01140670909510246>

Topp GC, Annan JL, Davis AP (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour Res* 16:574–582

- Torres-Ruiz, J. M.; Perulli, G. D.; Manfrini, L.; Zibordi, M.; Velasco, G. L.; Anconelli, S.; Pierpaoli, E.; Corelli-Grappadelli, L.; Morandi A, B. (2016) Time of irrigation affects vine water relations and the daily patterns of leaf gas exchanges and vascular flows to kiwifruit (*Actinidia deliciosa* Chev.). *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.166, p.101-110, dez
- Turner, N.C., (1990) Plant water relations and irrigation management. *Agricultural Water Management* 17, 59–73
- Udink ten Cate AJ, Bot GPA, van Dixhoorn JJ (1978) Computer control of greenhouse climates. *Acta Hortic* 87:265–272
- Uhlenbrook, S., J. Seibert, C. Leibundgut, and A. Rodhe (1999), Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure, *Hydrol. Sci. J.*, 44(5), 279 –299
- Wang, Y., Yang, J., & Chen, J. (2018). Potential value, status analysis, and protection strategy of wild kiwifruit genetic resources in the Yangtze River Basin. *Biodiversity Science*, 26(4), 373.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I., & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination partII: Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 37–53
- Xiloyannis, C., Massai, R., Piccotino, D., Baroni, G., and Bovo, M. (1993). Method and technique of irrigation in relation to root system characteristics in fruit growing. *Acta Hortic.* 335, 505–510 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.335.62>
- Xiloyannis, et al (2012). Crop Yield Response to Water. *Irrigation and Drainage Paper* 66 (Rome: FAO)
- Xing, L., Cui, N., Liu, C., Guo, L., Zhao, L., Wu, Z., ... & Gong, D. (2024). Estimating daily kiwifruit evapotranspiration under regulated deficit irrigation strategy using optimized surface resistance based model. *Agricultural Water Management*, 295, 108745
- Zarate-Valdez, J. L., Whiting, M. L., Lampinen, B. D., Metcalf, S., Ustin, S. L., & Brown, P. H. (2012). Prediction of leaf area index in almonds by vegetation indexes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.009>
- Zhang, Y., Kendy, E., Qiang, Y., Changming, L., Yanjun, S., and Hongyong, S. (2004). Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield and water use efficiency in the north China plain. *Agric. Water Manage.* 64 (2), 107–122 [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00201-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00201-4).
- Zhu, L., Guan, P., Liu, W., & Zheng, Y. (2023). Optimization of Lai Estimation Method Based on Smartphones with Fisheye Lens. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 17, 112–122. <https://doi.org/10.46300/9106.2023.17.14>

CAPITOLO 2: Gestione dinamica e distribuzione spaziale del volume irriguo per l'irrigazione di precisione in actinidia

INTRODUZIONE

Effetti dell'eccesso idrico in actinidia

I fenomeni di stress idrico sia per deficit che per eccesso idrico (waterlogging) stanno diventando gli stress abiotici più diffusi nei sistemi agricoli, soprattutto a causa del crescente riscaldamento globale, della irregolarità delle precipitazioni e del drenaggio insufficiente (Stuart et al., 2011). Tali condizioni influenzano il comportamento fisiologico delle colture che richiedono un uso consistente di acqua per l'irrigazione, la cui disponibilità è fortemente compromessa (Xiloyannis et al., 2012). La variabilità dei parametri climatici innescata dal cambiamento climatico influisce su diversi aspetti delle piante, modificando le fasi fenologiche e alterando i processi fisiologici, la resa e i caratteri qualitativi (Medda et al., 2022).

L'actinidia è caratterizzata da un apparato radicale poco profondo e da un elevato tasso traspirativo fogliare che sono causa della sua forte sensibilità a fenomeni di eccesso idrico (Xin et al., 2023). L'eccesso idrico può essere causato da due condizioni principali che interferiscono con l'apparato radicale e quindi con la pianta:

- La mancanza di ossigeno a livello delle radici;
- Effetti della permanenza in acqua delle radici;

Relativamente al primo effetto bisogna considerare che le piante di actinidia presentano una serie di caratteristiche morfologiche e fisiologiche che le rendono particolarmente vulnerabili alle basse concentrazioni di ossigeno nella zona radicale. A differenza di altre specie vegetali quali citare le specie (Jackson e Drew, 1984; Justin e Armstrong, 1987), le piante di actinidia non sviluppano tessuto aerenchimatico nelle radici in risposta alla diminuzione delle concentrazioni di ossigeno nella zona radicale. È stato riscontrato che lo spazio d'aria medio tra le cellule delle radici rappresenta il 2% del volume totale della radice (Smith et al., 1989). In generale, le piante con porosità delle radici inferiore al 5 % sono riconosciute come altamente sensibili alle condizioni anaerobiche (Jackson & Drew, 1984; Justin & Armstrong, 1987). La specie, inoltre, è caratterizzata da un elevato consumo di ossigeno per unità di lunghezza di radici ($9 \cdot 10^{-10} \text{ mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$). È stato stimato che il tempo necessario ad una pianta di actinidia matura per esaurire l'apporto di ossigeno nell'area radicale di un terreno ben aerato fino a raggiungere una condizione anaerobica sarebbe solo di circa 5 ore (Smith et al., 1989). Tale condizione si aggrava ulteriormente in terreni con ristagni dove la quantità di aria a disposizione è minore rispetto a quelli ben arieggiati.

Il secondo effetto riguarda gli effetti del ristagno idrico sull'apparato radicale. Le piante di actinidia in terreni scarsamente drenati tendono a perdere la capacità di rigenerazione e ricambio delle radici assorbenti superficiali (Buwalda e Hutton 1988). La perdita di capillizio porta a fenomeni di defogliazione e abbattimento dei tassi di traspirazione, pian piano i sintomi vanno ad interessare anche le radici strutturali provocando un viraggio di colore, sintomo di un

forte scompenso a livello vascolare (Reid et al., 1991). Inoltre, la condizione di ipossia innesca fenomeni secondari di marciumi radicali che aumentano la gravità dei sintomi a seguito dell'instaurarsi di infezioni fungine (Agrios 1988).

La riduzione delle piogge e l'elevata domanda evapotraspirativa negli ambienti del mediterraneo, congiuntamente alla elevata sensibilità della specie alle condizioni di carenza idrica del suolo (Montanaro et al., 2007; Dichio et al., 2013) inducono gli agricoltori ad aumentare empiricamente i volumi irrigui a ca. 10–12.000 m³ ha⁻¹ (Holzapfel et al., 2000), con l'idea di garantire alla pianta il corretto fabbisogno idrico. L'apporto di volumi eccessivi, distribuiti con frequenza molto elevata (anche più volte al giorno) determina situazioni di saturazione del suolo con contenuto idrico che costantemente oscilla tra i valori di Capacità Idrica di Campo (CIC) e Capacità Idrica di campo Massima (CIM). In aggiunta, in presenza di strati di suolo impermeabili, l'acqua in eccesso, che non drena negli strati profondi, si accumula innalzando la falda ipodermica. La presenza continua della falda e la sua profondità influenzano la disponibilità di aria nel terreno in quanto vi è una relazione tra porosità e livello di saturazione del terreno (Mitchell and Soga et al., 2005). In queste condizioni l'apparato radicale si trova in un suolo con scarsa aerazione con effetti negativi sulla crescita e funzionalità delle radici.

Effetti dell'irrigazione sulla struttura dei suoli

Il contenuto idrico del suolo (SWC) svolge un ruolo importante nei processi fisiologici e di sviluppo dell'apparato radicale e della pianta. Infatti l'apparato radicale cresce in presenza di un adeguato contenuto di acqua e ossigeno nel terreno (Valenzuela e Godoy et al., 1990). In condizione di eccesso idrico, l'arieggiamento diminuisce e l'apporto di ossigeno diventa insufficiente per i processi con conseguente diminuzione dell'attività radicale e scarsa crescita. La porosità è la caratteristica fisica più importante di un suolo perché permette gli scambi gassosi utili alla vita della pianta e dell'attività microbica in generale. La maggior parte dei fenomeni impattanti sull'attività biologica o la conservazione di un suolo si verificano proprio all'interno dei suoi pori o sulla superficie delle pareti delle particelle costituenti il poro stesso (Murray e Grant 2007). Quando la dimensione, numero e soprattutto la continuità della porosità viene interrotta, il terreno perde la sua struttura e dinamicità (Murray e Grant 2007).

La stabilità della struttura del suolo per la crescita delle piante dipende da tre sue caratteristiche:

- la permeabilità rappresenta la dimensione, la continuità e la tortuosità dei canali che regolano il movimento di acqua, gas e organismi.. Ciò ha un impatto importante sul deflusso (e quindi sull'erosione del suolo e sullo stoccaggio dell'acqua), sull'aerazione, sulla lisciviazione del sale, sul movimento e la trasformazione dei nutrienti, sull'attività biologica (crescita delle radici, movimento della fauna) e sul trasferimento di calore;
- La dimensione dei pori, importante di per sé in quanto l'acqua disponibile per le piante è trattenuta all'interno dei pori in un intervallo di dimensioni di circa 0,2-30 mm; L'abbondanza di questi pori in qualsiasi terreno è in gran parte determinata dalla sua consistenza.

- La resistenza del suolo che è fondamentale durante la germinazione e la crescita delle radici e nel determinare come un terreno risponde alla lavorazione del terreno.

In un suolo sono presenti due tipi di porosità e spesso si rivolge attenzione solo ai micropori che risultano essere quelli contenenti l'acqua. In realtà un ruolo fondamentale nella salute delle radici è proprio quello dei macropori, in quanto costituiscono spazi d'aria che offrono alla radice la possibilità di estendersi al proprio interno colonizzandolo, infatti le radici della pianta spesso vengono valutate solo come estensione dell'apparato radicale e non come densità. **I fenomeni di compattazione del suolo riducono la porosità e quindi la possibilità delle radici di espandersi, favorendo i fenomeni di ristagno idrico.** I fenomeni di compattazione vengono associati quasi sempre al transito delle macchine agricole su un suolo ma in realtà i terreni irrigati sono quelli più a rischio in quanto soggetti al perenne indebolimento della struttura dovuto alla costante fascia bagnata dal sistema irriguo. Quindi l'acqua è sicuramente da un lato essenziale per i processi biologici che generano struttura nel suolo ma dall'altro un importante alteratore di questa (Murray e Grant 2007).

Come conseguenza di questi fattori è possibile affermare che l'irrigazione incide sicuramente sulle potenzialità dei suoli, in diverso modo, degradandoli sia da un punto di vista fisico che chimico, generando fenomeni di ristagno idrico e salinizzazione, riducendo l'aerazione e aumentando la resistenza e compattazione (Murray e Grant 2007; Vlek et al, 2008; Hillel, 2000). Tutti questi fenomeni studiati dai diversi autori come conseguenza delle intense stagioni irrigue, sono tutti correlati tra loro e in particolare alla stabilità degli aggregati del suolo e alla qualità delle acque utilizzate. I terreni irrigati sono esposti a periodi sequenziali di rapida bagnatura seguiti da essiccazione. È stato riscontrato che i terreni sottoposti a questi continui cicli mostrano una bassa stabilità aggregata (Caron et al. 1992; Rasiah et al. 1992; Prikhod'ko 2008;) con conseguente rilascio di materiale colloidale e collasso dei pori del suolo (Levy e Miller 1997). La scomposizione degli aggregati più grandi in aggregati più piccoli si verifica a seguito di sollecitazioni meccaniche applicate esternamente, come ad esempio dagli attrezzi per la lavorazione del terreno, quando l'energia applicata supera la forza di adesione del legame particellare. Tuttavia, durante la bagnatura, la resistenza degli aggregati si indebolisce in modo significativo portando alla loro rottura, indipendentemente dalla forza di applicazione dell'acqua (Rengasamy 2018;). Anche la qualità dell'acqua di irrigazione applicata influenzerà le proprietà chimiche del suolo alterando la sua dispersione, la disaggregazione degli aggregati, l'impermeabilizzazione superficiale, la formazione della crosta e i cambiamenti nella funzione di infiltrazione (Shainberg e Letey 1984). Nei diversi strati di suolo che incide sulla densità dei suoli e sulla stabilità degli aggregati è la conducibilità elettrica (EC) e il rapporto di assorbimento del sodio (SAR) delle acque (Emdad et. al 2004; Rengasamy et al., 1993; Rengasamy 2018; Oster et al., 1998;). Tuttavia anche se queste due caratteristiche sono estremamente correlate alla destrutturizzazione, classificare l'acqua irrigua in relazione all'impatto sulla stabilità strutturale del suolo solo sulla base della sua composizione ionica non è però realistico, perché anche le caratteristiche del suolo stesso utilizzato per l'irrigazione sono critiche negli effetti delle acque (Rengasamy 2018;). In termini di caratteristiche bisogna considerare le particelle elementari dei suoli e i processi di disintegrazione (sminuzzatura), peptizzazione, trasformazione e distruzione dei minerali, argillizzazione e la traslocazione dell'argilla che avvengono in questi sotto l'impatto dell'irrigazione. Tra questi l'argillazione è

forse uno dei più importanti, il suo meccanismo è correlato alla sminuzzatura fisica dei silicati stratificati (biotite, idromica e clorite di magnesio) nelle fratture di sabbia e limo alla dimensione della frazione argillosa (Prihod'ko 2008). Il contenuto di biotite e feldspati nelle frazioni di sabbia e limo diminuisce nel corso dell'argillizzazione. L'accumulo di argilla e frazioni colloidali nella massa del suolo sotto l'impatto dell'irrigazione è stato notato da Alekseev 1997 e Strugaleva et al., 1980. A seguito di un evento irriguo infatti le argille non devono disperdersi. La maggiore, minore o inesistente dispersione delle argille durante un evento irriguo definisce la stabilità della microstruttura di infiltrazione e di movimento delle acque nel suolo, maggiore sarà la dispersione e più possibilità ci sarà di generare strati impermeabili. Con argille in completa dispersione il terreno si "sigilla" impedendo l'infiltrazione dell'acqua negli strati più profondi, esponendolo a fenomeni di erosione.

In conclusione "l'arte" di una buona irrigazione è un compromesso in cui il suolo viene mantenuto in una condizione umida, ma non eccessivamente, in cui i processi costruttivi, per lo più di natura biologica, e i processi distruttivi, per lo più di natura fisica, che agiscono sulla struttura del suolo sono ben bilanciati.

Effetti della mancanza di ossigeno tellurico sull'apparato radicale

Un' aerazione inadeguata del terreno può diventare un problema nei frutteti irrigati specialmente con terreni argillosi pesanti, in particolare con le irrigazioni molto frequenti recentemente raccomandate (Gur et al.1979).

Distribuendo il volume irriguo con più interventi giornalieri, come affrontato nel capitolo precedente è utile a migliorare l'efficienza dell'irrigazione e gli assorbimenti da parte della pianta ma si rischia di aumentare il SWC a livelli prossimi alla saturazione mantenendo un apporto di ossigeno alle radici basso durante la maggior parte della stagione estiva, ma anche valori di umidità del suolo costanti tra CIC e CIM (capacità idrica massima) sono responsabili della diminuzione dell'ossigeno a livello radicale (Bailey-Serres and Voesenek, 2008; Limami et al., 2014;) con successivo declino fisiologico che porta al blocco della crescita fino alla disfunzione totale dell'apparato radicale (Sofa et al. 2024).

Poiché il contenuto d'aria nel suolo aumenta con il tempo trascorso dall'irrigazione è quindi utile determinare i valori ottimali di ossigeno nel suolo minimi per garantire una condizione ottimale alle radici e programmare su questo i turni irrigui utili per consentire la giusta areazione dei diversi profili di suolo. Per i meli ad esempio, il 5% di ossigeno nell'atmosfera del suolo è stato stabilito come minimo per l'allungamento delle radici (Boynton et al., 1938). La formazione di nuove radici invece non è stata osservata a contenuti di ossigeno inferiori al 10% (Boynton e Compton, 1943), mentre la crescita è aumentata fino a contenuti di ossigeno del 15% (Boynton, 1939). Quindi sulla base di questo è possibile comprendere come la rizogenesi e l'allungamento dell'apparato radicale avvenga a valori diversi di ossigeno per diverse colture.

L'aerazione del terreno dipende anche dal metodo di irrigazione. Con l'irrigazione a tutto campo, l'intera superficie del terreno viene bagnata, compromettendo la diffusione di ossigeno dall'atmosfera nel terreno. Solo dopo che l'acqua in eccesso è stata drenata, un processo lento in particolare nei terreni argillosi pesanti, il contenuto di aria del terreno aumenta a un livello utile per consentire un'adeguata respirazione delle radici.

Al contrario, con l'irrigazione a goccia viene bagnata solo una parte della superficie del terreno, consentendo comunque la diffusione di ossigeno nel terreno non interessato dall'intervento durante il processo di irrigazione e quindi garantendo una migliore aerazione della zona delle radici (Gur et al.1979). L'area vicina all'emettitore a goccia, tuttavia, risulta satura di acqua e per un po' di tempo dopo, impedendo la diffusione di aria nella fase gassosa del suolo.

I dati di aerazione del suolo, espressi dalla media giornaliera del contenuto d'aria del suolo in volume durante il periodo in cui sono stati applicati i trattamenti, hanno mostrato una marcata diminuzione nello strato superiore del suolo con il trattamento di irrigazione più frequente. Se si confrontano frequenza irrigua e contenuto medio giornaliero di aria in diverse profondità del suolo è possibile notare come la capacità di arieggiamento cambia proprio a seconda della profondità di bagnatura. Secondo alcuni studi condotti su suoli argillosi mettendo a sistema quantità di aria e frequenza irrigua, lo strato di 0-30 cm riesce ad aumentare il contenuto di aria a livelli ottimali dopo 6 giorni circa dall'ultimo intervento irriguo. Diversamente gli strati profondi per ristabilire valori accettabili di ossigeno ne impiegano circa 14 (Guer et al.1979). Quindi è chiara la presenza di un disallineamento temporale nell'arieggiamento nei diversi profili di suolo dove quelli più profondi risultano essere più lenti nel ripristinare le condizioni pre - irrigue.

Da quanto discusso in termini di suscettibilità della specie ai fenomeni di eccesso idrico, dal concetto di inseguire un continuo equilibrio tra benefici e problematiche dell'acqua connesse alla struttura dei suoli fino alla possibile alterazione della disponibilità di ossigeno all'apparato radicale nelle zone irrigate specialmente se con volumi eccedenti come in alcuni casi per l'actinidia, $10-12.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Holzapfel et al., 2000), ne deriva l'obiettivo di questo capitolo.

Ipotesi sperimentale e obiettivo del lavoro:

Diversi studi hanno messo in evidenza che le piante arboree hanno la capacità di modificare la strategia di assorbimento dell'acqua, in relazione alla disponibilità di umidità del suolo nelle diverse zone dell'apparato radicale (Green e Clothier 1999, Demir et al., 2024; Bouten et al., 1992; Coenders-Gerrits et al., 2013). Secondo altri autori la variazione spaziale nello stoccaggio dell'acqua nel suolo regola fortemente l'assorbimento locale dell'acqua e le località più umide sono sicuramente quelle che favoriscono l'assorbimento dell'acqua da parte delle radici (Demir et al., 2024).

Sulla base di queste conoscenze l'ipotesi formulata è che la distribuzione del volume irriguo giornaliero, in modo alternato in 4 diverse porzioni di suolo (fig. 1.) possa:

1. Assicurare un adeguato decremento del contenuto idrico dei singoli volumi di suolo e pertanto favorire lo svuotamento dei macropori e quindi indirettamente migliorare l'ossigenazione del suolo;
2. Indurre la pianta ad attivare strategie di assorbimento radicale dai volumi di suolo con AFD più elevata, mantenendo ottimale lo stato idrico della pianta;
3. Favorire lo sviluppo di radici assorbenti in volumi di suolo maggiori e più distanti dal fusto;

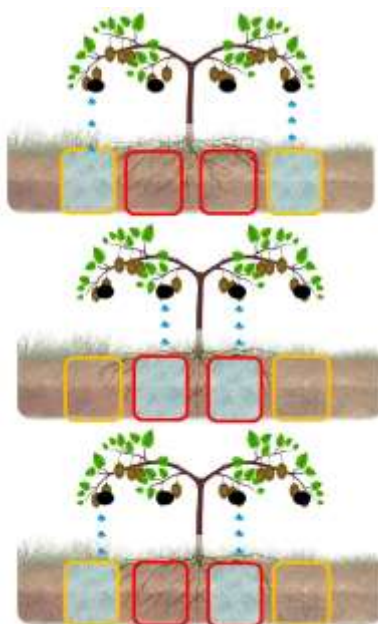


Fig.1 Possibili alternanze irrigue nei diversi volumi di suolo della tesi 4DL

Inoltre, in un'ottica di irrigazione di precisione, la possibilità di gestire la distribuzione dell'acqua in modo indipendente nei 4 volumi di suolo, permette di gestire la variabilità spaziale, orizzontale (distanza dal fusto) e verticale (profili di suolo) del contenuto idrico.

Per verificare l'ipotesi sperimentale sono stati messi a confronto due sistemi irrigui ad ala gocciolante nello specifico un sistema a doppia ala (2DL) e un sistema innovativo a quattro ali gocciolanti a erogazione indipendente (4DL) in grado di irrigare singolarmente o in diversa

combinazione 4 diversi comparti del suolo. Sulla tesi 4DL sono state testate diverse strategie irrigue basate sull'irrigazione alternata dei diversi comparti di suolo, al fine di valutare 1) la capacità di assorbimento differenziata della pianta in relazione alla distribuzione dell'umidità nel comparti di suolo; 2) la capacità di mantenere lo stato idrico e flussi traspirativi ottimali; 3) effetto dell'allargamento del volume di suolo bagnato dall'irrigazione sull'espansione dell'apparato radicale nei comparti di suolo più lontani dalla pianta .

Materiale e Metodi

2.1 Il sito sperimentale

La sperimentazione è stata condotta in un frutteto commerciale di actinidia e maturo situato in Agro di Bernalda a Metaponto (Sud Italia, 40°24'N 16°46'E, foglio di mappa n.110 - Particella n. 56) . Una cultivar di actinidia a polpa gialla (*A. chinensis* var. *chinensis* cv. 'Zesy 002') innestata su portainnesto D1 (*A. chinensis* var. *deliciosa*) allevata a pergola con sesto d'impianto di 5 × 2 m per un investimento totale di 1000 piante ha⁻¹ , (per ulteriori dettagli a riguardo consultare Cap. 1.1)

2.2 Impianto irriguo

Nella parcella sperimentale del sito le piante sono state irrigate con due sistemi di irrigazione ad ala gocciolante ciascuna ala dotata di erogatori autocompensanti dalla portata di 2,3 L h⁻¹ e con diametro del foro di 20 mm. distanziati tra loro di 50 cm. La portata della singola ala presenta valori di 7,43 m³ (h ha)⁻¹, a seconda del numero di ali installate i metodi utilizzati nella sperimentazione sono stati suddivisi in:

- (2DL) sistema a doppia ala gocciolante con singole ali poste a 50 cm dalla pianta, con portata totale dell'impianto è di 14,86 m³ (h ha)⁻¹;
- (4DL) sistema a 4 ali gocciolanti con la prima coppia di ali a 50 cm dalla pianta e la seconda a 50 cm dalla prima (1 m dalla pianta), con portata dell'impianto è di 29,72 m³ (h ha)⁻¹, Fig.14.1;



Fig. 14.1 Sistema irriguo a quattro ali gocciolanti indipendenti (4DL) (*Ideatore B. Dichio*)

Le ali di ciascun impianto sono gestite tramite elettrovalvole portate da 0,23 a 6,8 m³ h⁻¹ dotate di un misuratore di portata analogico, di un misuratore di portata digitale generale (10-100 L di impulso elettrico⁻¹) e di un programmatore automatico di irrigazione per il controllo a distanza dell'erogazione dell'acqua (sistema "Irrifarm", Pan. Agri s.r.l., Basilicata, Italia). Nel 2DL entrambe le ali rappresentano un settore irriguo e sono automatizzate tramite singola elettrovalvola, mentre e nel caso dell'4DL ogni ala è stata resa a funzione indipendente tramite singola elettrovalvola per consentire in maniera separata l'attivazione di ognuna delle singole ali Fig. 14. Per ulteriori informazioni consulta Cap 1.6.



Fig. 14 Set di elettrovalvole a funzione indipendenti installate nella tesi 4DL

2.3 Determinazione della curva di ritenzione idrica, delle caratteristiche idrogeologiche e del volume di suolo interessato dall'irrigazione e bilancio idrico del suolo

Del suolo della parcella sperimentale sono state determinate le sue caratteristiche idrologiche attraverso la curva di ritenzione idrica del suolo Fig.1 (Cap. 1.3), la risultante mostra una capacità di campo (CIC) del 39,48% (v v⁻¹), un punto di appassimento (PA) del 18,49% (v v⁻¹) e acqua disponibile (AD) del 20,99% (v v⁻¹) Tab 9.2.

Tab. 9.2 Caratteristiche del suolo e contenuto di acqua disponibile per la tesi 2DL e 4DL nel profilo del suolo (0-60 cm).

Parametri	Unità	2DL	4DL
		I	I
Volume di suolo	m ³ ha ⁻¹	1,200	600
Densità apparente	t(m ³) ⁻¹	1,39	1,39
CIC	% (v v ⁻¹)	39,48	39,48
PA	% (v v ⁻¹)	18,49	18,49
AD	% (v v ⁻¹)	20,99	20,99
AD	m ³ ha ⁻¹	320	320
AFD (0-60 cm)	% AW	11%	11%
AFD (0-60 cm)	m ³ ha ⁻¹	35	35

Per entrambe le tesi 2DL e 4DL sono stati determinati i contenitori di suolo interessati dall'irrigazione in corrispondenza di ogni singola ala tramite la formula:

$$V_s = L \times l \times p \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)}$$

dove come mostra la Fig.15, l è la lunghezza del lato del contenitore (pari alla lunghezza dell'impianto irriguo), L è la larghezza (pari alla distanza di bagnatura dal tronco) e P è la profondità di bagnatura.

Per le informazioni riguardanti il bilancio idrico e regolazione dei volumi irrigui fare riferimento al capitolo 1, sub capitolo 1.6.

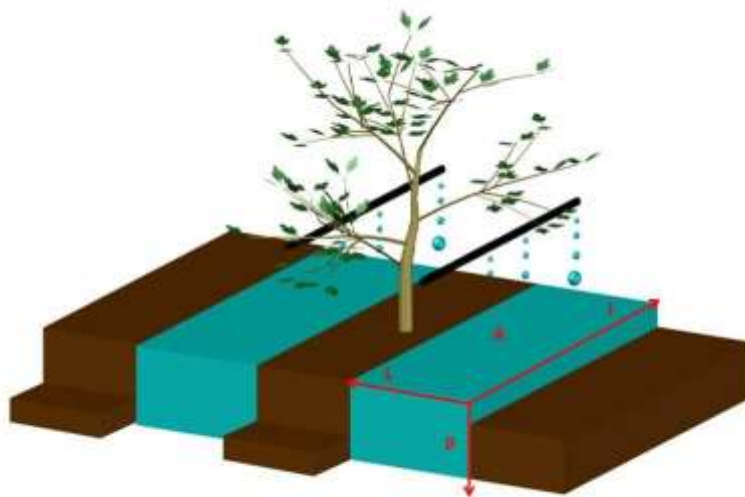


Fig.15 Modellazione 3D dei parametri rilevati per il dimensionamento dei contenitori di suolo nel sistema 2DL.

2.4 Le strategie irrigue

I volumi irrigui, corretti periodicamente tramite il monitoraggio in continuo dell'umidità del suolo, sono stati applicati con strategie diverse, suddividendo il volume giornaliero in due o più interventi.

Nel sistema irriguo 4DL i volumi giornalieri sono stati distribuiti in un volume di suolo maggiore (4 contenitori), mantenendo stesso volume e turni del sistema irriguo 2DL ma interessando più porzioni dell'apparato radicale.

Due strategie irrigue sono state applicate nel metodo 4DL differenziate rispetto alla combinazione dei contenitori di suolo interessati dall'irrigazione (Fig. 16):

- strategia "A" basata sull'utilizzo delle ali 2 e 3, come nel sistema 2DL, alternato alle ali 1 e 4 più distanti dalla pianta (Fig. 16 A);
- strategia "B" basata sull'alternanza di un' ala interna (prossima alla pianta) e una esterna sui due lati opposti della pianta (combinazioni come 1-3 o 2-4) (Fig. 16 B).

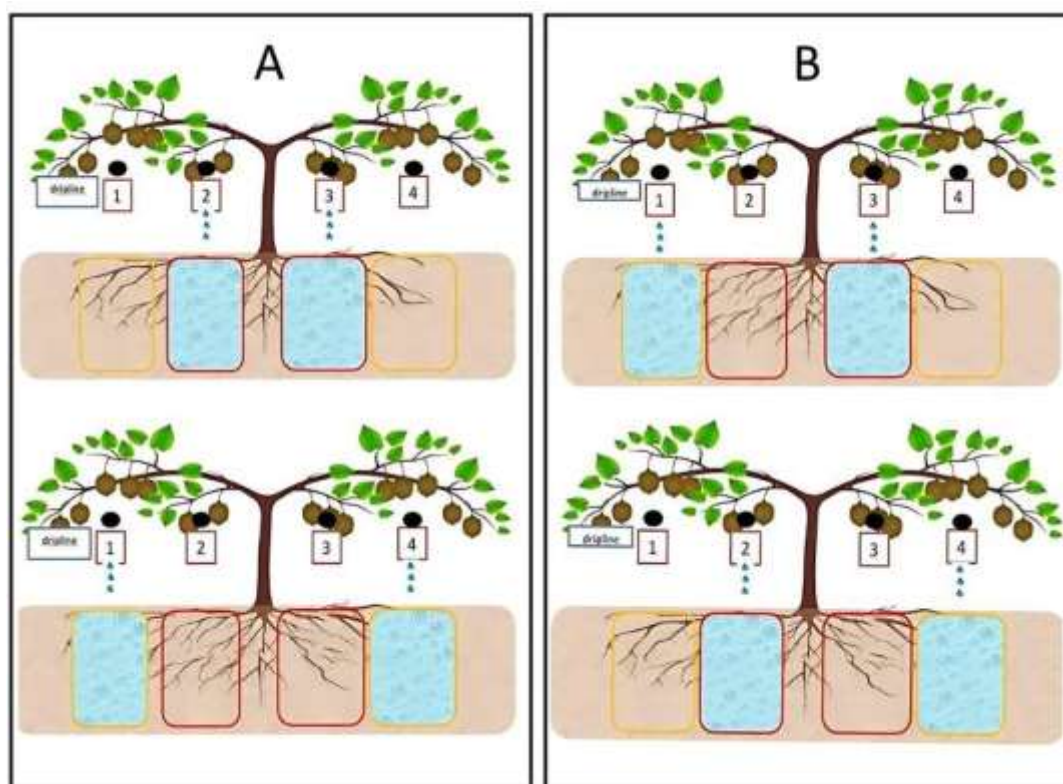


Fig. 16 Rappresentazione delle due strategie (A e B) applicate durante le stagioni irrigue dall'impianto a quattro ali gocciolanti (4DL).

- Nella stagione irrigua 2021 ogni singola strategia è stata applicata per un lungo periodo alternando nei giorni le combinazioni delle ali (ad esempio, ali 1-4 e 2-3 a giorni alterni per la strategia A e ali 1-3 e 2-4 a giorni alterni per la strategia B);

- Nella stagione irrigua 2022 ogni singola strategia è stata applicata per un lungo periodo alternando nello stesso giorno le combinazioni delle ali (ad esempio, alternanza nello stesso giorno delle ali 1-4 e 2-3 per la strategia A);
- Nella stagione irrigua 2023 le strategie si sono alternate più frequentemente. La strategia A che prevede l'impiego della combinazione delle ali esterne (1-4) è stata applicata per un mese, favorendo l'assorbimento dalle porzioni esterne dell'apparato radicale.

In Tab. 10 sono riportate le dinamiche di alternanza delle strategie e dei loro contenitori nel corso dei tre anni di sperimentazione.

Tab. 10 Schema delle strategie irrigue seguite nelle tesi 4DL e 2DL per le stagioni 2021, 2022 e 2023.

ANNO	DATA		STRATEGIA 4DL					STRATEGIA 2DL			
			Contenitori di suolo			Interventi (n°)	Volume (m³ h⁻¹)	Note	Interventi (n°)	volume (m³ h⁻¹)	
	combinati		singoli								
	Dal	Al	A	B	1_4	2_3					
2021	19/5	8/6		x			4	45	A e B in giorni differenti	4	45
	15/6	28/7	x				4	60		4	60
	29/7	6/9		x			4	45-60		4	45-60
	15/9	8/10				x	1	15		1	15
2022	21/6	22/7		x			4	60	A e B anche nello stesso giorno	4	60
	15/8	25/8	x				3	30-45		3	30 - 45
	3/9	7/10				x	2	30		2	30
2023	23/6	26/6		x			4	45	A e B alternate anche nello stesso giorno + solo 2 DL	4	45
	29/6	4/7				x	2	30		2	30
	6/7	10/7		x			2	50		2	50
	29/7	18/8	x			x	4	60		4	60
	19/8	23/8				x	4	60		4	60
	25/8	10/9	x				4	50		4	60
	11/09	23/09	x					60			
	27/9	16/10				x	2	30		2	30

2.5 Monitoraggio dello stato idrico del suolo

Il contenuto idrico del suolo (SWC) è stato monitorato usando sonde a tecnologia FDR multiprofilo da 60 cm con sensori di profondità distribuiti ogni 10 cm modello/serie III Drill & Drop, Sentek Sensor Technologies Stepney, Australia (Fig 18 A), configurata con hardware SDI-12 - RS232/485.

Per la tesi 2DL è stata installata una sonda a 0.50 m dal filare leggermente decentrata dal punto goccia di una delle due ali, invece nella tesi 4DL 4 sonde sono state installate in corrispondenza di ogni ala al fine di monitorare il contenuto idrico dei 4 contenitori di suolo posti sotto le ali (Fig.18 B). Ogni sonda era collegata ad un proprio datalogger Sentek per l'acquisizione dei dati (Fig.18 C), con timing di acquisizione settato a 30 minuti di distanza fra due letture successive.

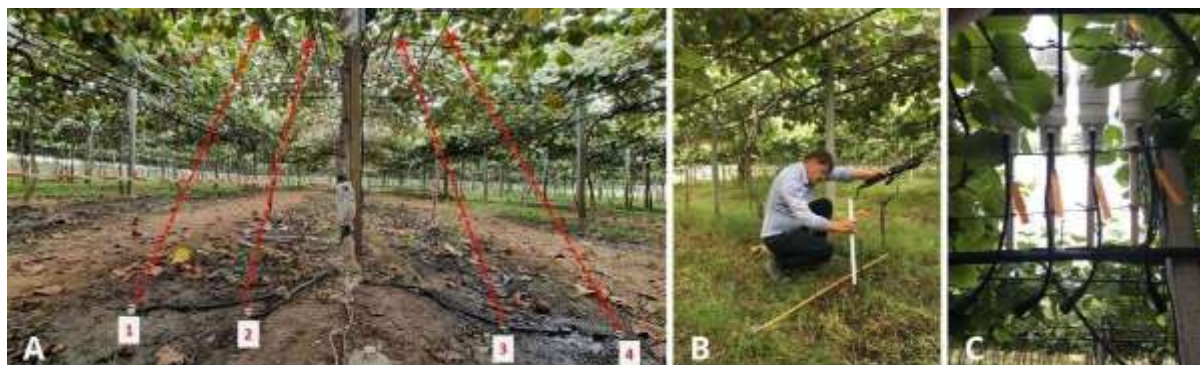


Fig. 18 Sonde per il monitoraggio del SWC installate nelle tesi: A) posizionamento delle singole sonde nei 4 contenitori di suolo , B) valutazione e scelta del punto di installazione della sonda rispetto al bulbo di umettamento, C) logger per acquisizione e trasmissione dei dati alla dashboard Irrimax Live.

2.6 Monitoraggio in continuo dello stato idrico della pianta

Durante il periodo di prova sono stati monitorati i parametri fisiologici che identificano lo stato idrico delle piante al fine di valutare l'efficienza delle diverse strategie e metodologie irrigue seguite con i metodi 2DL e 4DL.



Fig. 19 Microtensiometri Flora Pulse installati sulle piante in pieno campo.

Il potenziale idrico (SWP), è stato misurato sia a livello delle foglie non traspiranti, potenziale idrico dello stelo (SWP), tramite la camera a pressione di Scholander (Modello 1000, PMS

Instrument Company, Corvallis, OR, USA) con azoto pressurizzato secondo la procedura raccomandata da Begg e Turner (1970) che a livello del tronco, potenziale idrico del tronco (TWP) tramite microtensiometri (FloraPulse Davis, CA, USA) installati su due piante a tesi (Fig. 19). Per altre informazioni consulta Cap 1.8



Fig. 20 Sensore di flusso linfatico sap flow installato nelle tesi 2DL e 4DL.

Su 6 piante di ciascuna delle due tesi sono stati installati sensori Sap Flow per il monitoraggio del volume di flusso linfatico a livello dello xilema (Fig. 20), composti da una termocoppia e uno scambiatore di calore ad impulsi, già validati su actinidia (Green e Clothier, 1995). Per ulteriori informazioni consulta Cap. 1.9 .

2.7 Determinazione della produzione e analisi dei parametri quali-quantitativi

Per le informazioni e metodologia applicata per l'analisi quali - quantitativa dei frutti consulta Cap. 1.10 (1.10.1 e 1.10.2)

2.8 Analisi statistica

Le relazioni tra i diversi parametri indicatori dello stato idrico delle piante, del suolo, le variabili meteorologiche e i valori di produzione e qualità sono state studiate e verificate nel corso dell'elaborato utilizzando T- test e ANOVA implementati in MatLab e Simulink R2023b.

Risultati e Discussioni

2.9 Volumi irrigui applicati

La gestione irrigua applicata nelle tesi tramite le correzioni al bilancio secondo il metodo spiegato nel Cap. 1.6, ha modificato nei tre anni di sperimentazione il volume irriguo somministrato durante le diverse fasi fenologiche. Seguendo questo approccio il IV_{exp} degli anni 2021, 2022, 2023 e 2024 per la tesi 2DL sono risultati ridotti del 39,5, 32,4, 32,5 e 23,5% rispetto al $IV_{stimato}$ mentre nel caso della tesi 4DL una riduzione del 40, 29, 26,5, 22% (tabella 11). In media nei 4 anni per le due tesi le percentuali di riduzione di volume sperimentale rispetto all teorico risultano del 28,74 e 31,29% rispettivamente per le tesi 4DL e 2DL.

Tab. 11 Volumi irrigui derivanti dal bilancio idrico utilizzando i K_c FAO ($IV_{stimato}$) e dal bilancio sperimentale (IV_{exp}) per gli anni 2021, 2022 e 2023 calcolati per le tesi 4DL e 2DL .

Anno	4DL Volume irriguo $m^3 ha^{-1}$		2DL Volume irriguo $m^3 ha^{-1}$	
	Stimato	Sperimentale	Stimato	Sperimentale
2021	8596	5250	8725	5280
2022	9054	6467	9189	6212
2023	8755	6435	8808	6162
2024	9045	7110	9117	6975
Media 21-24	8863	6316	8960	6157

2.10 Le strategie irrigue applicate nella stagione 2021

In Fig. 21 è mostrato l'andamento delle umidità del suolo (SWC) misurate dalle sonde installate nei contenitori 2-3 e 1-4 (Fig. 21 A e B) nella stagione irrigua 2021. Tale stagione in cui sono state installate le ali esterne 1-4 è stata utilizzata come preliminare per testare la funzionalità dell'impianto, delle nuove sonde di umidità esterne, la fattibilità di poter alternare contenitori esterni e le risposte della pianta all'utilizzo di nuove porzioni di suolo non irrigate fino a quel momento. In Fig. 21 B sono riportate le oscillazioni di SWC delle profondità 15, 35 e 55 cm dei nuovi contenitori 1-4 che risultano, nei periodi di utilizzo, molto ridotte rispetto a quelle dei contenitori 2-3 in Fig. 21 A, questo perché le ultime derivano dal vecchio impianto a doppia ala già presente in azienda e quindi presentavano una maggiore colonizzazione radicale del contenitore rispetto a 1-4 che non aveva mai subito irrigazione quindi rappresentava l'ex strato cuscinetto tra l'interfila e le radici infatti lo sviluppo delle radici con l'irrigazione a goccia è limitato al volume del suolo bagnato dall'emettitore, vicino alla superficie del suolo con densità di lunghezza delle radici che diminuisce con la profondità (Michelakis et al., 1993; Stevens e Douglas, 1994). La presenza di radici nel contenitore determina tra il momento irriguo e la fase di assorbimento radicale una oscillazione maggiore e quindi una diminuzione di umidità

maggiore nel solo durante il giorno quando l'assorbimento è attivo come riporta (Hussein-Mounzer et al., 2008).

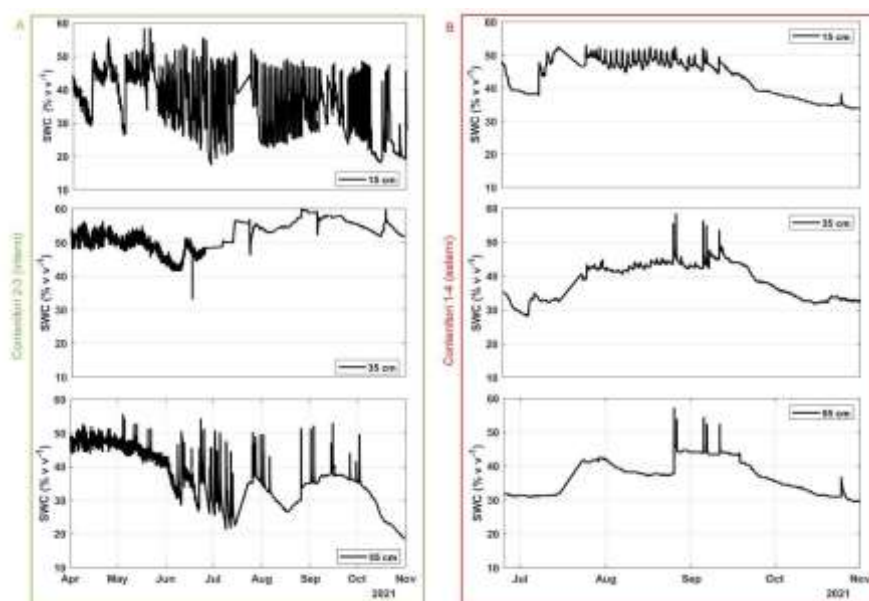


Fig. 21 Andamento dell'umidità del suolo (SWC) misurata alle profondità di 15, 35 e 55 cm per i contenitori 2-3 (A) e 1-4 (B) della tesi 4DL nella stagione irrigua 2021.

Nella parcella sperimentale parte del sistema irriguo non è stato trasformato mantenendo così un controllo del sistema a doppia ala, dove le oscillazioni di SWC della stagione 2021 per gli strati di suolo di 15 cm (A), 35 cm (B) e 55 cm (C) sono riportate in Fig. 21.

Nella tesi 2DL l'irrigazione sia per volumi che per strategia irrigua (frazionamento del volume giornaliero) è stata gestita come per la 4DL mantenendo come unica variabile l'impianto irriguo (Fig. 22).

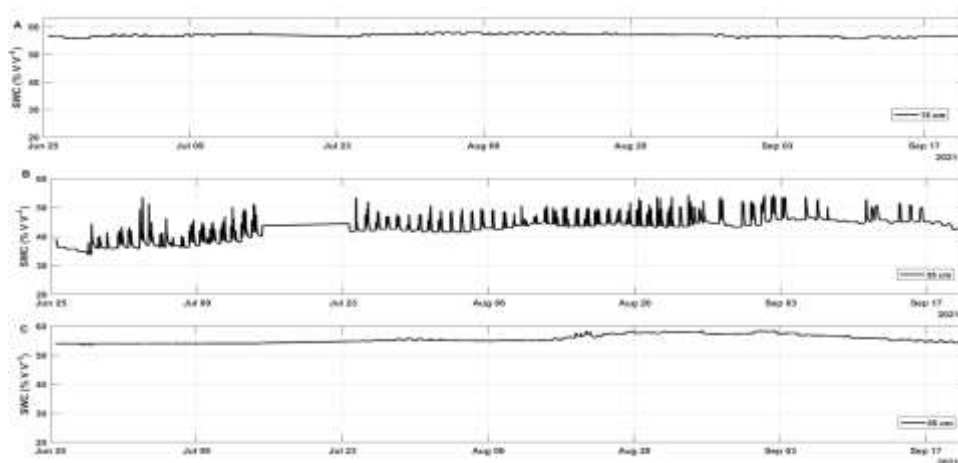


Fig. 22 Andamento dell'umidità del suolo (SWC) misurata alle profondità di 15, 35 e 55 cm nella tesi 2DL a stagione irrigua 2021.

2.10.1 L'umidità del suolo durante la strategia irrigua A

Nella Fig. 23 è mostrata una finestra temporale della stagione irrigua 2021 dove è stata testata la strategia A che prevede l'alternanza tra le combinazioni delle ali interne e esterne 1-4 e 2-3.

In un periodo di 5 giorni successivi dal 25 Luglio al 29 Luglio 2021 il volume irriguo di $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ è stato erogato nei giorni 25 e 29 (Fig. 23 A, B e C - freccia ON) utilizzando i contenitori esterni 1-4 e nei giorni 26, 27 e 28 Luglio (Fig. 23 A1,B1 e C1 - freccia ON) utilizzando i contenitori 2-3 interni. La strategia irrigua A è stata adattata per garantire ai contenitori interni 2-3 un giorno di arieggiamento ogni tre di utilizzo, proprio tramite l'erogazione del volume giornaliero negli 1-4.

Dalle sonde A1 e C1 in Fig. 23 identificative dei 15 e 55 cm è possibile notare i picchi di umidità a seguito degli interventi irrigui nei giorni ON dei contenitori 2-3 mentre lo strato di suolo dei 35 centimetri a causa di una rottura della sonda installata non è stato monitorato.

Le sonde dei contenitori 1-4 sono mostrate tramite la Fig. 23 3, B e C rispettivamente installate negli strati di suolo a 15,25 e 35 cm di profondità.

Nel giorno 29 Luglio (giorno OFF dei contenitori 2-3), l'umidità del suolo in 24 ore si modifica dal 32% al 25 % riducendosi del 7 % nello strato dei 15 cm (Fig. 23 A1) e di 1% nello strato di 55 cm (Fig. 23 A3), il contenitore tende quindi ad asciugarsi. Il giorno 25 Luglio mostra lo stesso fenomeno essendo giorno OFF del 2-3 che riduce l'umidità di 5 punti percentuali dal 40 al 35%. In modo speculare quando i contenitori 1-4 vengono utilizzati aumentano del 3,2% nei primi 15 cm e 35 cm l'umidità il 25 Luglio 2022 (Fig. 23 A e B), questo è il meccanismo infatti deve innescarsi al fine di sostenere il fabbisogno idrico della pianta con i contenitori esterni mentre gli interni si svuotano arieggiando dando così forma alla strategia A.

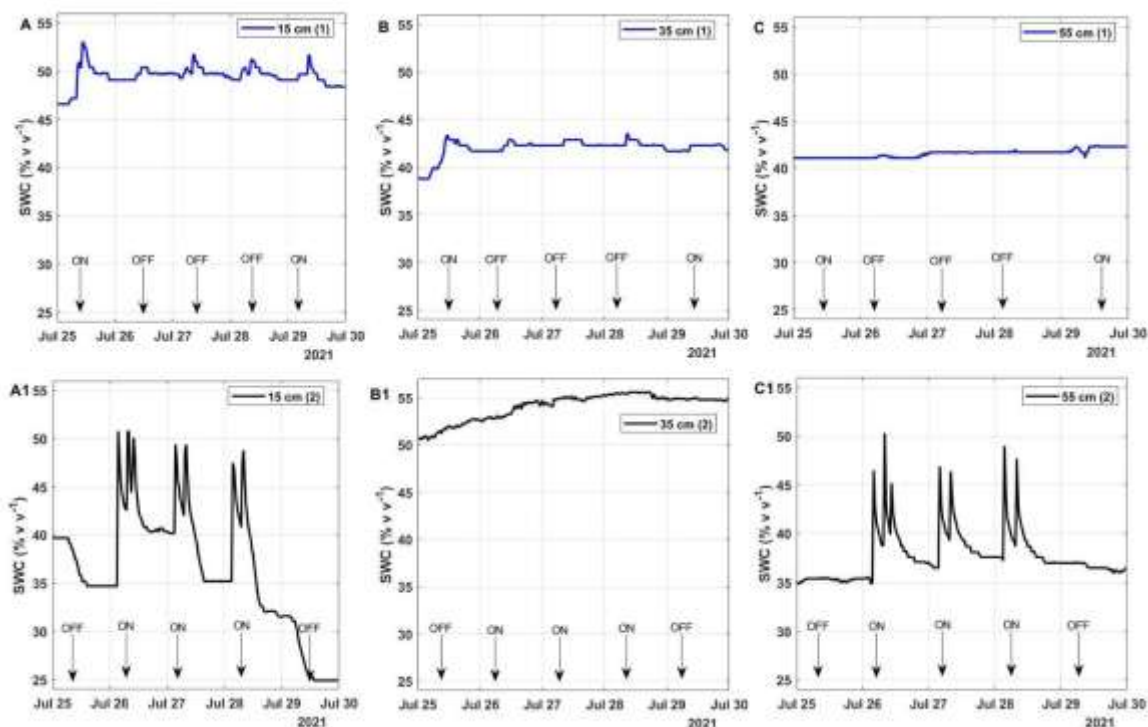


Fig. 23 Andamento dell'umidità del suolo dei contenitori interni ed esterni della tesi irrigua 4DL monitorata nel periodo 25 - 29 Luglio 2021, dove A, B e C identificano gli strati di 15, 25 e 55 cm

del contenitore 1 e A1, B1 e C1 gli strati di 15, 25 e 55 cm del contenitore 2. Le frecce ON e OFF indicano rispettivamente il giorni in cui i contenitori subiscono o meno le irrigazioni.

Nelle sonde utilizzate per il monitoraggio dell'umidità del suolo per i contenitori 1-4 (Fig. 23 A, B e C) tuttavia compaiono, seppur di intensità minore a quelli identificativi degli interventi irrigui nei giorni ON dei picchi anche nei giorni OFF dove teoricamente il contenitore non dovrebbe essere utilizzato, questo effetto è stato associato ad una quota di acqua derivante dal volume irriguo nei contenitori 2-3 che per movimento orizzontale nel suolo arrivava in minima parte a ridosso del contenitore più esterno incrementando anche se di poco l'umidità della zona di transizione tra un contenitore e l'altro es. 2 - 1 o 3 - 4. Questo fenomeno di movimento dell'acqua potrebbe essere dovuto all'elevato contenuto in aria dei macropori nei nuovi contenitori che riescono a facilitare il movimento orizzontale dell'acqua nel raggiungimento dello strato di suolo in cui sono installate le sonde a monitoraggio dei 14 cm dei contenitori 1-4, infatti secondo uno studio condotto da Allaire-Leung et al. 1999 i macropori favorirebbero il movimento orizzontale dell'acqua. Analizzando quindi un movimento principalmente superficiale che tende a ridursi all'aumentare della profondità lo stato di distribuzione spaziale dei macropori è più concentrato nella superficie del suolo (Xin P. et al. 2016; Zhou T. et al., 2020; Rosenbom A. E. et al. 2014;) e in particolare contestualizzando sulla profondità sulla distribuzione delle dimensioni dei pori, sono stati osservati macropori significativamente più alti ($>500\mu\text{m}$) nella profondità 0-10 e 10-20 cm rispetto al suolo 20-30 e 30-40 cm (Chakraborty et al., 2022).

La Fig. 24 mostra l'andamento del SWC della tesi 2DL per gli stessi giorni analizzati nella tesi 4DL, la programmazione irrigua seguita è stata, per volume distribuito ($60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e per numero di interventi irrigui giornalieri, la stessa della tesi 4DL.

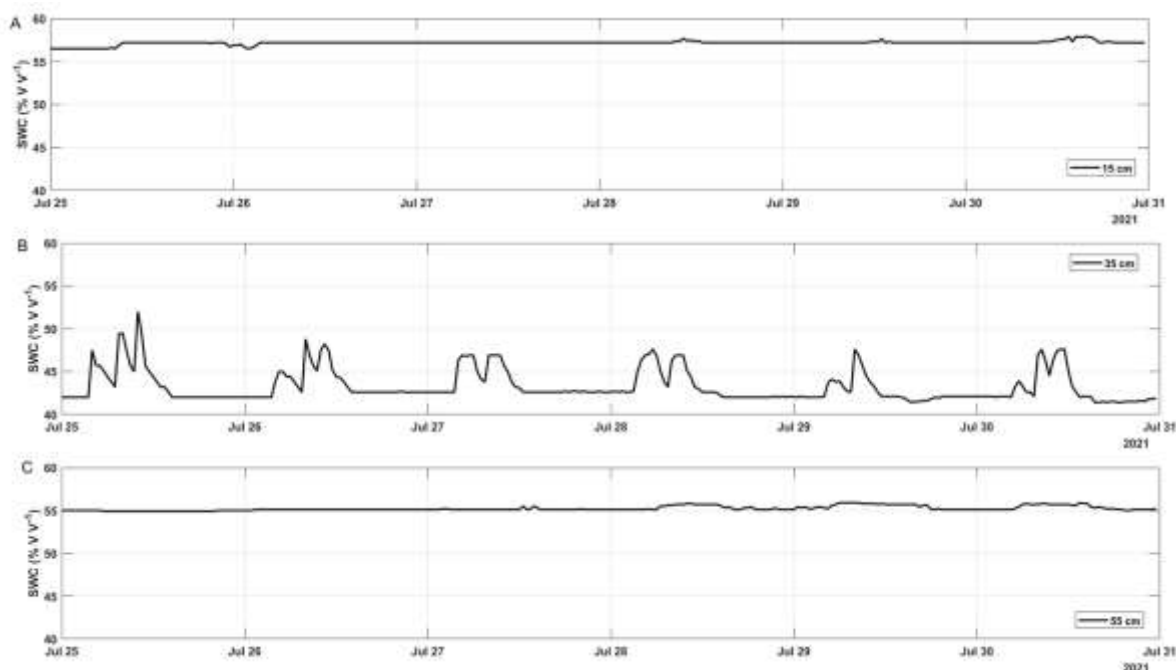


Fig. 24 Andamento dell'umidità del suolo monitorata per la tesi irrigua 2DL nel periodo 25 - 29 Luglio 2021, dove A, B e C identificano gli strati di suolo profondi 15, 25 e 55 cm.

2.10.2 L'umidità del suolo durante la strategia irrigua B

Da Agosto a metà Settembre (Tab. 8) la programmazione irrigua è stata impostata al fine di testare la strategia di tipo B. In tal periodo le 4 ali hanno lavorato in combinazione 1-3 e 2-4 alternate nel giorno. Nella strategia A i contenitori 1-4 venivano irrigati un giorno ogni tre alternandosi con i contenitori 2-3, durante il mese di agosto lo switch dei contenitori di suolo avveniva ogni giorno, quindi un contenitore veniva irrigato un giorno ed arieggiato il giorno successivo.

La figura 25 mostra un estratto di sei giorni, (dal 1 al 6 Agosto 2021) del periodo di gestione irrigua tramite strategia B. Le sonde a monitoraggio dei primi 15 cm di suolo dei contenitori 1 e 2 Fig. 25 A e A1 rispettivamente mettono in evidenza le dinamiche di SWC durante l'irrigazione giornaliera di $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ suddivisa in tre interventi giornalieri suddivisi nei 4 contenitori.

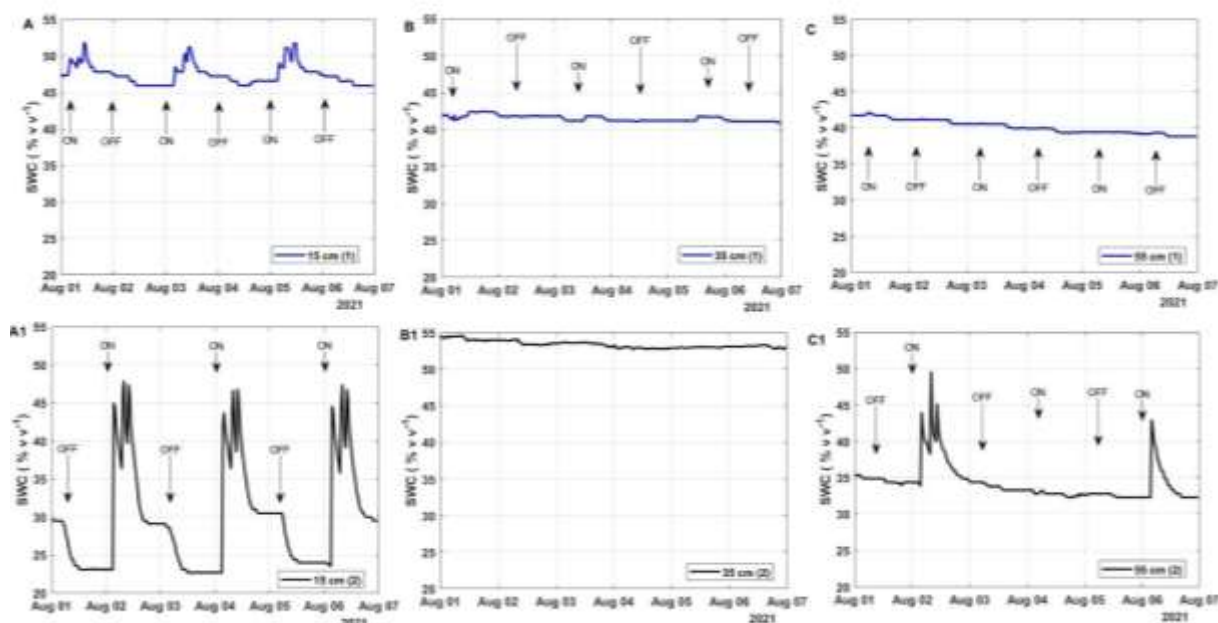


Fig. 25 Andamento dell'umidità del suolo dei contenitori interni ed esterni della tesi irrigua 4DL monitorata nel periodo 01 -06 Agosto 2021, dove A, B e C identificano gli strati di 15, 25 e 55 cm dei contenitori 1 e A1, B1 e C1 gli strati di 15, 25 e 55 cm dei contenitori 2. Le frecce ON e OFF indicano rispettivamente i giorni in cui i contenitori subiscono o meno le irrigazioni.

Le dinamiche di arieggiamento di queste due strategie sono diverse e le oscillazioni delle umidità al livello dei contenitori interni 2 e 3 tra le figure 23 e 25 A1 mettono in evidenza il diverso processo di *depletion* dell'umidità. In fig. 25 A1 dal 26 al 30 Luglio l'umidità si riduce dal 35 al 25%. Il 30 Luglio si verifica questa asciugatura di 10 punti percentuali, dovuta alla condizione di partenza dell'umidità che a seguito di tre giorni successivi di interventi ha oscillato tra il 35 e 40 %. Diversamente nella strategia B ogni contenitore viene irrigato ed arieggiato a giorni alterni quindi la riduzione di SWC tra i giorni ON e OFF del contenitore 2 in Fig. 25 A1 è di 6 punti percentuali dal 29 al 24%. I contenitori 2 e 3 sono interessati da un equilibrio costante aria - acqua che costante mantiene l'umidità di quel volume di suolo.

Allo stesso tempo però gli strati più profondi tendono a subire una lenta e continua asciugatura (Fig. 25 C e C1), questa situazione tende a non visualizzarsi nella tesi 2DL (Fig.26 C) dove a

parità di volume e numero di interventi l'umidità dei 55 cm resta costante attorno a valori del 55%.

L'umidità dello strato dei 15 cm dei contenitori 1-4 riportato nella Fig. 25 A per la strategia B diversamente da quello in 25 A non subisce nei giorni OFF il fenomeno dell'influenza delle irrigazioni dei contenitori 2-3 analizzato nel Cap. 2.10.1, in quanto i 2 contenitori utilizzati per l'irrigazione si trovano ciascuno nella parte opposta della pianta. Volendo spiegare meglio il fenomeno possiamo considerare che in strategia A ogni qualvolta i contenitori 2-3 vengono irrigati lasciano penetrare parte del volume irriguo verso quelli 1-4 adiacenti in arieggiamento, mentre nella strategia B quando gli esterni sono in OFF e quindi non vengono irrigati il volume irriguo del contenitore interno viene somministrato visto l'appaiamento 1-3 o 2-4 al contenitore speculare opposto lasciando asciutto il confinante.

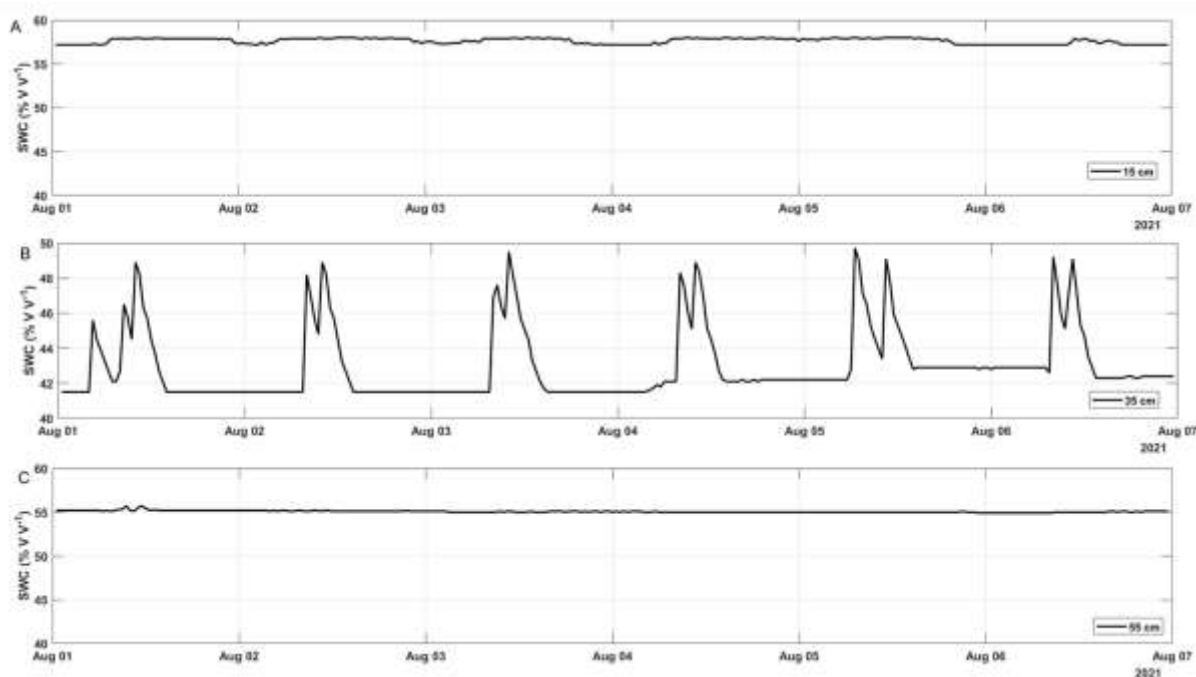


Fig. 26 Andamento dell'umidità del suolo monitorata per la tesi irrigua 2DL nel periodo 1 - 7 Agosto 2021, dove A, B e C identificano gli strati di suolo profondi 15, 25 e 55 cm.

2.10.3 Risposte fisiologiche della pianta alle strategie A e B .

Dalle oscillazioni delle umidità del suolo è stato possibile appurare che il metodo 4DL permette di applicare diverse strategie irrigue che consentono di gestire la variabilità spaziale (orizzontale e verticale) dell'umidità del suolo modulando la fase di bagnatura e asciugatura nei diversi comparti di suolo interessati dall'irrigazione.

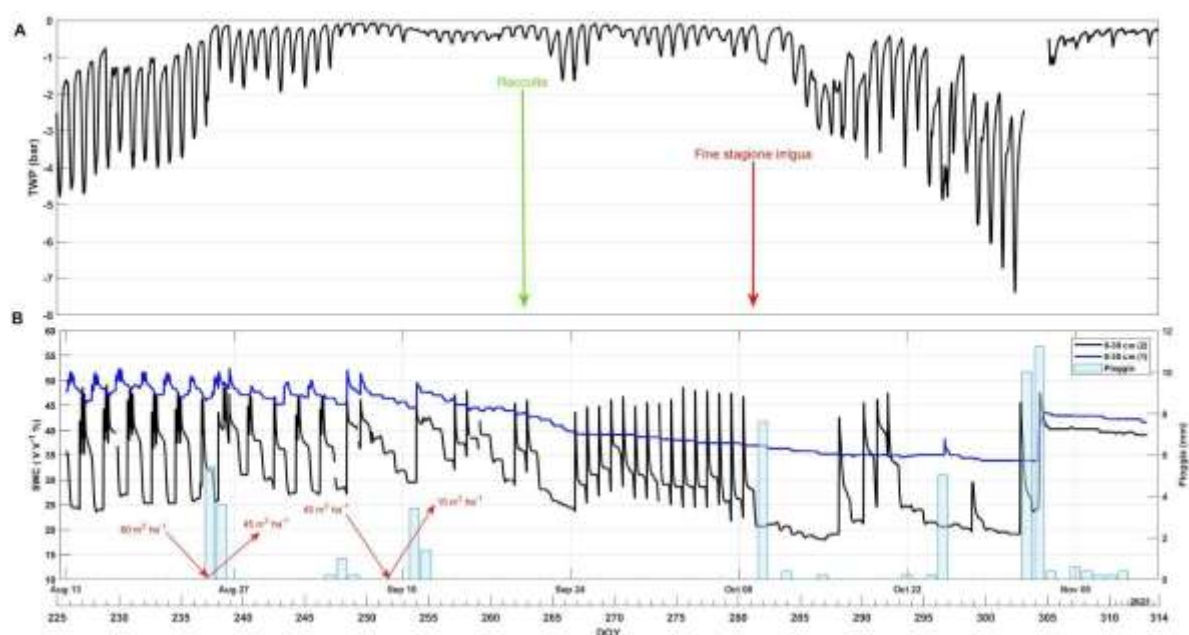


Fig. 27 Monitoraggio del Ψ_{trunk} (A) e dell'umidità media dello strato di 0-30 cm dei contenitori 1 e 2 (B) della tesi 4DL nel periodo dal 13 Agosto al 10 Novembre 2021 durante l'applicazione della strategia B.

Le Fig 27 e 28 mostrano l'andamento del TWP misurato nella tesi 4DL dalla data del raggiunto equilibrio xilematico dei sensori (13 Agosto 2021) fino a Novembre, periodo di caduta foglie e arrivo delle piogge associato alle oscillazioni di umidità del suolo monitorata nei contenitori 1 e 4.

La strategia B, è stata applicata dal DOY 225 al 245, i volumi irrigui sono stati somministrati ai contenitori 1-3 e 2-4 ad alternanza giornaliera, come messo in evidenza dall'andamento di umidità dello strato di suolo dei 35 cm riportato in Fig. 29 B per tale periodo. Rispettivamente a questo arco temporale l'andamento di TWP misurato nelle piante irrigate con tale strategia mostra dei valori a midday inferiori a quelli che individuano una condizione fisiologica ottimale di -2,5 bar per l'actinidia a polpa gialla (Di Biase et al., 2023; Di Biase et al., 2024 in revisione; Black M. et al., 2012; Boini, A. et al., 2022;). Fino al DOY 239 anche il potenziale idrico del tronco a predawn (PTWP) presenta valori che si discostano da quelli prossimi ai -0 bar. Considerando il PTWP, determinato direttamente dal contenuto idrico del suolo all'alba, quando i flussi traspirativi della pianta sono bloccati o minimi, esplicativo delle performance fisiologiche della pianta (Arnell, 1999) e del suo stato idrico (Gaudin et al., 2017) nelle sue diverse fasi di sviluppo (Carbonneau, 1998 e Deloire et al., 2004), è possibile ipotizzare che in tale condizione la pianta di notte non riesce ad utilizzare al meglio i volumi irrigui somministrati di $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ per recuperare dalla midday depletion. Solo con le precipitazioni del DOY 238 il TWP ritorna a

valori ottimali, seppur sospesa la strategia irrigua. Ai ridotti quantitativi idrici del suolo bisogna associare la domanda traspirativa ambientale considerando dal DOY 223 a 227 un VPD medio giornaliero superiore ai 2,2 kPa, i parametri ambientali infatti assieme al PLWP spiegano circa l'80% della varianza dei modelli di SWP, e in particolare ben il 66% della varianza dello SWP è spiegata dal PLWP (Suter et al., 2019).

Quindi in questa applicazione preliminare della strategia B la pianta non ha avuto la possibilità di sfruttare al meglio i volumi irrigui. Per definire le cause di questa condizione è stata analizzata una finestra temporale di 6 giorni della Fig. 27 nella Fig. 28, che focalizza il periodo in cui il TWP identifica lo stress idrico della pianta. Analizzando in dettaglio le oscillazioni volumetriche del SWC è possibile notare come nella sonda rappresentativa della profondità dei 15 cm del contenitore 2 a seguito degli interventi irrigui, l'umidità del suolo residua giornaliera diminuisce dal giorno dell'intervento (DAY ON) al giorno successivo (DAY OFF) di circa 13 punti percentuali. Diversamente nella sonda rappresentativa dei 35 cm del contenitore 1 l'umidità residua post interventi dal DAY ON a quello OFF si riduce solo dell' 1,9 %. Questo potrebbe infatti essere dovuto alla mancanza di assorbimenti radicali in questa zona e quindi al mancato depauperamento dell'umidità della pianta nei nuovi contenitori esterni ancora non colonizzati dalle nuove radici assorbenti.

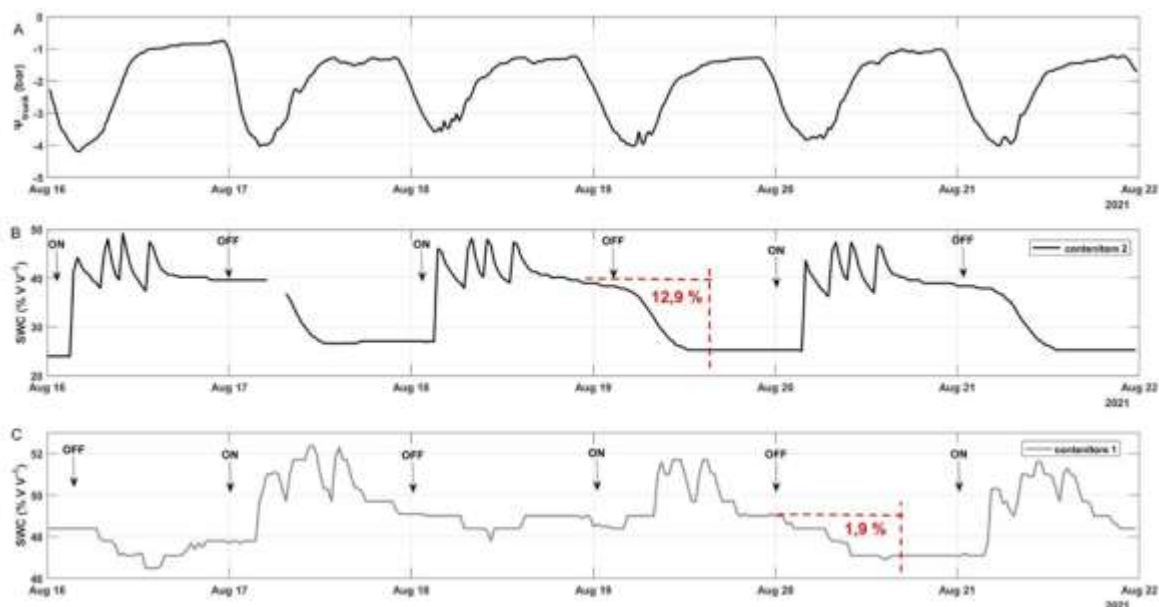


Fig. 28 Dettaglio del TWP (A) monitorato nella tesi 4DL durante un periodo di gestione irrigua seguendo una strategia del tipo B e andamento dell'umidità del suolo dello strato di 35 cm dei contenitori 2 e 1 rispettivamente (B) e (C).

2.11 Le strategie irrigue della stagione 2022

La Fig. 29 mostra gli andamenti di umidità nei primi 35 cm di suolo di tre giorni successivi della stagione irrigua 2022 in cui la programmazione irrigua seguiva una strategia di tipo A. I tre interventi irrigui giornalieri sono stati alternati rispettivamente all'interno dei contenitori 2-3, 1-4 e 2-3.

Dal monitoraggio delle oscillazioni di umidità del contenitore 2 (Fig. 29 A) i picchi irrigui rappresentano gli interventi delle ore 5:30 e alle 11:30 mentre in Fig.31 B è mostrato quello delle ore 9:00 effettuato al contenitore 1. In tal modo il volume irriguo giornaliero di 45 m³ ha⁻¹

veniva suddiviso in $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ erogato nei contenitori 2-3 prossimi alla pianta e $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in quelli esterni 1-4.

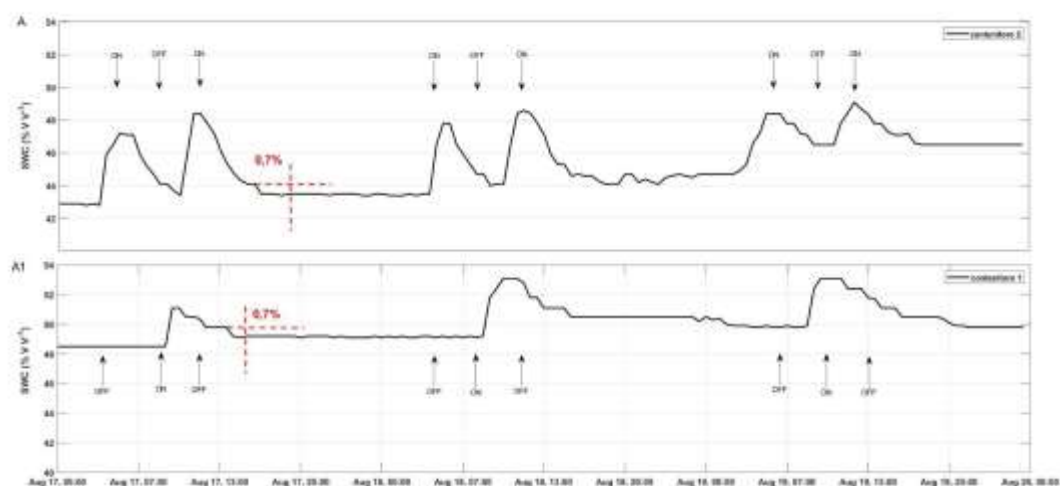


Fig. 29 Andamento dell'umidità del suolo misurata nel profilo dei 35cm dei contenitori 2 (A) e 1(B) per il periodo dal 17 al 19 Agosto 2022, durante l'applicazione di una strategia di tipo A.

A parità di profilo, le umidità del suolo delle Fig. 28 e 29 presentano delle oscillazioni diverse, in particolare nel contenitore 2, più prossimo alla pianta dove si concentra un maggior numero di radici. L'umidità infatti tende a ridurre le sue fluttuazioni. Confrontando i 35 cm del contenitore 2 in Fig. 28 B e 29 A le fluttuazioni si riducono dal 12,9% allo 0,7%. Nel 2021 il volume irriguo giornaliero di $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ veniva infatti distribuito in un unico giorno nello stesso contenitore seguendo una strategia di tipo A utilizzando quindi solo i contenitori interni o solo quelli esterni, mentre nel 2022 il volume irriguo giornaliero di $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, già ridotto rispetto al precedente, veniva suddiviso nello stesso giorno secondo una strategia B in più contenitori. La suddivisione in diversi contenitori tende infatti, unitamente alla riduzione volumetrica del 2022, a mantenere i valori di umidità del suolo più costanti in quanto l'intero fabbisogno irriguo giornaliero della pianta viene distribuito orizzontalmente nel volume di suolo esplorato dalle radici non subisce interventi irrigui successivi, non incrementando eccessivamente l'umidità di un unico contenitore.

Le dinamiche di SWC dei contenitori del 2022 sono state confrontate con i valori di flussi traspirativi medi delle piante. La Fig. 30 A mostra i flussi traspirativi delle piante irrigate con sistema 2DL e 4DL gestito con strategia A mentre in Fig. 30 B considera un periodo dove la tesi 4DL è stata gestita come una normale 2DL a cui è confrontata.

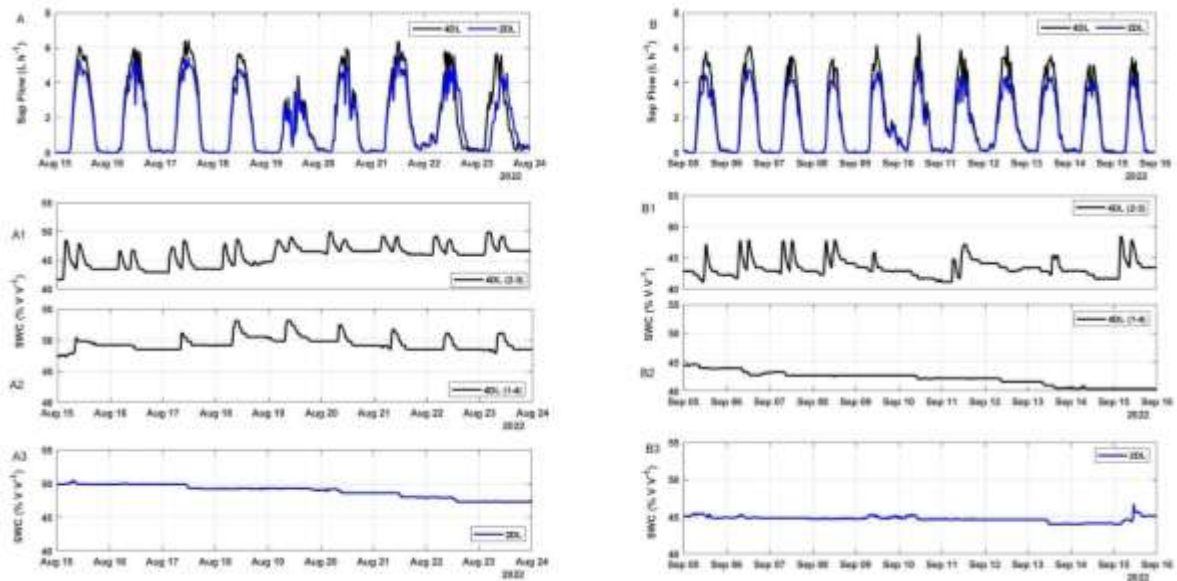


Fig. 30 Confronto flussi traspirativi delle tesi 4DL e 2DL (A e B), andamenti delle umidità dei contenitori 1-4 e 2-3 per la tesi 4DL (A1,A2 e B1 e B2) e del contenitore a 35 cm per la tesi 2DL (A3 e B3) monitorati in due diversi periodi di gestione irrigua rispettivamente Agosto dove è stata applicata la strategia A giornaliera e Settembre dove la gestione delle 4DL ha seguito quella di una normale doppia ala durante la stagione 2022.

Dal 15 al 24 Agosto, i due picchi giornalieri in Fig. 30 A1 rappresentano gli interventi irrigui nei contenitori 2-3 e il picco giornaliero in A2 rappresenta l'intervento giornaliero nel contenitore 1-4 intervallato ai precedenti. La programmazione irrigua seguita durante tale periodo vede l'apporto di $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ frazionati in tre interventi rispettivamente 6:30 (al contenitore 2-3), 10:00 (al contenitore 1-4) e 12:30 (al contenitore 2-3), timing e volumi identici sono stati erogati alla tesi 2DL. I flussi traspirativi delle 2 tesi riportati in figura A presentano picchi giornalieri prossimi a $6 \text{ e } 5 \text{ L h}^{-1}$ rispettivamente per la tesi 4 DL e 2DL che rappresentano valori in *range* ottimale per l'actinidia (Green et al. 1989 e 1995). A parità di volume irriguo i valori più elevati nella tesi 4D confermano che la gestione spaziale del suolo non inficia i flussi di traspirazione delle piante, anzi sembra aumentare proprio nelle ore più calde della giornata nelle quali la maggior traspirazione potrebbe migliorare il processo di climatizzazione delle foglie.

Durante l'intera stagione irrigua come mostrato in Fig. 31 A la tesi 4DL ha avuto, come la 2DL, picchi traspirativi sempre prossimi ai 6 L h^{-1} , riuscendo nel mese di Agosto in condizioni di VPD elevate a mantenere flussi traspiranti ottimali fino a quando nello stesso mese a seguito di una riduzione del VPD ha mostrato flussi migliori rispetto alla 2DL (riferimento in rosso in figura) che tende, con un LAI molto simile ($2,65 \text{ 2DL}$ e $2,69 \text{ 4DL}$ al 01 Settembre), a ridurre la traspirazione (Fig. 31 B).

Seppur gestita in maniera ottimizzata, la tesi 2DL mostra una riduzione graduale dell'umidità del suolo dei 35 cm dal 50 al 47% per il periodo studiato (Fig. 30 A3) che non compare nella 4DL (Fig. 30 A1 e A3). Questo potrebbe essere connesso all'alternanza dei 4 contenitori che tendono a mantenere costante il rapporto aria - umidità, riducendo le perdite per percolazione, infatti condizioni di suolo più umide tendono ad avere tassi di percolazione maggiori in quanto esiste una relazione lineare tra l'aumento dell'umidità del suolo e l'aumento del fenomeno di percolazione (S. G. Wangemann et al., 1999).

Sulla base di questo è possibile ipotizzare che i 3 interventi irrigui giornalieri della tesi 2DL venendo distribuiti sempre nello stesso contenitore possono generare fenomeni di percolazione. ulteriormente ampliato dall'assorbimento della pianta su un SWC ridotto rispetto al fabbisogno reale della coltura.

Nella sez. B della Fig. 30 è riportato l'andamento delle tesi 4DL e 2DL durante la prima metà di Settembre dove la tesi 4DL è stata gestita come una normale doppia ala, infatti diversamente dallo strato di suolo dei contenitori 1-4 (Fig. 30 B2) che gradualmente si asciugano, quello dei contenitori 2-3 (Fig. 30 B1) viene irrigato e mostra i picchi di umidità. Anche in questo periodo dove le stesse 4DL vengono gestite come le 2DL i picchi giornalieri dei flussi trapirativi risultano essere sempre prossimi ai 6 L h^{-1} non mostrano differenze con la gestione spaziale in strategia A.

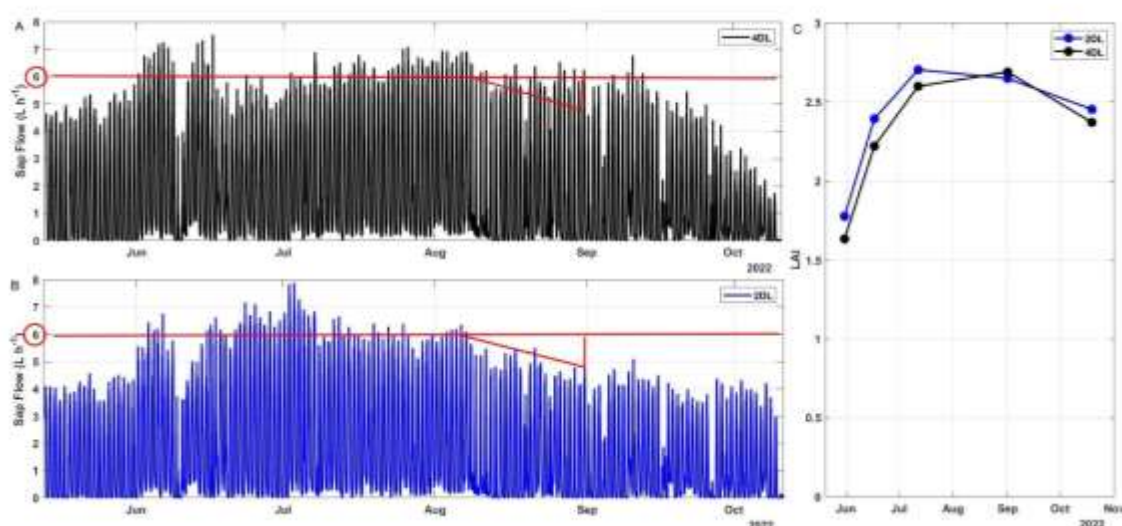


Fig. 31 Andamento dei flussi trapirativi delle tesi 4DL (A) e 2DL (B) durante la stagione 2022.

2.11 Valutazione preliminare dello sviluppo dell'apparato radicale nei contenitori di suolo 1-4.

L'obiettivo di questa valutazione è stato di indagare, in modo preliminare, la capacità di colonizzazione dell'apparato radicale dei nuovi contenitori (1-4) irrigati.

Nella tesi 4DL, a fine della stagione irrigua 2022, (dopo due anni di irrigazione) è stata valutata, tramite uno scavo a trincea, la presenza delle radici assorbenti nei nuovi volumi di suolo irrigati le osservazioni sono state effettuate su un lato di una pianta.

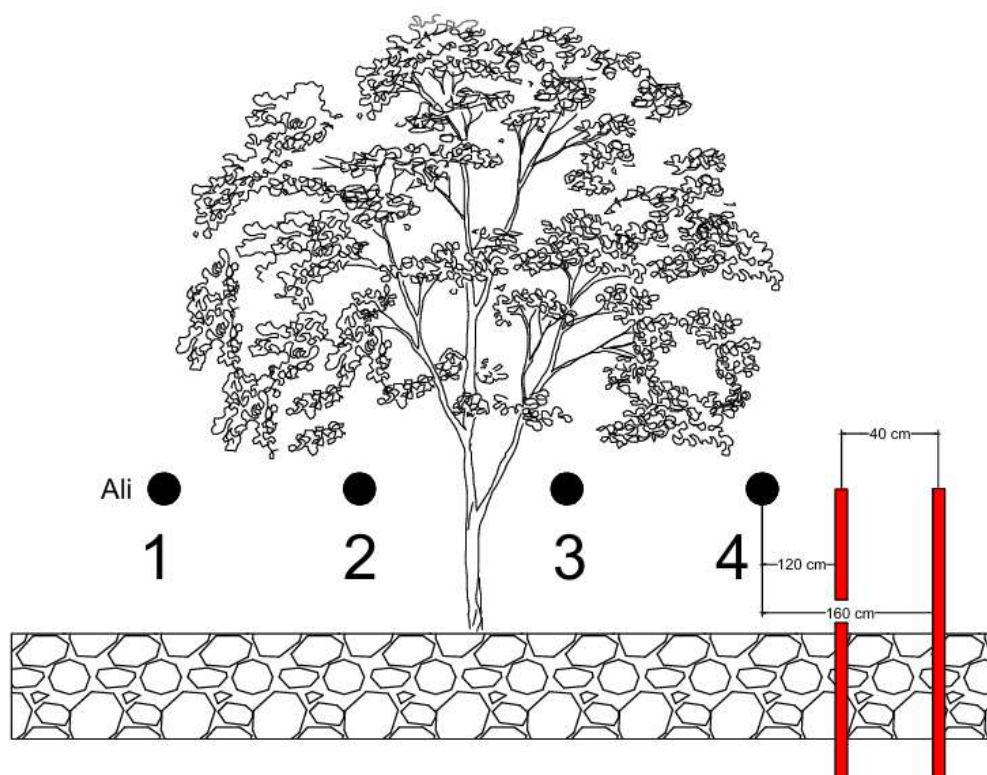


Fig. 32 Schema 3D del dimensionamento degli scavi per l'indagine e valutazione dello sviluppo delle nuove radici in tesi 4DL.

Due scavi sono stati realizzati a due differenti distanze dalla pianta e a diverse profondità (Fig. 32). Il primo scavo, a 120 cm dal fusto verso la fila e quindi a 20 cm decentrato oltre la posizione dell'ala (100 cm dal fusto), a tre diverse profondità rispettivamente 15-20, 20-40 e 50 cm. Un secondo scavo a 160 cm dal fusto verso la fila ed a una profondità tale da rappresentare lo strato profondo di 15-20 cm è stato realizzato per appurare fino a quanto le nuove radici si sono estese in un anno verso l'interfila nella zona non interessata dall'irrigazione

In Fig. 33 è mostrata la risultante degli scavi eseguiti nel 2022 a distanza di 120 e 160 cm dal tronco verso le nuove ali esterne per le profondità di 15-20, 20-40, 50 cm e 15-20 cm nella tesi 4DL. Per entrambi i punti esplorati e per ciascuna delle profondità sono state riscontrate radici sottili di neoformazione assorbenti attive, la produzione di nuove radici a distanza di un anno dal dimensionamento di nuovi contenitori di suolo mostra come alternando l'irrigazione di 4 fasce di terreno si riesca a garantire il corretto equilibrio tra umidità e aria creando così le

condizioni favorevoli allo sviluppo di nuove radici, assorbenti e in ottime condizioni morfologiche fino a 50 cm di profondità. Evitare situazioni di continua saturazione del volume di suolo rappresenta un fattore molto importante in quanto nell'actinidia l'apparato radicale tende rapidamente a perdere la funzionalità in una condizione di ridotta aerazione del suolo (Smith et al. 1989). Lo sviluppo di nuove radici nei contenitori 1-4 conferma la risaputa importanza dell'aerazione del suolo e della presenza di un giusto grado di umidità sul tasso di allungamento delle radici (Voorhees, W. B et al.1975).

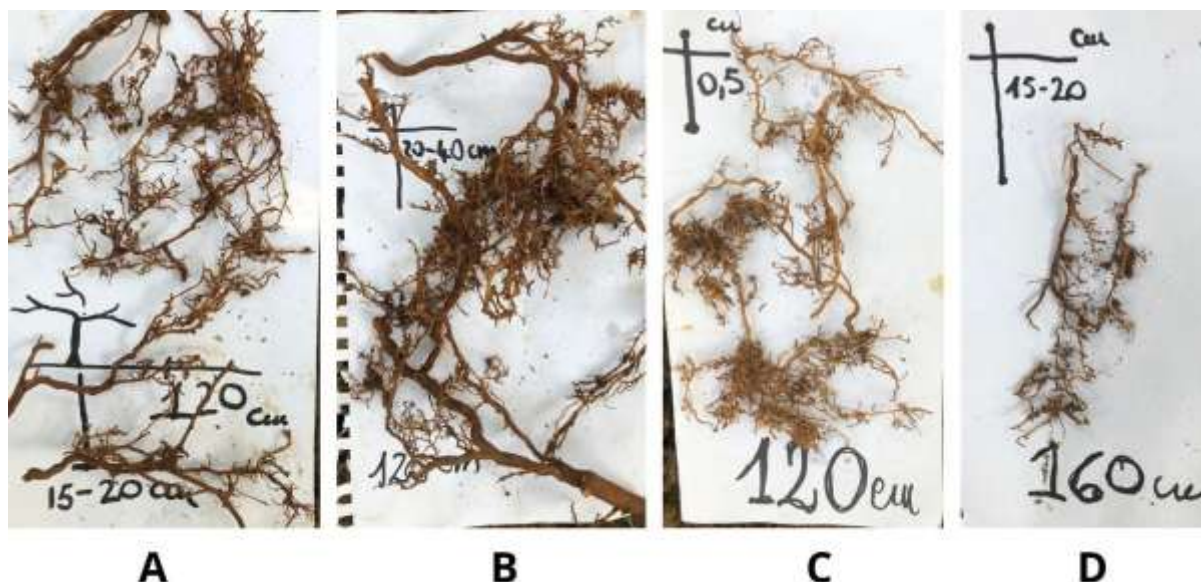


Fig. 33 Apparato radicale riscontrato negli scavi di verifica nel sistema irriguo 4DL nell'anno 2022, dove A è lo strato profondo 15-20 cm a distanza 120 cm dal tronco verso l'interfila, B è lo strato 20-40 cm a distanza 120 cm dal tronco verso l'interfila, C è lo strato 50 cm a distanza 120 cm dal tronco verso l'interfila, D è lo strato 15-20 cm a distanza 160 cm dal tronco verso l'interfila.

Normalmente con metodo irriguo classico come potrebbe essere il 2DL, ma anche un micro-sprinkler, l'irrigazione viene effettuata sempre nello stesso volume di suolo e tale situazione in terreni asfittici e con volumi irrigui in eccesso potrebbe favorire l'instaurarsi di condizioni asfittiche in corrispondenza di porzioni di suolo, più bagnate dall'erogatore. Tale condizione non favorisce il turn-over di nuove radici. La gestione dinamica dell'irrigazione con metodo 4DL tende invece ad estendere le porzioni di suolo con condizioni favorevoli allo sviluppo delle radici ad una zona più ampia verso l'interfila. La pianta adatta lo sviluppo degli organi a seconda delle condizioni ambientali che ritrova, quindi la configurazione spaziale delle nuove radici (numero, lunghezza e organografia laterale) dipende e varia oltre che per specie vegetale anche per composizione del suolo e disponibilità di acqua (Malamy 2005). L'estensione laterale è dovuta proprio agli stimoli ambientali come acqua e aria nel suolo ma anche a stimoli biotici (parliamo di micorrize microbioma rizosferico?), queste condizioni attivano fattori genetici endogeni che regolano l'ormonogenesi radicale e quindi la produzione di nuove radici (Malamy 2005). Sebbene gli studi vadano approfonditi per valutare tutte le condizioni di salute del suolo (aerazione, potenziale redox, attività microbica, ecc) possiamo preliminarmente affermare che la gestione dinamica dell'irrigazione con il metodo irriguo ad ali gocciolanti indipendenti (4DL) tende proprio a ricreare queste condizioni favorevoli in 4 porzioni di suolo della pianta

favorendo il normale sviluppo delle radici nel profilo di suolo verticale ma anche in quello orizzontale.

2.12 Le strategie applicate nella stagione irrigua 2023

Nella stagione irrigua 2023, è stato implementato il numero delle sonde di umidità installate nella tesi 4DL riuscendo così a monitorare il contenuto idrico dei diversi profili di suolo (0- 60 cm di profondità in ciascun contenitore rispettivamente 1, 2, 3 e 4) di tutti e quattro i contenitori contemporaneamente. In Fig. 34 è riportata l'umidità di tutti i contenitori, rispettivamente 1 e 2 situati a sinistra della pianta e 3 e 4 alla sua destra per le profondità di suolo mediate di 0-30 e 30-60 cm .

Nel 2023 considerato che l'apparato radicale assorbente si era esteso fino ai 160 cm dal fusto, si è voluto approfondire la capacità di assorbimento differenziata della pianta in relazione alla distribuzione dell'umidità nel comparti di suolo, mantenendo ottimale lo stato idrico e i flussi traspirativi. Per tale obiettivo la strategia di alternanza A dei contenitori è stata utilizzata per un periodo di tempo più esteso. Durante il periodo che va dal 28 Agosto al 30 Ottobre 2023 sono stati alternati i contenitori 2-3 e 1-4, questi ultimi però diversamente dagli anni precedenti, dove sono stati utilizzati principalmente come supporto per arieggiare i 2-3, hanno avuto una funzione irrigua. In particolare dal 27 Agosto al 14 Settembre e dal 12 al 16 ottobre (fine stagione irrigua) le piante sono state irrigate unicamente tramite i contenitori più distanti (1-4) lasciando ossigenare i 2-3 interni che hanno ridotto i loro valori di SWC del 15 % nel profilo 0-30 cm e del 2% nello strato profondo 30 - 60 cm (Fig 34) Per tale periodo sono stati monitorati i parametri fisiologici della pianta sia nella tesi 4DL che nella 2L.

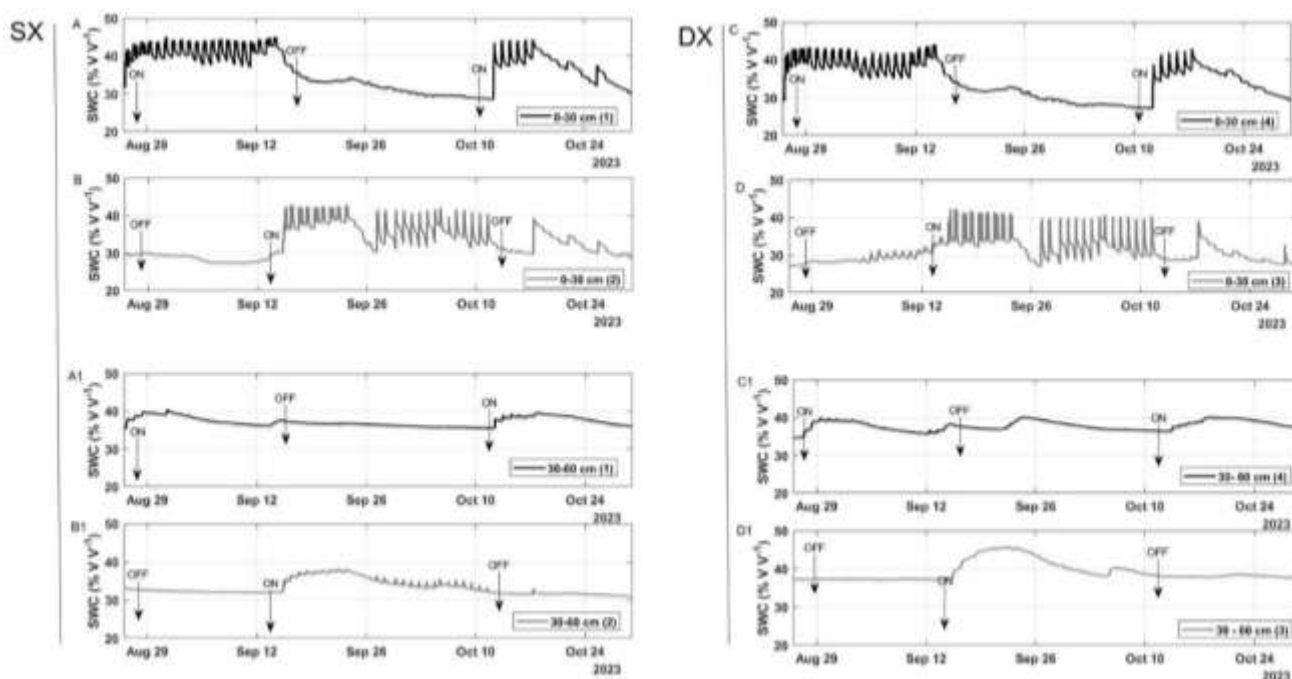


Fig. 34 Andamento dell'umidità media dei contenitori 1, 2, 3 e 4 del suolo per gli strati 0 - 30 cm (A, B, C, D) e 30 - 60 cm (A1, B1, C1 e D1).

La Fig. 38 mostra i risultati del monitoraggio integrato suolo - pianta tramite sonde di umidità del suolo, sap flow e microtensiometri. Dal 27 Agosto al 14 Settembre durante l'utilizzo dei contenitori 1-4 i flussi traspirativi rimangono stabili tra i 4 e 5 L ha⁻¹ e il TWP a midday rimangono stabili tra i -2 e -4,5 bar. L'irrigazione con i contenitori 1-4 ha quindi mantenuto valori fisiologici ottimali (Di Biase et al., 2023 e 2024 in revisione; Black M. et al., 2012; Boini, A. et al., 2022;) riuscendo ad assorbire acqua tramite le radici che nel corso dei tre anni hanno colonizzato i contenitori 1-4. Rispetto ai periodi analizzati in precedenza i valori di traspirazione risultano più bassi essendo in corrispondenza della fine del ciclo vegetativo e quindi al periodo di inizio caduta foglie, dove i tassi di traspirazione tendono a ridursi in misura diversa a seconda delle colture (Tognetti et al., 2004; Paloschi et al., 2021; Sun et al., 2022;). A tale riduzione corrisponde anche una riduzione significativa dei valori di VPD stagionale, considerando indici di correlazione tra i due con r^2 anche di 0,83 nel caso di olivo irriguo e 0,80 non irriguo (Tognetti et al., 2004);

La riduzione del TWP a valori di -4 bar in data 11 Settembre è un'evidenza dall'applicazione di un volume insufficiente al fabbisogno idrico della pianta, infatti si nota una riduzione di umidità nel suolo di circa il 2 % tra il 5 e l'11 Settembre.

Dal 13 settembre è avvenuto lo switch con i contenitori 2-3 e contestualmente il volume irriguo è stato incrementato da 50 a 60 m³ ha⁻¹. Nei giorni successivi il TWP tende ad aumentare e raggiungendo stabilmente valori prossimi -2 bar che indica uno stato idrico ottimale. Quindi la gestione irrigua, anche di lungo periodo, con i contenitori 1-4 non comporta scompensi per le performance fisiologiche della pianta e consente la turnazione dei diversi comparti suolo al fine di evitare fenomeni di asfissia radicale da ristagno per sovrassaturazione.

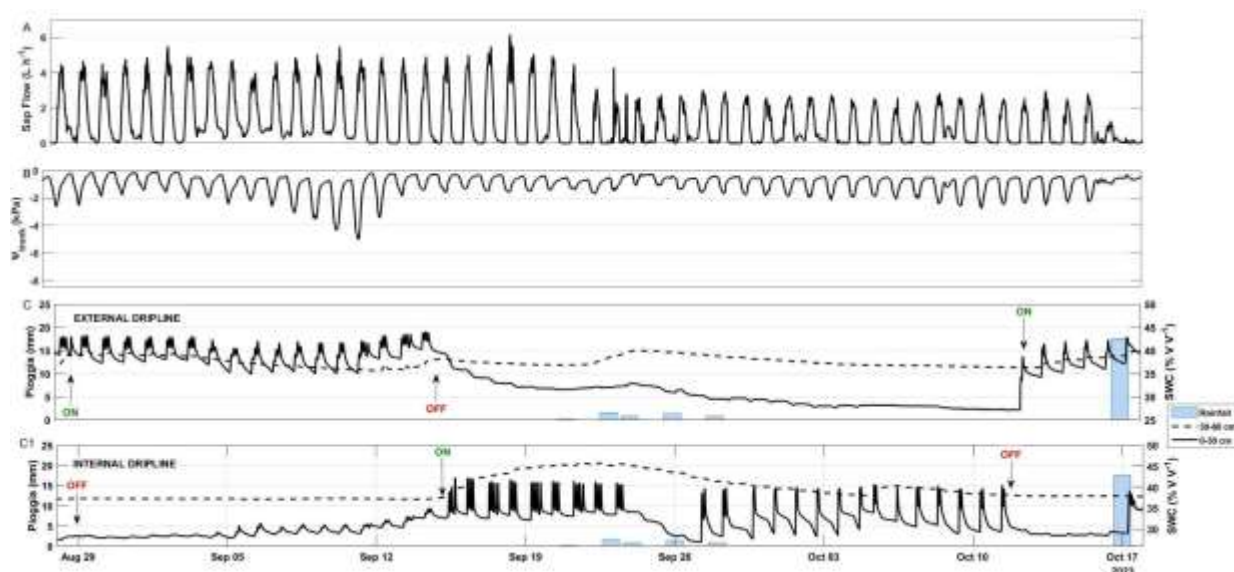


Fig. 38 Andamento del flusso traspirativo (A) e del TWP (B) della pianta e umidità del suolo mediate per gli strati 0-30 (C) e 30 - 60 cm (C1) nella tesi 4DL per il periodo 27 Agosto - 18 Ottobre 2023.

Nella Fig. 39 sono riportati gli analoghi parametri per la tesi di controllo 2DL, anche in questa come per la 4DL i valori TWP oscillano in range ottimali e il di flusso traspirativo compreso tra valori di 5 e 4 L ha^{-1} . La tesi 2D è sempre irrigata a parità di volume e numero di interventi irrigui motivo per cui anche in questa dal 5 all' 11 Settembre è stata rilevata una riduzione del SWC Fig. 39 (C e C1) che ha lasciato ridurre il TWP da -2,5 a circa -6 bar. All'aggiustamento del volume irriguo infatti è corrisposto un aumento dell'umidità del suolo e un aumento del TWP a valori prossimi a -2 bar.

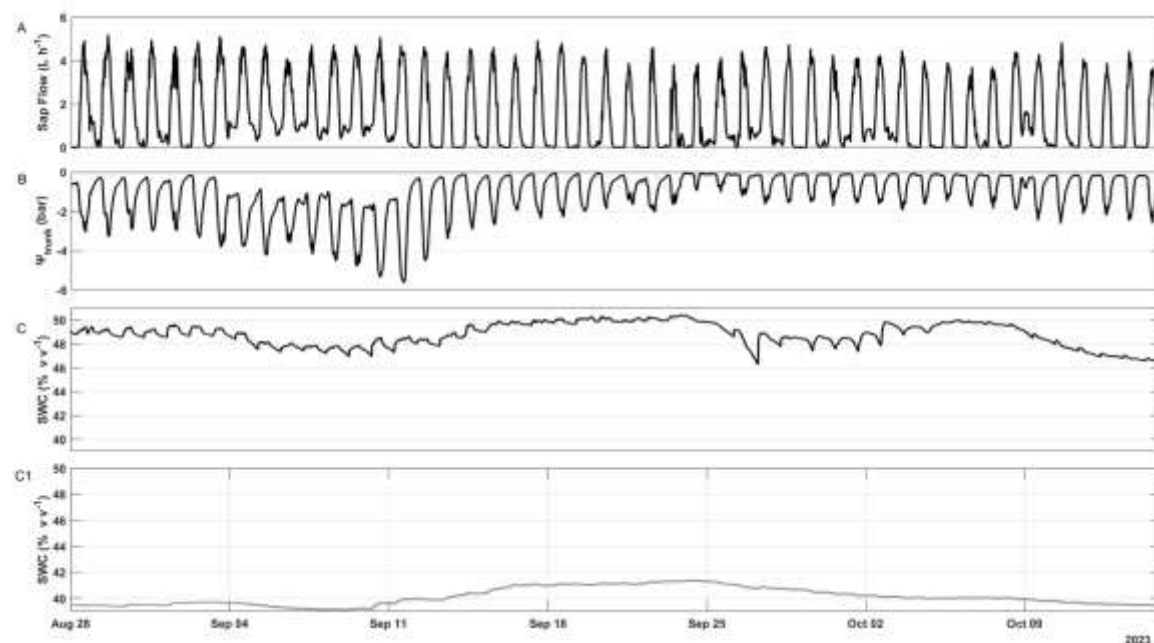


Fig. 39 Andamento del flusso traspirativo (A) e del TWP (B) della pianta e umidità del suolo mediate per gli strati 0-30 (C) e 30 - 60 cm (C1) nella tesi 2DL per il periodo 27 Agosto - 18 Ottobre 2023.

2.13 Analisi delle produzioni

I valori annuali delle produzioni in Ql ha⁻¹ riportati in tabella 12 sono stati determinati secondo quanto riportato nel Cap. 1.11.1. Come mostra la tabella 12.1 tra il 2021 e il 2022 non sono state riscontrate differenze statistiche tra le tesi, mentre nel 2024 la tesi 4DL è risultata la più produttiva con un produzione annua di 335 Ql ha⁻¹ rispetto alla 2DL e in particolare rispetto alla tesi aziendale che ha prodotto 271 Ql ha⁻¹, una differenza di 64 Ql ha⁻¹.

Tab. 12 : Produzioni delle tesi 2DL, 4DL e della parcella aziendale (A)

Tesi	2021	2022	2023	2024
	Q ha ⁻¹			
4DL	317	299	316	335
2DL	314	293	304	314
Aziendale	----	280	287	271

Tab. 12.1: Analisi statistica delle produzioni mediante test Anova per le tesi 4DL, 2DL e della parcella azienda "A". Significatività dei codici p < 0,05 = *; p < 0,01 = **; p < 0,001 = ***

Anno	Gruppo 1	Gruppo 2	p
2021	4DL	2DL	0,84
2022	4DL	2DL	0,59
	4DL	A	0,25
	2DL	A	0,1
2023	4DL	2DL	0,45
	4DL	A	0,08
	2DL	A	0,3
2024	4DL	2DL	4,00E-06***
	4DL	A	5,86E-16***
	2DL	A	1,05E-11***

2.13.1 Analisi della qualità

I risultati delle analisi qualitative sulle tesi 2DL e 4DL sono mostrati nella Tab.13 e ottenuti tramite la metodologia spiegata nel Cap. 1.11.2.

Dall'analisi statistica mediante test ANOVA della Tab.13 risulta che tra le tesi 4DL e 2DL ad esclusione dell'anno 2023 vi sono state sempre differenze significative della consistenza, l'indice di colore ha presentato differenze statistiche solo nelle stagioni 2022 e 2024, mentre ogni anno la sostanza secca è risultata statisticamente differenziata per entrambi i trattamenti.

Il peso dei frutti non ha mostrato differenze per le stagioni successive dal 2021 al 2023, differenziandosi invece nel 2024,.

Tab. 13 Risultati delle analisi di qualità dei frutti effettuate alla raccolta nelle tesi 4DL e 2DL per gli anni 2021, 2022, 2023 e 2024. Significatività dei codici, ns= non significativo, $p < 0,05 = *$; $p < 0,01 = **$; $p < 0,001 = ***$

TESI	ANNO	PESO (g)	BRIX (°Bx)	SS (%)	CONSISTENZA (kg/cm ²)	COLORE (H°)
4DL	2021	101,29	8,29	18,24%	7,64	107,08
2DL		100,68	8,56	18,62%	6,77	106,41
Significatività		ns	ns	*	***	ns
4DL	2022	94,85	8,82	19,34%	6,36	103,44
2DL		96,70	10,84	18,92%	5,60	102,03
Significatività		ns	***	***	***	***
4DL	2023	108,95	10,39	18,37%	6,19	102,26
2DL		129,15	8,93	18,00%	6,09	102,55
Significatività		ns	ns	ns	ns	ns
4DL	2024	129,33	7,5	20,47%	8,65	108,53
2DL		130,62	8,6	21,92%	7,63	105,60
Significatività		ns	**	***	***	**

Conclusioni

I fenomeni di stress idrico (water deficit e waterlogging) stanno diventando gli stress abiotici più diffusi nei sistemi agricoli. Soprattutto a causa del crescente riscaldamento globale, della irregolarità delle precipitazioni e del drenaggio insufficiente (Stuart et al., 2011). L'actinidia ha un apparato radicale poco profondo con un elevato tasso traspirativo che sono causa della sua forte sensibilità a fenomeni di eccesso idrico (Meng-yun Xing et al., 2023).

La possibilità di avere metodi irrigui che consentono una distribuzione spazio-dinamica dell'acqua garantisce un arieggiamento continuo nelle diverse porzioni del suolo e una continua crescita delle radici assorbenti. Tale gestione irrigua permette di ottimizzare le performance fisiologiche della pianta mettendola nelle condizioni di massimizzare la produzione. L'utilizzo dell'impianto irriguo a quattro ali gocciolanti per irrigazione dell'actinidia associato sempre al monitoraggio in continuo dell'umidità del suolo può essere e un metodo funzionale per aumentare il numero di strategie irrigue perseguibili nelle diverse fasi fenologiche del ciclo vegetativo della coltura e pertanto raggiungere tutti gli obiettivi di un'irrigazione di precisione.

Bibliografia

Agrios, G. N. 1988: Plant pathology. Third edition. New York, Academic Press, 803 p.

Alekseev, Mineralogy of Pedogenesis in the Steppe and Forest-Steppe Zones of Moldova: Diagnostics, Parameters, Factors, and Processes (Chisinau, 1997) [in Russian].

Arnell, N. W. (1999). The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change*, 9(1), 5–23. [https://doi.org/10.1016/s0959-3780\(98\)00015-6](https://doi.org/10.1016/s0959-3780(98)00015-6)

Arshad, I., 2020. Importance of Drip Irrigation System Installation and Management - A Review. *PSM Biol. Res.*, 5(1): 22-29.

Bailey-Serres J, Voesenek LACJ (2008) Flooding stress: acclimations and genetic diversity. *Ann Rev Plant Biol* 59:313–339

Begg JE, Turner NC (1970) Water potential gradients in Weld tobacco. *Plant Physiol* 46:343–346

Beutel AJ (1985) Riego y nutrición en kiwi. Fundación Chile. *División Frutas y Hortalizas*. Santiago Chile

Black, M. (2012). *The kiwifruit (Actinidia sp.) vine root system: responses to vine manipulations*.

Boini, A., Cavallina, L., Perulli, G., Bresilla, K., Bortolotti, G., Morandi, B., Corelli Grappadelli, L. and Manfrini, L. (2022). *Actinidia chinensis*: physiological and productive performance under water stress condition. *Acta Hort.* 1346, 43-50 DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1346.6 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1346.6>

Boynton, D. (1939) Soil atmosphere and the production of new rootlets by apple tree root systems. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 37, 19 - 26

Boynton, D., Compton, O. C. (1943) Effect of oxygen pressure in aerated nutrient solution on production of new roots and on growth of roots and tops of fruit trees. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 42, 53 - 58

Boynton, D., de Villiers, J. I., Reuther, W. (1938) Are there different critical oxygen levels for the different phases of root activity? *Science* 88, 569 – 570

Bouten, W., Heimovaara, T. J., & Tiktak, A. (1992). Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a Douglas fir stand. *Water Resources Research*, 28(12), 3227-3233.

Bryla, D. R., Trout, T. J., Ayars, J. E., & Johnson, R. S. (2003). Growth and Production of Young Peach Trees Irrigated by Furrow, Microjet, Surface Drip, or Subsurface Drip Systems. *HortScience*, 38(6), 1112–1116. <https://doi.org/10.21273/hortsci.38.6.1112>

Buwalda, 1. G.; Hutton, R. C. 1988: Seasonal changes in root growth of kiwifruit. *Scientia horticulturae* 26: 251-260.

Carbonneau, A., 1998. Aspects qualitatifs, 258–276. In: Tiercelin, J.R. (Ed.), *Traite d'irrigation*. Tec&Doc. Lavoisier Ed., Paris, p. 1011

Caron J, Kay BD, Stone JA (1992) Improvement of structural stability of a clay loam with drying. *Soil Sci Soc Am J* 56:1583 1590

Chakraborty, P., Singh, N., Bansal, S., Sekaran, U., Sexton, P., Bly, A., Anderson, S. H., & Kumar, S. (2022). Does the duration of no-till implementation influence depth distribution of soil organic carbon, hydro-physical properties, and computed tomography-derived macropore characteristics? *Soil and Tillage Research*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105426>

Coenders-Gerrits, A. M. J., Hopp, L., Savenije, H. H., & Pfister, L. (2013). The effect of spatial throughfall patterns on soil moisture patterns at the hillslope scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5), 1749-1763.

Deloire, A., Carbonneau, A., Wang, Z., Ojeda, H., 2004. Vine and water a short review. *J. Int. des Sci. de la Vigne et du Vin* 38, 1–13

Demir, H., Kaman, H., Sönmez, İ., Uçan, U., & Akgün, İ. H. (2024). Yield and Yield Parameters Response of Cabbage to Partial Root Drying and Conventional Deficit Irrigation. *Agronomy*, 14(11).

Di Biase, R., Calabritto, M., Pietrafesa, A., Laterza, D., Mininni, A. N., & Dichio, B. (2023, January). Continuous monitoring of trunk water potential by microtensiometers as a tool to assess kiwifruit plant water status under different irrigation systems. In *X International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 1409* (pp. 111-120).

Dichio B, Montanaro G, Sofo A, Xiloyannis C (2013). Stem and whole-plant hydraulics in olive (*Olea europaea*) and kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Trees*, 27:183-191. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0787-3>

Emdad, M. R., Raine, S. R., Smith, R. J., & Fardad, H. (2004). Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation. *Irrigation Science*, 23(2), 55–60. <https://doi.org/10.1007/s00271-004-0093-y>

Fereres, E., Goldhamer, D., (1990) Deciduous fruit and nut trees. In: Stewart, B.A., Nielsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph No. 30. American Society of Agronomy, Madison, pp. 987–1017.

Gaudin, R., Roux, S., & Tisseyre, B. (2017). Linking the transpirable soil water content of a vineyard to predawn leaf water potential measurements. *Agricultural Water Management*, 182, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.006>

González-Cebollada, C., 2015. Water and energy consumption after the modernization of irrigation in Spain. *WIT Trans. Built Environ.*, 168(1): 457–465.

Green, S., Clothier, B., 1999. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil* 206, 61–77.

Green, S., Reyes, F., Dichio, B., Mastroleo, M. and Xylogiannis, E. (2022). Water use of yellow-fleshed kiwifruit during an annual cycle. *Acta Hortic.* 1332, 187-194 DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.25 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1332.25>

Gur, A., Dasberg, S., Schkolnik, I., Sapir, E., & Peled, M. (1979). The influence of method and frequency of irrigation on soil aeration and some biochemical responses of apple trees. *Irrigation Science*, 1(2). <https://doi.org/10.1007/bf00263096>

Hillel, D. (2000). Salinity management for sustainable irrigation: Integrating science, environment, and economics. Washington DC: The World Bank.

Holzapfel, E. A., Merino, R., Mariño, M. A., & Matta, R. (2000). Water production functions in kiwi. *Irrigation Science*, 19(2), 73.

Huang, B. and Scott NeSmith, D. (1999). SOIL AERATION EFFECTS ON ROOT GROWTH AND ACTIVITY. *Acta Hortic.* 504, 41-52 DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.504.3 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.504.3>

Hughes, K. A., & Wilde, R. H. (1989). The effect of poor drainage on the root distribution of kiwifruit vines. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 17(3), 239–244. <https://doi.org/10.1080/01140671.1989.10428038>

Hunt, A. G. (2005). Continuum Percolation Theory for Saturation Dependence of Air Permeability. *Vadose Zone Journal*, 4(1), 134–138. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0134a>

Hussein-Mounzer, O., Rodolfo Mendoza-Hernández, J., Abrisqueta-Villena, I., Mario Tapia-Vargas, L., María Abrisqueta-García, J., Vera-Muñoz, J., & Carmen Ruiz-Sánchez, M. (2008). soil water content measured by fdr probes and thresholds for drip irrigation management in peach trees in *agricultura técnica en México* (vol. 34).

James K. Mitchell and Kenichi Soga (2005). Fundamentals of Soil Behavior Third Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Copyright 2005 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved

JACKSON, M. B. & DREW, M. C. (1984). Effects of flooding on growth and metabolism of herbaceous plants. In: Flooding and Plant growth (Ed. by T. T. Kozlowski), pp. 47-128. Academic Press, Orlando.

JUSTIN, S. H. F. W. & ARMSTRONG, W. (1987). The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. *New Phytologist* 106, 465-495.

- Kulczewski M (1988) Analisis del comportamiento del kiwi en Chile. *Rev Frutõc* 9: 3±11
- Levy GJ, Miller WP (1997) Aggregate stability of some southern US soils. *Soil Sci Soc Am J* 61:1176–1182
- Limami, Anis M., Houssein Diab, and J  r  my Lothier. "Nitrogen metabolism in plants under low oxygen stress." *Planta* 239 (2014): 531-541.
- Malamy, J. (2005) Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant Cell Environ.* 28,67–77.
- Medda, S., Fadda, A., & Mulas, M. (2022). Influence of Climate Change on Metabolism and Biological Characteristics in Perennial Woody Fruit Crops in the Mediterranean Environment. In *Horticulturae* (Vol. 8, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040273>
- Michelakis, N.; Vougioucalou, E. and Clapaki G. 1993. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management* 24, 119-131
- Montanaro G, Dichio B, Xiloyannis C (2007). Response of photosynthetic machinery of field-grown kiwifruit under Mediterranean conditions during drought and rewatering. *Photosynthetica*, 45:533-540. <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0091-4>
- Murray, R. S., & Grant, C. D. (2007). *The Impact of Irrigation on Soil Structure*.
- Najafi, P., Tabatabaei, S.H., 2007. Effect of using subsurface drip irrigation and ET-HS model to increase WUE in the irrigation of some crops. *Irri. Drain.*, 56(4): 477–486.
- Oster J.D. & Jayawardane N.S. 1998. Agricultural management of sodic soils. In: M.E. Summer & R. Naidu (Eds) *Sodic Soils: Distribution, Processes, Management and Environmental Consequences* (pp 125–147). Oxford Univ. Press, New York.
- Paloschi, R. A., Ramos, D. M., Ventura, D. J., Souza, R., Souza, E., Morellato, L. P. C., N  brega, R. L. B., Coutinho,   . A. C., Verhoef, A., K  rting, T. S., & Borma, L. D. S. (2021). Environmental drivers of water use for caatinga woody plant species: Combining remote sensing phenology and sap flow measurements. *Remote Sensing*, 13(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs13010075>
- Postel, S., (2000). Redesigning irrigated agriculture. In: Starke, L. (Ed.), *State of the World 2000*. Publ. WW Norton and Co, New York, pp. 39–58
- Prikhod'ko, V. E. (2008). Changes in soil properties at different levels of soil structural arrangement under the impact of irrigation. *Eurasian Soil Science*, 41(13), 1469–1479. <https://doi.org/10.1134/S1064229308130176>
- Rasiah V, Kay BD, Martin T (1992) Variation of structural stability with water content: Influence of selected soil properties. *Soil Sci Soc Am J* 56:1604–1609

Reid, J. B., Tate, K. G., Brown, N. S., & Cheah, L. H. (1991). Effects of flooding and alluvium deposition on kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) 1. early vine decline. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 19(3), 247–257. <https://doi.org/10.1080/01140671.1991.10421808>

Rengasamy, P. (2018). Irrigation Water Quality and Soil Structural Stability: A Perspective with Some New Insights. In *Agronomy* (Vol. 8, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050072>

Rengasamy, P.; Olsson, K.A. Irrigation and sodicity. *Aust. J. Soil Res.* 1993, 31, 821–837.

Rosenbom, A.E.; Binning, P.J.; Aamand, J.; Dechesne, A.; Smets, B.F.; Johnsen, A.R. (2014) Does microbial centimeter-scale heterogeneity impact MCPA degradation in and leaching from a loamy agricultural soil? *Sci. Total Environ*, 472, 90–98.

SMITH, G. S., JUDD, M. J., MILLER, S. A., & BUWALDA, J. G. (1990). Recovery of kiwifruit vines from transient waterlogging of the root system. *New Phytologist*, 115(2), 325–333. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00459.x>

SMITH, G. S., BUWALDA, J. G., GREEN, T. G. A. & CLARK, C. J. (1989). Effect of oxygen supply and temperature at the root on the physiology of kiwifruit vines. *New Phytologist* 113, 431–437

Smith, R.J., Uddin, M., Gillies, M.H., Clurey, P.M., 2016. Evaluating the performance of automated bay irrigation. *Irrig. Sci.*, 34(1): 175–185.

Stevens, R. M. and Douglas, T. 1994. Distribution of grapevine roots and salt underdrip and full-ground cover microjet irrigation systems. *Irrigation Science*. 15, 147–152.

Stuart, M. E., Goody, D. C., Bloomfield, J. P., & Williams, A. T. (2011). A review of the impact of climate change on future nitrate concentrations in groundwater of the UK. In *Science of the Total Environment* (Vol. 409, Issue 15, pp. 2859–2873). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.016>

Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., Yeager, J., (1997) Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTech* 7, 23–29.

Shainberg, I., and J. Letey, (1984) Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* 52: 1–57

Shackel, K. A. (2006). *Water relations of woody perennial plant species Régime hydrique chez les espèces pérennes ligneuses*. VIe Congrès International des Terroirs Viticoles 2006 - Vth International Terroir Congress 2006

Sofo, A., Dichio, B., Elshafie, H. S., Camele, I., Calabritto, M., Tomasi, I., ... & Mininni, A. N. (2024). Enhancing soil properties through sustainable agronomic practices reduced the occurrence of kiwifruit vine decline syndrome. *Soil Use and Management*, 40(2), e13052.

Strugaleva, I. T. Trofimov, N. P. Chizhikova, and L. P. Kozlennova, "Effect of the 40-Year-Long Irrigation on the Chemical Composition and Mineralogy of the Aleisk Irrigation System in Altai Krai," in *Saline Soils of Altai, Their Properties, and Reclamation* (Barnaul, 1980), pp. 107–121 [in Russian].

Sun, X., Li, J., Cameron, D., & Moore, G. (2022). Sap flow monitoring of two Australian native tree species in a suburban setting: Implications for tree selection and management. *Plant Science*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111194>

Suter, B., Triolo, R., Pernet, D., Dai, Z., & Van Leeuwen, C. (2019). Modeling stem water potential by separating the effects of soil water availability and climatic conditions on water status in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Frontiers in Plant Science*, 10, 1485.

Thorburn, PJ, Dart, IK, Biggs, IJ and Keating, BA (2002). The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. In: PJ Thorburn, KL Bristow and J Annandale (Eds), *Micro irrigation: Advances in system design and management*. Irrigation Science

Tognetti, R., D'andria, R., Morelli, G., Calandrelli, D., & Fragnito, F. (2004). Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. In *Plant and Soil* (Vol. 263).

Turner, N.C., (1990) Plant water relations and irrigation management. *Agricultural Water Management* 17, 59–73.

Valenzuela L (1988) Controle mejor el riego de sus kiwis. *Rev Frutõc* 9: 77±84

Valenzuela L, Godoy P (1990) La raiz del kiwi: actividad, interaccion con el resto de la planta y participacion en la produccion. *Rev Frutõc* 11: 71±80

Vlek, P. L. G., Hillel, D., & Braimoh, A. K. (2008). *Soil Degradation Under Irrigation*. <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/main/index.stm>

Voorhees, W. B., Farrell, D. A., & Larson, W. E. (1975). *DIVISION S-6-SOIL AND WATER MANAGEMENT AND CONSERVATION Soil Strength and Aeration Effects on Root Elongation 1*.

Wangemann, S. G., Kohl, R. A., & Molumeli, P. A. (2000). Infiltration and percolation influenced by antecedent soil water content and air entrapment. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1517-1523.

Wu, I.P., Gitlin, H.M., 1983. Drip irrigation application efficiency and schedules. *Trans. ASAE*, 26(1): 92–99.

Xiloyannis C, Angelini P, Galliano A (1990) Drip irrigation of kiwifruit trees. *Acta Hortic* 282: 217±225

Xiloyannis C, Montanaro G, Dichio B (2012). Crop yield response to water. Irrigation and Drainage Paper Nr. 66, FAO, Rome, Italy

Xin, P.; Yu, X.; Lu, C.; Li, L. (2016) Effects of macro-pores on water flow in coastal subsurface drainage systems. *Adv. Water Resour*, 87, 56–67

Xing, M. yun, Wang, W. qiu, Zhang, C., Xi, D. jun, Wang, M. cen, Yin, X. ren, Liu, H., & Liu, X. fen. (2024). Identification and functional analyses of the transcription factors AcWRKY117 and AcWRKY29 involved in waterlogging response in kiwifruit plant. *Scientia Horticulturae*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112568>

Zhou,T.; Xin, P.; Li, L.; Barry, D.A.; Šimunek, J (2020). Effects of large macropores on soil evaporation in salt marshes. *J. Hydrol*, 584, 124754

Capitolo 3 : Microtensiometer-based trunk water potential as a plant water status indicator in kiwifruit under different soil water availability

R. Di Biase, M. Calabritto, Alba N. Mininni*, G. Montanaro, B. Dichio

Department of Agricultural, Forestry, Food and Environmental Sciences,
University of Basilicata, Via dell'Ateneo Lucano, 10 - 85100 Potenza, Italy

Abstract

Recently, water scarcity exacerbated by climate change required the implementation of precision irrigation scheduling to ensure an efficient use of water and optimal conditions for plant physiological activity. In recent decades, plant-based approaches have been increasingly used to monitor plant water status, detecting water stress and improving irrigation scheduling. Among plant-based sensors, microtensiometers (MT), that continuously measure trunk water potential (TWP), have been introduced in research supporting real-time monitoring of TWP and in turn of plant water needs. However, MT response to environmental stimuli as mediated by plants have not yet fully elucidated. An experiment was carried out in a mature yellow-fleshed kiwifruit orchard located in Metaponto (Southern Italy) for two seasons (2021 and 2023) to investigate the responses of microtensiometer-based TWP to changes in soil water content (SWC) and air vapor pressure deficit (VPD), and to examine the relationship with the pressure chamber-based stem water potential (SWP). During 2023, two irrigation treatments were applied to impose different stress levels (Mild, Severe) and compared to well-irrigated vines (CTRL). All the SWC values (FDR type probes) ranged from 18% to 40%. The response of TWP to changing VPD and SWC was analyzed at daily scale and throughout the season. A model accounting for time-lag between TWP and VPD and for the hysteresis of TWP shows that the diurnal TWP is mostly driven by VPD ($R^2 = 0.7$) because SWC is relatively stable. To explain TWP response particularly in Mild and Severe irrigation treatment, the model also included the SWC term. Although the reliability of microtensiometer-based TWP in kiwifruit was confirmed, suggesting the potential to be adopted to guide irrigation management, some limitations to correct and prolonged sensor functioning were highlighted.

Keywords: plant-based sensors, soil water content, vapor pressure deficit, plant water stress, precision irrigation scheduling, trunk water potential

Introduction

Mediterranean regions are expected to experience and cope with significant increases in temperature and evapotranspiration combined with reduced rainfall, exacerbated by climate change, limiting water availability for crop irrigation and leading to more frequent water stress conditions (Moriondo and Bindi 2007; del Pozo et al. 2019). Various water-saving strategies have been developed to improve water use efficiency in agriculture (Naor 2006). In recent years, many approaches to irrigation scheduling have been proposed based on the measurement of variables related to soil and plant water status (Jones 2004; López-Bernal et al. 2024). Soil sensors measuring volumetric soil water content provide real-time feedback on actual soil water status, which is also influenced by irrigation management (Segovia-Cardozo et al. 2022), allow the adjustment of irrigation volumes to real field conditions (Vera et al. 2019; Mininni et al. 2022), and provide information on when to irrigate and how much water to apply (López-Bernal et al. 2024). On the other hand, several methods based on the measurement of plant variables have been considered to identify plant water stress indicators and improve irrigation scheduling (Intrigliolo and Castel 2004; Fernández 2017). However, their practical application is still hindered by the sensitivity of plant water stress indicators to atmospheric demand (López-Bernal et al. 2024) and the limited development of commercially successful systems (Jones 2004). Measuring plant water status and identifying the threshold of water stress at which plant growth and yield are severely affected, and beyond which irrigation is required (i.e. when to irrigate), has been reported to be crucial for implementing accurate irrigation scheduling (Fernandes-Silva et al. 2018; Ahumada-Orellana et al. 2019). Among the measures of plant water status, those measuring plant water potential are more rigorous and generally applied (Jones 2004). In particular, leaf water potential (LWP) has been widely recognized as a plant water status indicator (Hsiao 1990) and values measured before dawn were considered the result of the continuous equilibrium achieved overnight between leaves and the wetter part of the soil (Améglio et al. 1999; Santesteban et al. 2019). However, LWP varies rapidly and is extremely environmentally sensitive, so does not provide an adequate long-term signal of stress (Jones 2007). The potential of leaves pre-equilibrated in the dark (i. e. stem water potential, SWP) is less affected by environmental evaporative demand and is therefore a more useful and robust indicator of plant water status (McCutchan and Shackel 1992). SWP, especially that measured at midday, has been reported to be a practical tool for

determining the level of water stress experienced by the plant (Intrigliolo and Castel 2006; Shackel 2007), understanding the physiological response of the plant to limiting water conditions (Shackel 2007), and guiding irrigation decisions on a site-specific basis (Shackel et al. 1997; De Swaef et al. 2009; Blanco et al. 2018). However, the same SWP can be exhibited by a plant under wet soil conditions at high vapor pressure deficit (VPD) and by a plant under dry soil conditions at low VPD. A baseline SWP has previously been reported to serve as a plant-based reference for non-limiting soil water conditions, where irrigation is not required (McCutchan and Shackel 1992; Shackel et al. 2021). “Target” SWP has been previously established for prune (Lampinen et al. 2001), almond (Stewart et al. 2011) and grapevine (Williams and Baeza 2007) which need to be considered as the normal range of variation in SWP associated with VPD conditions. Although measurements of SWP and LWP have been performed using the Scholander pressure chamber for years, several limitations for modern precision irrigation emerged. These include the inability to continuously monitor plant water status and various technical limitations, such as the leaf selection process and acclimatization to nullify transpiration, as well as the experience of the technician (Noun et al. 2022). Fulton et al. (2001) proposed modified procedures for measuring SWP to make it a more convenient and practical tool for irrigation management (e.g., equilibration period of 10 minutes for routine SWP monitoring and irrigation scheduling, sample size of about 10 leaves, and measurement of SWP under midday conditions). However, the capacity to automate plant measurements is valuable for irrigation scheduling (Jones 2007), and microtensiometer (MT) sensors in particular can overcome the limitations of automating direct measurements of plant water status. MT embedded directly in the stem and in contact with the xylem vessels continuously measure the trunk water potential (TWP), providing information on plant water status during the irrigation season (Pagay et al. 2014). Numerous experimental trials have been conducted in pot and field to continuously monitor TWP and validate this technology in various tree species, such as nectarines (Conesa et al. 2023), grapevines (Pagay 2022), apple trees (Lakso and Intrigliolo 2022; Nieto et al. 2023), pears (Blanco and Kalcsits 2023) and almonds (Lakso et al. 2022a, b).

Several studies provided correlative information linking the TWP measured by MT to midday SWP measured by pressure chamber (Blanco and Kalcsits 2021, 2023) supporting TWP as a reliable sensor for continuous measurement of SWP. Hence, the TWP is expected to be driven by environmental variables such as soil moisture and VPD. In line with this, a series of studies analyzed the response of MT to environmental driver(s) such soil moisture (Blanco and Kalcsits 2023), or soil matric potential (Conesa et al. 2023). The relationship between TWP and VPD has

been focused in well irrigated trees, showing variable results according to species and cultivars studied (Pagay 2021; Blanco and Kalcsits 2023). Moreover, the VPD has been employed as a driver of plant physiological traits (e.g., transpiration, sap flux) inducing, on a diurnal basis, a typical hysteresis pattern (Zeppel et al. 2004; Bai et al. 2017; Wang et al. 2023). That hysteretic pattern is associated with the time lag existing between VPD and the physiological trait (e.g., Wang et al. 2023). Hence, in order to elucidate the response of TWP to VPD that hysteresis should be accounted for by considering separately its ascending and descending harm (e.g., Amato et al. 2021).

Kiwifruit is known to have high water requirements (Chartzoulakis et al. 1993) and susceptibility to decreasing soil water content (Chartzoulakis et al. 1993; Montanaro et al. 2007; Pratima et al. 2016), both of which can be exacerbated in Mediterranean regions, highlighting the importance of irrigation management. In this scenario, MT can help to detect plant water stress, even temporary, which easily occurs during the hottest hours of the day and is responsible for the midday depression of physiological parameters. Given the lack of studies evaluating the reliability and effectiveness of MT in kiwifruit, the present research evaluated both the functionality and limitations of MT in yellow-fleshed kiwifruit grown under Mediterranean conditions. Therefore, the main objectives of this study were: a) to investigate MT responses to SWC and VPD variables; b) to examine the relationship between TWP and SWP.

Materials and methods

Experimental site

The experimental trial was carried out in a commercial and mature kiwifruit orchard located in Metaponto (South Italy, 40°24'N 16°46'E) during two growing seasons (2021 and 2023). The yellow fleshed kiwifruit cultivar (*A. chinensis* var. *chinensis* cv. 'Zesy 002') was grafted onto D1 rootstock (*A. chinensis* var. *deliciosa*) and vines were trained to pergola system at 5 × 2 m planting distance with 1000 vines ha⁻¹. The vines were covered with neutral transpiring polyethylene netting (approximately 8% shade). The soil consisted of a uniform sandy clay loam texture and its hydrological characteristics, determined through the soil-water retention curve, showed field capacity (FC) at 39.48% (v v⁻¹), wilting point (WP) at 18.49% (v v⁻¹) and the resulting fraction of available water (AW) equal to 20.99% (v v⁻¹).

Vines were irrigated by a sprinkler system consisting of a single auto-compensating micro-sprinkler per vine spaced 1 m from the trunk, with a flow rate of 40 L h⁻¹ and a wetting radius of 0.90 m. The experimental plot consisted of 63 plants divided into three irrigation blocks, each

equipped with independent valves (solenoid valves with flow rates from 0.23 to 6.8 m³ h⁻¹ and pressures from 1 to 10 bar). An analog flow meter, a general digital flow meter (10-100 L electric pulse⁻¹) to record the irrigation volumes distributed, and an automatic irrigation controller for remote control of water supply ("Irrifarm" system, Pan. Agri s.r.l., Basilicata, Italy).

Irrigation treatments and management

Irrigation volumes were calculated through a simplified water balance method using the following equation (Mininni et al. 2022):

$$IV = [(ET_c - ER)/ime] \times 10 \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)}$$

where: IV is the irrigation volume (m³ ha⁻¹); ET_c is the crop evapotranspiration (mm); ER is the effective rainfall (mm), ime is the irrigation method efficiency (0.95). The crop coefficient K_c considered specific for kiwifruit, ranging from 0.5 to 1.1 along the season, was reported in FAO Irrigation and Drainage paper Nr. 66 (Xiloyannis et al. 2012). Irrigation volumes were then adjusted weekly considering the fluctuations of soil moisture at different depths (FDR probes, see below) (Mininni et al. 2022). Soil water measurements in the soil volume wetted by irrigation were used to maintain soil water content at values within the readily available water (RAW) defined according to Calabritto et al. 2024.

During the 2021, irrigation was managed as reported above to ensure non-limiting soil water conditions, maintaining the soil moisture close to FC throughout the day. Daily irrigation volumes were equal to full replacement (100%) of ET_c, being approx. 50-60 m³ ha⁻¹. That volume was split into three/four interventions per day throughout the irrigation season from May to October.

During the 2023 irrigation season (June - mid-October), starting from end of July, two irrigation treatments (21 vines each) were imposed to reach different levels of water stress (Mild and Severe), distributing reduced irrigation volumes relative to a well-watered irrigation treatment (CTRL) (21 vines). The CTRL vines received 100% of crop ET_c. Details on timing and fraction of irrigation volumes supplied are reported in Table 1.

Table 1 Timeline of the different irrigation volumes expressed as % ET_c and total irrigation volumes (m³ ha⁻¹) applied in each irrigation treatment (CTRL, Mild and Severe) during the 2023 experimental period (DOY= day of the year)

DOY intervals	214-219	220-226	227-232	233-237	238-243	244-255	256-266	214-266
Treatments	Replacement of ET _c (%)							Irrigation volumes (m ³ ha ⁻¹)
CTRL	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	2,670
Mild	100%	100%	75%	50%	100%	100%	100%	2,455
Severe	100%	0%	25%	25%	100%	0%	100%	1,500

During the 2023 irrigation season, all irrigation treatments were irrigated to replace 100% of ET_c until the beginning of the experimental trial, with daily irrigation volumes split in three/four interventions. The adoption of restricted irrigation covered several days of the experimental trial period, during which the CTRL, Mild and Severe irrigation treatments were irrigated with 100, 75 and 50, 25 and 0% of ET_c, respectively, corresponding to daily irrigation volumes of about 60, 45 and 30, 15 and 0 m³ ha⁻¹ (Table 1). In particular, the CTRL irrigation treatment received irrigation volumes equal to approx. 45-60 m³ ha⁻¹, defined according to the vine's water needs, in three/four daily irrigation events. The irrigation volumes were supplied in only one or two events per day (early in the morning and late in the afternoon) during the experimental period from DOY 220 to DOY 237, in order to reduce the effects of daily irrigation volume splitting on plant water potential measurements. The Mild irrigation treatment also received the corresponding daily irrigation volumes split in three/four interventions, except for the experimental period between DOY 233 and DOY 237, when the irrigation volumes were distributed in only one or a maximum of two events per day. In the Severe irrigation treatment, daily irrigation volumes were distributed in a single intervention from DOY 227 to DOY 237. After the recovery phase (DOY 238-243), during which the severe treatment received irrigation to completely replace ET_c, it underwent an additional water stress phase from DOY 244 to DOY 255, during which irrigation was ceased (0%). An additional recovery phase was then monitored from DOY 256 to DOY 266.

Weather variables and soil moisture monitoring

Environmental parameters, such as rainfall, air temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed were recorded daily and/or hourly by a meteorological station (SKU-6253, Davis Instruments, USA) connected to a wireless data-logger system (Winet S.r.l. Cesena, Italy). These sensors were installed near the experimental orchard block and mounted above the kiwifruit canopy, outside the hail net protection, at about 5 m from the ground. The FAO Penman-Monteith equation and the available climatic data were used to quantify reference evapotranspiration (ET_0). Hourly air vapor pressure deficit (VPD) was computed using air temperature and relative humidity (Goudriaan and van Laar 1994). Environmental water deficit values were calculated by considering the differences between the cumulative monthly values of ET_0 and rainfall during both 2021 and 2023 seasons.

Frequency Domain Reflectometry (FDR) 90 cm multi-profile soil moisture probes with sensors every 10 cm (SENS-STk90 Drill & Drop, Sentek Sensor Technologies Stepney, Australia) were used to continuously monitor the volumetric soil water content (SWC) throughout the soil vertical profile, detecting instantaneous oscillations in each soil layer every 30 min. The probes were installed on the row at a distance of 0.50 m from the vine stem and approximately in the center of the volume of wet soil. One multi-profile probe per treatment was installed to monitor soil moisture. A soil layer of 0-60 cm was considered in the present study according to Xiloyannis et al. (2023). SWC values were averaged according to the soil layer considered (sensors at 5, 15 and 25 cm for the 0-30 cm layer; sensors at 35, 45 and 55 cm for the 0-60 cm layer).

Trunk and stem water potential

The TWP of kiwifruit vines was continuously monitored using MT (FloraPulse, Davis, CA, USA) embedded directly in the trunk of kiwifruit vines at 140 cm from ground and inserted at 2 cm depth, ensuring the direct contact with the xylem (Lakso et al. 2022b). The sensors were installed at predawn, when transpiration, xylem flux and VPD are minimal (Améglio et al. 1999; Phillips et al. 1999) ensuring trunk tissues not drying during installation procedure. Sensors were then allowed to equilibrate with the vine xylem within a few days from installation (Pagay

2022). Values of TWP were recorded at 20 min intervals. The sensor unit is connected to a dedicated solar powered wireless data logger. The data are stored on a memory card inserted into the logger and cellularly transmitted to the cloud, which can be accessed through a user interface on the Flora Pulse website (FloraPulse Davis, CA, USA). In the 2021 irrigation season, a total of two MT were installed in the field on two vines to monitor TWP when irrigation scheduling was managed to maintain soil moisture close to FC and to preliminarily evaluate MT installation and response in kiwifruit.

In the 2023 irrigation season, six MT were installed in the field on six vines (one sensor per vine), allowing the monitoring of two vines per irrigation treatment (CTRL, Mild and Severe). The TWP values were averaged and referred to the pertaining treatment. The daily maximum oscillation of TWP (Δ TWP) was determined as the difference between the minimum value reached during the day and that recorded at pre-dawn, (around 3:00 h, solar time) when the plant water potential was in equilibrium.

Simultaneously, plant water status was also monitored through the stem water potential (SWP) measured on the same vines equipped with MT. The SWP was measured on five fully developed, expanded and not-exposed leaves per treatment chosen from the middle part of the canopy layer. The selected leaves were wrapped in a thin aluminum foil for about half an hour prior of the measurement, and then excised for immediate SWP measurement with a Scholander pressure chamber (Model 1000, PMS Instrument Company, Corvallis, OR, USA) pressurized with nitrogen according to the procedure recommended by McCutchan and Shackel (1992). The acclimatization time of the leaf was previously defined by evaluating SWP values of various leaves ($n = 8$) acclimated for different times, defining 30 min as the time needed for stabilizing the stem water potential value (Table S1). Diurnal SWP was measured for 13 days during the experiment at approx. three-hour interval (7:00, 10:00, 13:00, 15:00 and 17:00 h, solar time).

Leaf gas exchange parameters

Photosynthetic (A), stomatal conductance (gsw) and transpiration (E) rates were measured at approx. three-hour interval (7:00, 10:00, 13:00, 15:00 and 17:00 h solar time) at DOY 237 using a portable photosynthesis system Li-Cor 6400 (Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA). During leaf gas exchange measurements air temperature, reference CO₂ concentration and radiation (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD) were maintained at the prevailing external

environmental conditions. Four vines per treatment were chosen for gas exchange measurements by selecting one mature leaf per vine next to those used for SWP measurement.

Modeling trunk water potential and statistical analysis

All paired soil moisture, air VPD and TWP data from CTRL, Mild and Severe vines were pooled in a single dataset. In order to account for the diurnal hysteresis response of TWP to VPD (Fig. S1, Wan et al. 2023), the dataset was filtered by extracting the raw data occurring within 03:00 h and the time corresponding to the lowest TWP in each day. The present modeling analysis also considered the time lag between TWP and VPD (Fig. S2) (Pagay 2022). Hence, the TWP series was shifted backward by 4 hours according to the correlation method reported in Wan et al. (2023). Following this, the dataset ($n = 1282$) was randomly split into validation (20%) and training (80%) fractions. The signal of the microtensiometer (TWP, MPa) was modeled as a response variable of a linear model using soil moisture and air VPD as unique driving factors (i.e., $Y \sim \text{VPD}$, $Y \sim \text{SWC}$). The additive ($Y \sim \text{VPD} + \text{SWC}$) and interaction ($Y \sim \text{VPD} + \text{SWC} + \text{VPD} * \text{SWC}$) linear models were also examined as nested models of the $Y \sim \text{VPD}$ one. Note that the interaction model labeling was simplified as $Y \sim \text{VPD} * \text{SWC}$.

The accuracy of each model was assessed through the coefficient of determination (R^2), the root mean squared error (RMSE), and the mean absolute error (MAE). The models were then compared through AIC (Sakamoto et al. 1986). Residuals of each single model were calculated as the difference between observed and fitted values; thereafter their randomness and constancy of variance were evaluated and the analysis of variance (ANOVA) was employed for further model comparison. The models employing only VPD or SWC as predictors were also fitted to data only referring to well irrigated vines.

All data analysis, modelling and plotting were conducted in R (R Core Team, 2021).

Results

Environmental conditions

The annual ET_0 and rainfall data were approx. 1180 mm and 352 mm for the 2021 season and 1199 mm and 500 mm for the 2023 season, respectively (Fig. 1). Hence, the resulting annual environmental water deficit was about 828 and 700 mm in 2021 and 2023, respectively. High evapotranspiration and low rainfall generally occurred during the summer months,

contributing to a high environmental water deficit during the irrigation season reaching approx. 707 and 634 mm for the 2021 and 2023, respectively (Fig. 1).

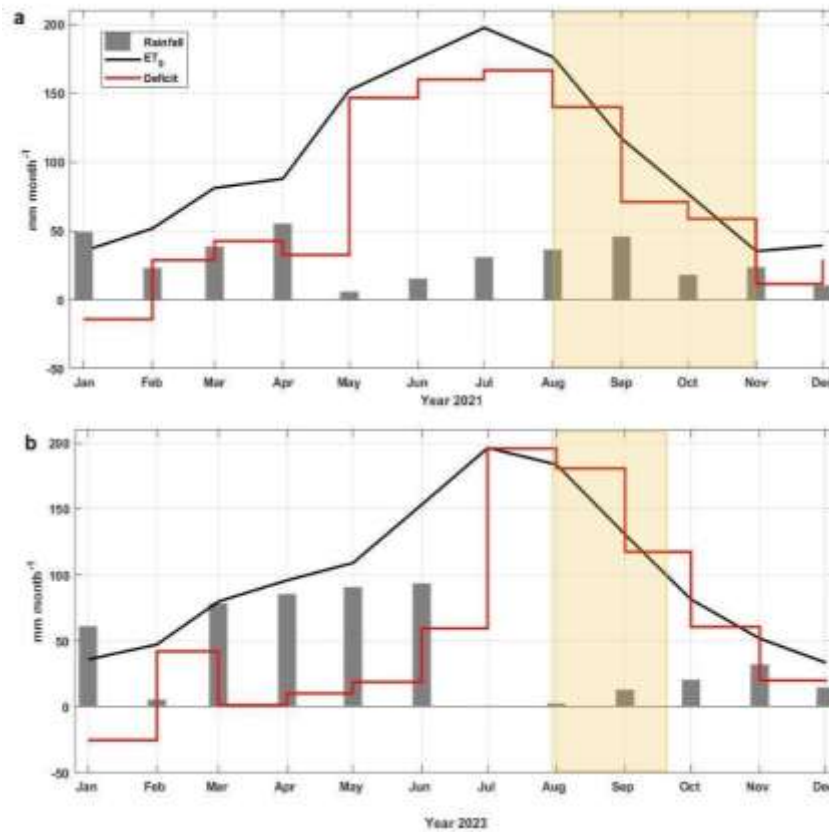


Fig. 1 Values of reference evapotranspiration (ET_0 , mm month⁻¹), rainfall (mm month⁻¹) and environmental water deficit (mm month⁻¹) during (a) 2021 and (b) 2023 seasons. The yellow-shaded areas indicate the period of the experiments.

Daily crop reference evapotranspiration (ET_0), average air vapor pressure deficit (VPD) and maximum air temperature values (T_{max}) during the 2021 and 2023 experimental periods are shown in Fig. 2. Daily maximum air temperatures were quite variable throughout the experimental trial, reaching maximum values of 39.4 °C (DOY 223) and 38.5 °C (DOY 236) in the 2021 and 2023 seasons, respectively. Air temperature exceeding 30 °C lasted for 25 (2021) and 57 days (2023). Noticeably, air temperature was above 35 °C during 9 and 12 days in the 2021 and 2023 seasons, respectively. Daily maximum VPD values, equal to 5.11 and 5.05 kPa, were achieved on DOY 225 and 236 in the 2021 and 2023, respectively.

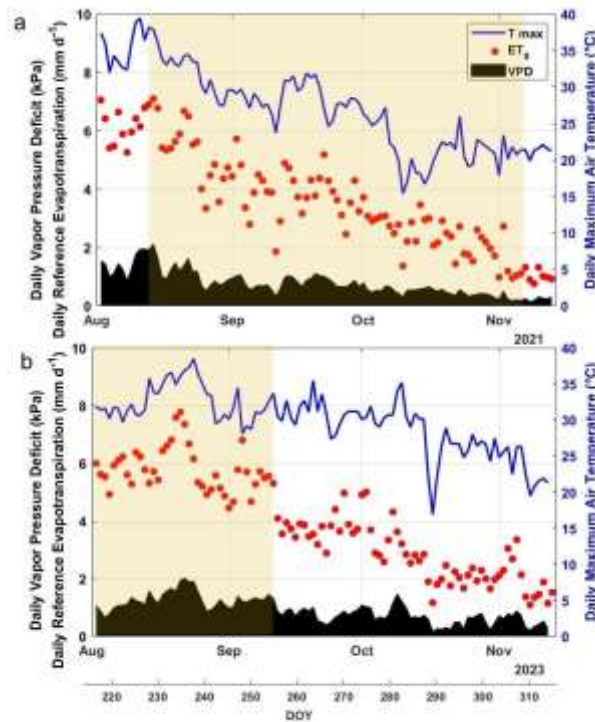


Fig. 2 Daily reference evapotranspiration (ET_0), average vapor pressure deficit (VPD) and maximum air temperatures (T_{max}) during the experimental days in (a) 2021 and (b) 2023 seasons. The yellow-shaded areas indicate the period of the measurements. DOY= day of the year

Diurnal and seasonal trunk water potential patterns

The diurnal trend of TWP, together with variations in SWC in the 0-30 cm soil layer over a period of three months during the 2021 is shown in Fig. 3 providing a preliminary assessment of the functionality and operability of the MT installed on kiwifruit vines.

The daily values of TWP during the irrigation season ranged from about -0.07 MPa to about -0.29 MPa (Fig. 3a), which were relatively high and indicative of optimal plant water status. A minimum value of about -0.45 MPa was reached only after irrigation was suspended. That is, after the end of the irrigation season, the TWP gradually decreased from DOY 281 to DOY 308, suggesting that the low rainfall in October was not sufficient to satisfy the water needs of the vines. From DOY 308, TWP values increased due to the beginning of the senescence phase (complete leaf fall) and the reduction in physiological activity of the vine (Fig. 3a).

The SWC in the 0-30 cm soil layer remained close to FC, also by daily splitting of the irrigation volume (DOY 225-DOY 250), ensuring the right amount of available water needed for plant uptake. As the daily irrigation volumes were distributed in a single intervention (from DOY

250), SWC decreased below 31%vol, reaching a minimum value of about 28%vol (DOY 303) after irrigation was suspended (Fig. 3b).

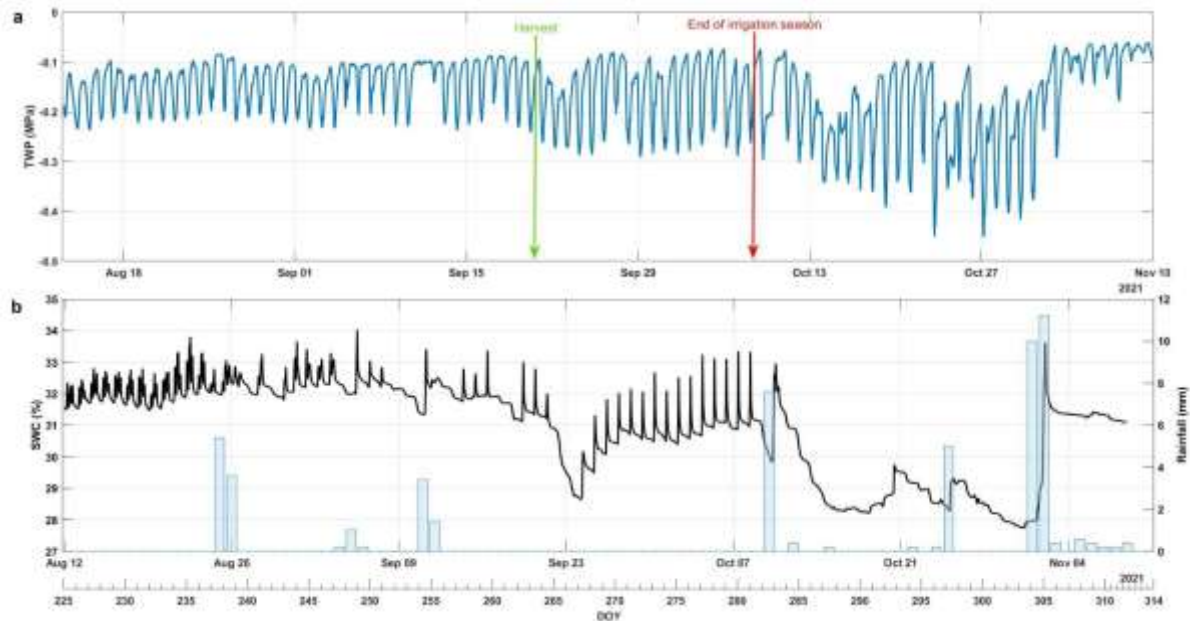


Fig. 3 Seasonal trend of (a) trunk water potential (TWP) measured every 20 minutes by MT and (b) soil water content (SWC) (averaged in the 0-30 cm soil layer) and daily rainfall (histograms) during 2021. The SWC data measured for individual depth are shown in Fig. S3

Seasonal TWP trends for the different irrigation treatments applied in 2023 along with the corresponding SWC considered in the 0-30 and 30-60 cm soil layers are shown in Fig. 4.

The TWP in the CTRL vines ranged from -0.007 MPa to -0.59 MPa throughout the experimental period (Fig. 4a). Minimum values were more negative than those reported in 2021 (-0.29 MPa) and were reached early in the afternoon (14:00 - 15:00 h). In the CTRL treatment, the SWC remained stably above 37.36% in both 0-30 and 30-60 cm soil layers, with decreases associated with variations in irrigation volume and scheduling (Fig. 4d). Low pre-dawn TWP values close to -0.2 MPa (Fig. 4a) were observed between DOY 247 and DOY 253, when irrigation volumes were reduced from 60 to 45 m³ ha⁻¹ per day. The TWP increased again when daily irrigation volumes were restored to 60 m³ ha⁻¹ at DOY 254 (Fig. 4a).

SWC decreased from 35.28% to 26.48% in the 0-30 cm soil layer in the Mild irrigation treatment between DOY 227 and DOY 237 (Fig. 4e). During these days, the TWP reached pre-dawn values close to -0.2 MPa and minimum values close to -0.8 MPa (Fig. 4b). TWP returned to control values when irrigation was increased on DOY 254 (Fig. 4b).

From DOY 220 to DOY 230, irrigation was suspended and reduced in the Severe irrigation treatment, where TWP reached pre-dawn and midday values of approx. -0.6 MPa and -1 MPa

(Fig. 4c). Irrigation was restored on DOY 237, allowing the severely stressed vines to enter the recovery phase, which took about three days to increase TWP (Fig. 4c), suggesting a relatively rapid recovery of plant water status. Irrigation was stopped again, SWC was reduced to 18.49% (Fig. 4f) and a more immediate decrease in TWP was observed, reaching pre-dawn and midday values of approx. -0.75 MPa and -1.04 MPa, respectively (Fig. 4c). Irrigation was restored at DOY 256 and TWP returned to control levels within three days (Fig. 4c).

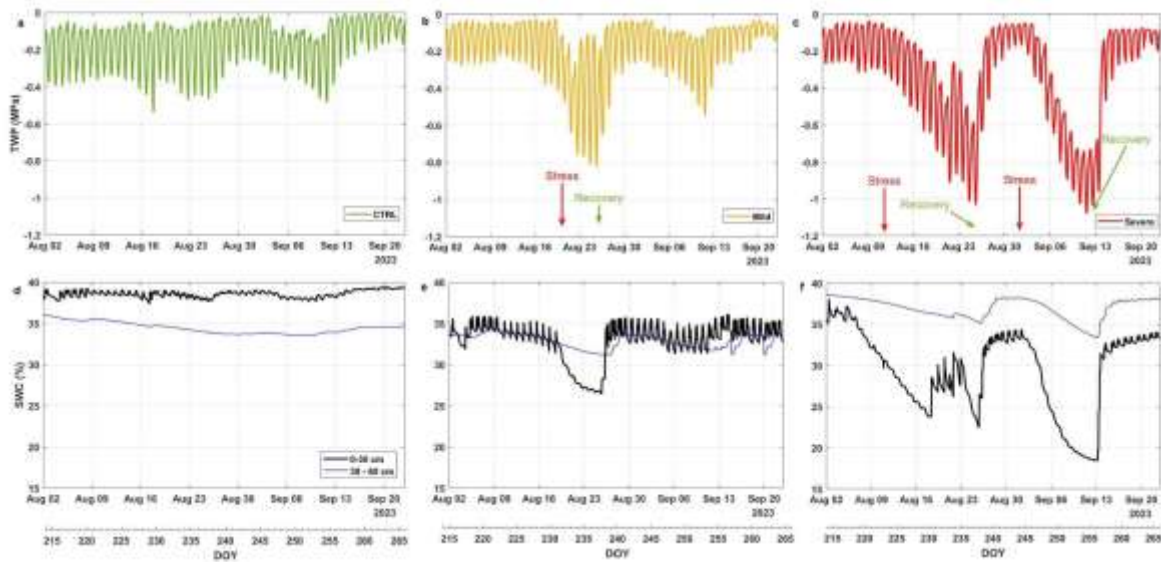


Fig. 4 Seasonal trends of mean trunk water potential (TWP, $n=2$) in (a) CTRL, (b) Mild and (c) Severe irrigation treatments and soil water content (SWC) averaged in the 0-30 and 0-60 cm soil layers in (d) CTRL, (e) Mild and (f) Severe irrigation treatments during 2023. TWP for individual sensors are shown in Fig. S4 and SWC data for individual sensors of single probes are shown in Fig. S5

Diurnal (DOY 237) trends of plant water status, indicated by both SWP and TWP, and physiological parameters such as A , g_{sw} and E rates in vines under CTRL, Mild and Severe irrigation treatments are shown in Fig. 5.

The lowest values for both SWP and TWP were reached in the early afternoon, slightly shifted from the maximum VPD peak (Fig. 5a). The A was higher in the early morning, remained quite constant throughout the day and decreased sharply in the late afternoon in the CTRL vines. The same trends were observed in Mild and Severe vines, whose photosynthetic activity was reduced by 47% and 64% respectively (Fig. 5b). The E was lower in the early morning and increased as the environment became more demanding in the middle hours of the day for all irrigation treatments. Reductions of approx. 28% and 41% were achieved in the Mild and Severe treatments, respectively, compared to CTRL (Fig. 5c). The g_{sw} increased with increasing

environmental evaporative demand in CTRL vines, while it remained stable and low throughout the day in both water-stressed vines, being reduced by 48% and 56% in the Mild and Severe treatments, respectively (Fig. 5d).

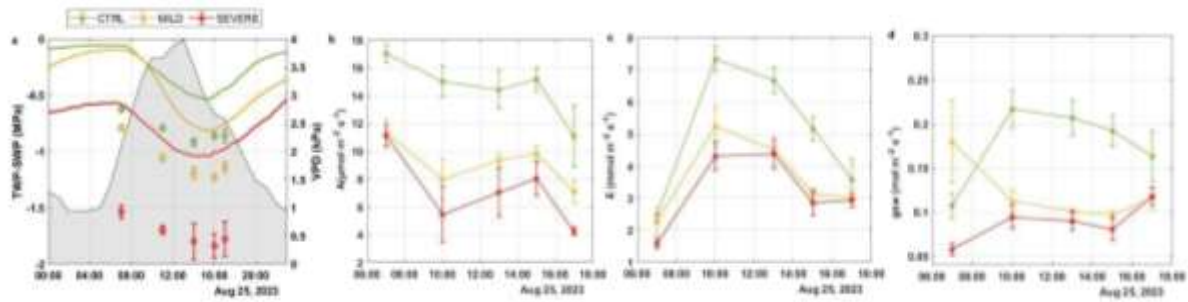


Fig. 5 Diurnal pattern of (a) hourly air vapor pressure deficit (VPD) (grey filled area), stem water potential (SWP) measured with the pressure chamber (points), and trunk water potential (TWP) monitored by MT (lines), (b) photosynthesis (A), (c) transpiration (E), and (d) stomatal conductance (gs) rates in CTRL, Mild and Severe irrigation treatments. Data are mean value $\pm$ standard errors (when applicable) (TWP, $n=2$; SWP, $n=5$; A, E, gs, $n=4$). Data were measured at 10:00 h on DOY 237 during the 2023.

Soil-plant-environment interactions

Δ TWP was significantly negatively correlated (Pearson's $r = -0.81$, $p < 0.001$) with VPD under non-limiting soil water conditions (Fig. 6a). Values of TWP shifted backward 4 hours were linearly correlated with the VPD in all the irrigation treatments, even the irrigation treatment influenced the slope of the scatter (Fig. 6b).

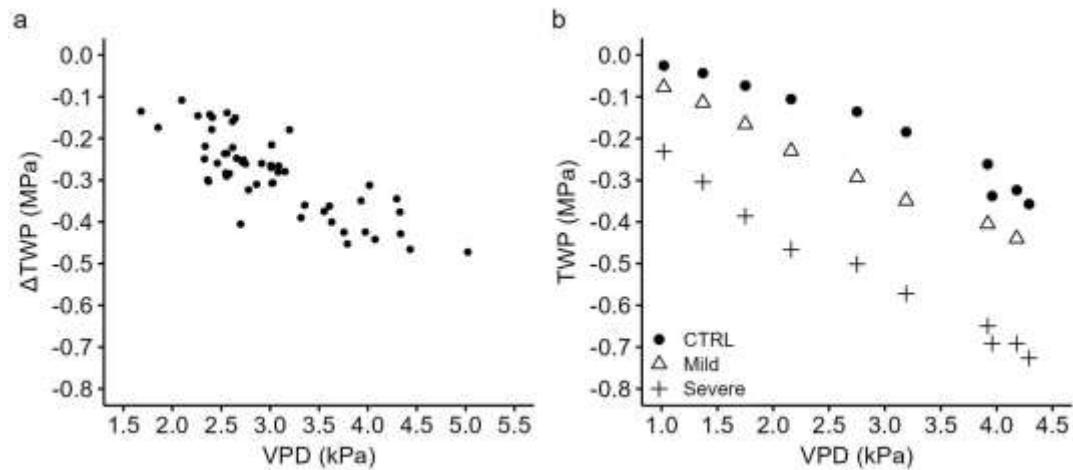


Fig. 6 Relationship between (a) daily maximum oscillation of trunk water potential (values from 3:00 h to minimum, Δ TWP) and air vapor pressure deficit (VPD) in well irrigated (CTRL) vines, (b) daily values of trunk water potential (TWP) and maximum VPD in all irrigation treatments (CTRL, Mild and Severe). TWP values were shifted backward four hours to account for the time lag between TWP and VPD

Values of TWP differentially responded to SWC as reported in Fig. 7. Particularly, the TWP remained at about -0.2 MPa when SWC decline approached 30%vol. At SWC values below about 30%, the TWP promptly declined and reached the lowest value of about -0.8 MPa corresponding to about 20% SWC (Fig. 7).

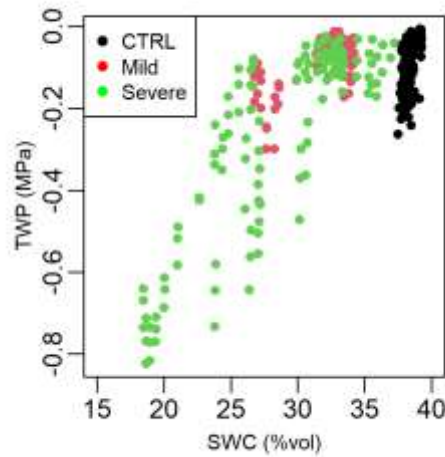


Fig. 7 Correlation between trunk water potential (TWP) and soil water content (SWC) recorded in well irrigated (CTRL) vines and in vines progressively exposed to Severe and Mild water stress

The modelling of TWP shows that in well irrigated vines the TWP measured through MT linearly responded to VPD (Adjusted R^2 : 0.77) to the extent that the $Y \sim \text{VPD}$ model was able to explain 70% of the variance of measured data (Fig. 8, see Table S2 for details on model parameters). In contrast with this, SWC was a weak predictor of TWP (Adjusted R^2 : 0.05) and the resulting model was able to explain 8% of the measured data variance (Fig. 8).

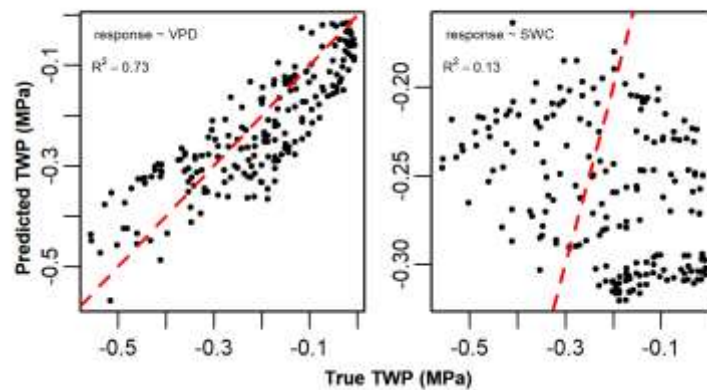


Fig. 8 Correlation between the measured (test dataset) and predicted TWP employing (left) VPD and (right) SWC as independent variables in well irrigated (CTRL) vines. In each panel the dashed line represents the 1:1 straight line

The Fig. 9 reports the correlation between the predicted and measured TWP covering the whole TWP range recorded across CTRL, Mild, and Severe treatments. The models employing VPD or

SWC as predictor had similar R^2 of 0.35. In contrast with this, the additive and interaction models increased the goodness of fitting between measured and estimated values (R^2 up to 0.66). Model parameters are reported in Table S2. Model accuracy was also appraised using RMSE and MAE to overcome the sensitivity of R^2 to outliers. These additional metrics were in the same magnitude across the various models (Table 2), however the $Y \sim \text{VPD} + \text{SWC}$ model showed the lowest AIC anticipating it was the most accurate.

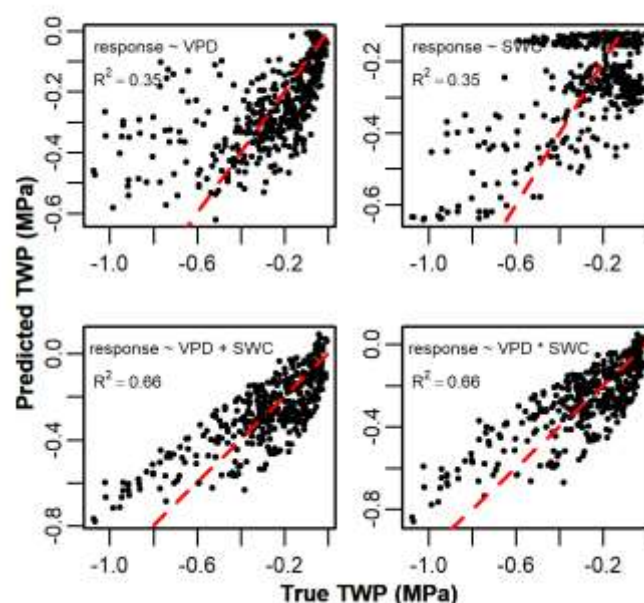


Fig. 9 Correlation between the measured (test dataset) TWP and predicted by the various models. Data from all irrigation treatments were pooled before fitting. In each panel the dashed line represents the 1:1 straight line

Table 2 Values of root mean squared error (RMSE), mean absolute error (MAE) and AIC for the various linear models employed to predict the trunk water potential over the test fraction of the dataset pooling the data recorded in CTRL, Mild and Severe irrigation treatments

	RMSE (MPa)	MAE (MPa)	AIC
$Y \sim \text{SWC}$	1.117547	1.100254	-518.56
$Y \sim \text{VPD}$	1.123479	1.106274	-589.97
$Y \sim \text{VPD} + \text{SWC}$	1.114469	1.105097	-1035.31
$Y \sim \text{VPD} * \text{SWC}$	1.115518	1.106150	-1050.90

The constancy of variance of the residuals across the models is reported in Fig. S6 showing that the linearity of variance degrades for the most negative TWP values and particularly for the $Y \sim \text{SWC}$ model. In most scenarios, residuals distribution was homogeneously distributed across the range of fitted measurements except for those values at about -0.1 MPa. The kernel distribution of the models $Y \sim \text{VPD} + \text{SWC}$ and $Y \sim \text{VPD} * \text{SWC}$ had a roughly normal distribution, while the remaining models showed a bimodal ($Y \sim \text{VPD}$) or skewed ($Y \sim \text{SWC}$) shape (Fig. S7).

The ANOVA conducted over the data recorded in well irrigated vines (CTRL) and pooling the whole data from CTRL, Mild and Severe irrigation treatments is reported in Table 3. The ANOVA table shows that the additive model fits significantly better than the simple $Y \sim \text{VPD}$ one. The ANOVA also shows that the interaction term further significantly improved the model (Table 3).

Table 3 Analysis of variance of trunk water potential (TWP) determined through nested linear models explaining the TWP as response of air vapor pressure deficit (VPD) in combination with soil water content (SWC). The analysis has been conducted over the whole dataset pooling the CTRL, Mild and Severe irrigation treatments

	Res. DF	RSS	DF	F	Pr(>F)
$Y \sim \text{VPD}$	887	26.625			
$Y \sim \text{VPD} + \text{SWC}$	886	16.097	1	590.35	< 2.2e-16 ***
$Y \sim \text{VPD} * \text{SWC}$	885	15.782	1	17.691	2.863e-05 ***

Significance codes: ***, $\alpha = 0.001$; **, $\alpha = 0.01$; *, $\alpha = 0.05$

Relationship between trunk and stem water potential

Midday SWP and TWP trends in vines under CTRL, Mild and Severe irrigation treatments are shown in Fig. 10. Results indicated that the SWP values were consistent with those of TWP. The lowest values of SWP and TWP were -1.39 MPa (DOY 234) and -0.73 MPa (DOY 237) for mildly stressed kiwifruit vines, and -2.3 MPa (DOY 254) and -1.05 MPa (DOY 254) for severely stressed kiwifruit vines.

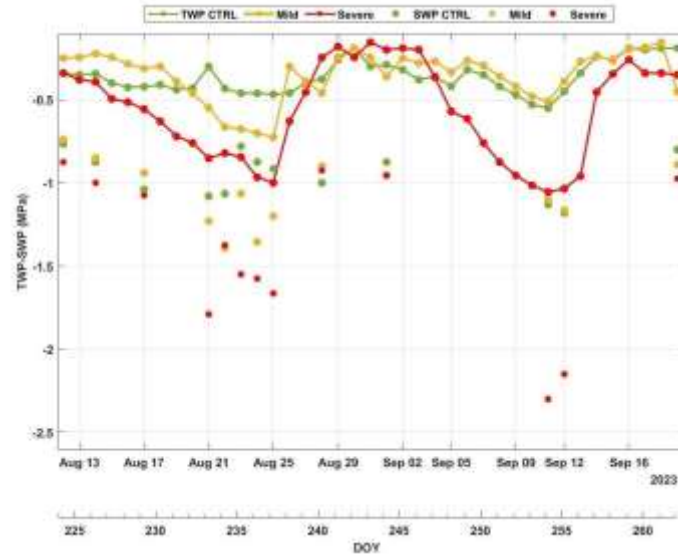


Fig. 10 Daily midday stem water potential (SWP, $n=5$) measured with the pressure chamber and trunk water potential (TWP, $n=2$) monitored by MT in CTRL, Mild and Severe irrigation treatments during 2023

The relationship between TWP and SWP was examined through a piecewise linear model over the pooled values of the irrigation treatments (Fig. 11). That model showed a breakpoint at about -1.6 MPa, an adjusted R^2 and AIC equal to 0.78 and -251.21, respectively (Fig. 11). The TWP and SWP pairwise were also fitted with a linear model (not shown) whose R^2 and AIC were 0.76 and -235.2, respectively.

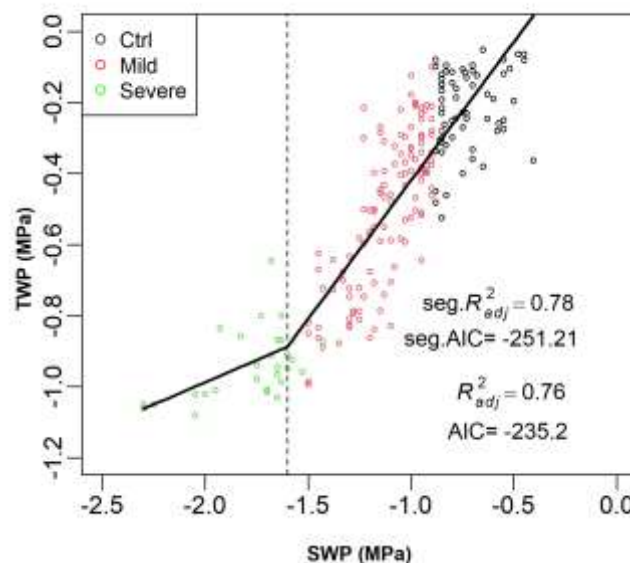


Fig. 11 Correlation between microtensiometer-based trunk water potential (TWP) and pressure chamber-based stem water potential (SWP, $n=5$) recorded in well irrigated (CTRL) vines or

subjected to mild, or severe drought. Data were pooled before fitting using a segmented linear model. The vertical dashed line indicates the breakpoint at -1.6 MPa. Details on segmented linear model is reported in Table S3

Discussion

Coupling trunk water potential, VPD and soil water content

The *VPD* is an environmental variable regulating plant water relations and in turn leaf and trunk water potential by affecting leaf transpiration and water transport (Mayr 2021). The present study analyzed the environmental drivers of the microtensiometer-based TWP through models employing *VPD* and *SWC*. For that purpose, the dataset was filtered accounting for the hysteresis and for the time-lag response of TWP to *VPD* (see M&M section). Both hysteresis and time-lag are recognized phenomena characterizing the response of plants to environmental stimuli including *VPD* (e.g., Amato et al. 2021; Wan et al. 2023). However, while the time-lag was accounted for in existing studies dealing with microtensiometer (e.g., Pagay 2022; Blanco and Kalcsits 2023), the hysteresis did not yet enter the discussion. Hence, this study would also contribute to expanding current knowledge on this specific topic.

According to the idea that *VPD* dominates plant water relations, results show that *VPD* satisfactorily drives the TWP ranging from about -0.007 MPa to -0.59 MPa measured in plants under well water conditions (model $R^2 = 0.7$). This result aligns with those in well-watered pear trees (Blanco and Kalcsits 2023), grapevine (Pagay 2022), and apple trees (Nieto et al. 2023). The *SWC* in well-irrigated conditions fails to drive TWP because soil moisture is stable along the day whilst TWP has a diurnal cycle (Fig. 4, 7 and 8).

The models employed in the presented study were also parametrized and fitted over a relatively large range of TWP (from about -0.01 MPa down to about -1.1 MPa) achieved after the imposition of the Mild and Severe treatments. Under these variable *SWC* conditions (from about 40% vol to about 18% vol) the vine water potential changed as it would be expected (Mills et al. 2009; Silva and Ferreira 2014; Calabritto et al. 2024). Hence, it could be anticipated that entering the *SWC* term in the model would be essential to improve the predicting capability of the model based on *VPD*. In line with this, results document that the additive and interaction models significantly improved model prediction (see ANOVA in Table 3) and that the interaction would definitely provide the best fit. However, considering the relatively small reduction in RSS

comparing interaction and additive models, and that the model $Y \sim VPD+SWC$ had the lowest AIC, it could be concluded that the additive model offers the best fit. Hence, the present paper returns the information that within a diurnal time-scale when the soil moisture is non limiting, the *VPD* would act as the main driver of TWP (Fig. 8) and that SWC down-regulates the effect of *VPD* when SWC becomes limiting. The effect of SWC on TWP resembles the correlation between soil moisture and some plant physiological traits (e.g., leaf relative water content, stomatal conductance) showing that SWC is influential on these traits once it decline below a threshold (e.g., Abrisqueta et al. 2012; Du et al. 2012). Results on the nested models are difficult to compare because most research considered only the *VPD* as an explanatory variable of MT under stable and non-limiting soil moisture. For example, in Blanco and Kalcsits (2023) a linear correlation is reported between TWP measured through MT and *VPD* in well irrigated pear trees.

In the present study, the correlation between SWC and TWP (Fig. 9) suggests a variable role of SWC on TWP depending on the SWC level. That is, at soil moisture close to FC the SWC term would not influence the diurnal TWP which would be almost entirely driven by *VPD*. In contrast with this, at $SWC < 30\%$ the TWP responded also to SWC. Hence, the SWC should enter the model as a non-linear term to putatively further improve the explanation of MT dependencies. Incidentally, this might improve the homogeneity of variance of residuals at shallow MPa values (Fig. S6). But this remains to be specifically examined.

TWP vs SWP relationship

Nowadays there is an increasing demand for easily accessible and real time proxy of plant traits monitoring the plant response to changing environment (e.g., soil salinity, drought, heat waves) (Briglia et al. 2020; Montanaro et al. 2024, Velazquez-Chavez et al. 2024). In this context, the use of MT to retrieve plant water status is being compared with SWP, which is believed to provide the actual water potential (Naor 2000; Shackel 2007, 2011). For example, previous studies investigating the relationship between TWP and SWP found comparable values between the two methods (Lakso et al. 2022a; Blanco and Kalcsits 2023; Conesa et al. 2023). However, discrepancies between TWP and SWP were reported by Pagay (2022) in grapevines with TWP values generally higher than SWP. Similarly, a mean difference of 0.3 MPa was found between SWP and TWP in nectarine trees (Conesa et al. 2023). The TWP has also been compared against leaf water potential (LWP), showing that TWP is about 1.8 (peach) and 1 MPa (grapevine) higher than LWP (Pagay 2022, Conesa et al. 2023).

The present paper reports the TWP linearly correlated with the SWP but with a differing slope in severely drought stressed vines. The segmented linear regression (Fig. 11) shows the TWP decreases slowly at SWP values below -1.6 MPa suggesting trunk and leaf differ in water economy particularly under limited water. In addition to the improvements of AIC and R^2 suggesting the segmented linear model would be the best (see Fig. 11), there are others (physiological) arguments supporting a piecewise model. For example, plant tissues might release water to transpiration flow according to their capacitance (specific volumetric water content released per unit of declining water potential) (Scholz et al. 2007). Leaf and trunk would considerably differ in their capacitance because (i) the trunk has a large water storage compartment, and (ii) because of the water potential gradient existing between canopy and trunk. Transpiration-induced xylem pressure drops are reduced by the release of tissue stored water into the transpiration stream (Meinzer et al. 2009; Sholz et al. 2011), resulting in a less pronounced drop in water potential (i.e., TWP). Based on the location of the MT measuring point (between roots and canopy) and on the level of buffering of water potential in the trunk, the TWP has been previously reported as the most stable indicator of plant water status (Lakso et al. 2022a; Pagay 2022). In the present study, TWP showed higher values than SWP (Fig. 11) consistently with the establishment of a water potential gradient within the plant (Begg and Turner 1970; Hellkvist et al. 1974; Sharwies and Dinneny 2019; Pagay 2022). Lakso et al. (2022b) observed a faster response from the outside of the canopy than from the trunk, suggesting the involvement of trunk capacitance and the speed of water potential gradient propagation within the plant. The tissue capacitance might help also to explain different behavior of MT across various species (Scholz et al. 2011) whose wood might have different capacitance-related traits (e.g., density, parenchima/sapwood ratio) (Carrasco et al. 2015).

The change in slope between TWP and SWP might also be related to a differential stomatal regulation of water loss occurring under well irrigation and drought. Under non-limiting water conditions, kiwifruit sustains high rates of gsw, E (Fig. 5b, c, d), lowering the hydrostatic pressure gradient (ΔP) which propagates down to the trunk. In contrast with this, under reduced soil water availability gas exchanges are reduced by more than 50% during the central part of the day (Fig. 5b, c, d) (Montanaro et al. 2009), and likely slowing the ΔP propagation and in turn the TWP reduction.

This result might apparently contrast with existing correlation between SWP and TWP in grapevine (Pagay 2022) and pear (Blanco and Kalcsits 2023). However, the range of SWP reached in the present study was likely larger than that in the above mentioned ones unmasking the segmented correlation.

The water potential drop in the plant (i.e., that reached at midday) depends on transpiration rate and hydraulic transport capacity, which are determined by stomatal and hydraulic conductance (Martínez-Vilalta and Garcia-Forner 2017), and then vary according to the plant ability to uptake and transport upward to the canopy the water needed by the transpiration flow. Kiwifruit is recognized to have a high hydraulic conductivity of the stem and efficiency in water transport, associated with anatomical features of xylem vessels, which allow it to sustain high transpiration rate despite the high leaf/stem biomass ratio (Gucci et al. 1997). Dichio et al. (2013) confirmed a relatively high leaf-specific whole-plant conductance in kiwifruit.

Limitations

Instead, the position and installation of the MT in the trunk, which should ensure the correct contact between the sensor and the xylem, can influence the sensitivity and accuracy of the measurements.

The results obtained during two years of experimentation confirm MT as a promising tool in kiwifruit and recognise some limitations for the correct and prolonged functioning of the sensor in this crop. Throughout the two seasons, sensors showed limited durability, ranging from a few weeks to a maximum of five months. For all non-functioning sensors, the first indication of sensor failure and malfunction was evident from the daily TWP trends, which showed the same values for several consecutive readings (Fig. 12a).

The peculiar morphology of the kiwifruit epidermal tissues may contribute to the short life of the sensor, in particular the low bark hardness and tissue elasticity led to the formation of a crack after sensor installation (Fig. 12b), aided by an unequal growth rate of the tissues. The cracks gradually extended along the trunk surface and penetrated the vascular tissue, both phloem and xylem. The phloem, which is quite thick (5 - 6 mm) (Fig. 12c), once damaged, allowed air to enter the xylem, resulting in the loss of the tension gradient and equilibrium achieved, which was responsible for the reduced sensor functionality.



Fig. 12 Limitations of MT in kiwifruit. (a) Trunk water potential trend displayed on the dashboard showing sensor malfunctioning; (b) parenchymal and vascular tissue splits after sensor installation; (c) phloem thickness in kiwifruit

To date, the installation of MT sensors remains highly invasive and their proper functioning is likely to be affected by the peculiar woody morphological characteristics of kiwifruit. Sensor installation can lead to mechanical damage to the plant, which may persist even after removing the sensor. This can represent a threat to all trees with slender trunks, such as kiwifruit.

Conclusions and potential use of TWP for irrigation management

In conclusion, modelling the TWP and the explanatory environmental drivers show the TWP differentially responding to *VPD* and *SWC* depending on the time scale considered. Within a diurnal scale it is mainly driven by *VPD*, while under a progressive depletion of soil moisture TWP aligns also to *SWC*, even though further improvements of modelling should consider the *SWC* as a second order term.

Irrigation scheduling (i.e., frequency of irrigation interventions) is a pivotal component of irrigation management. This study presented data on MT from two irrigation seasons in well irrigated vines, differing in the frequency of interventions. Indeed, in 2021 irrigation volume was split and supplied at three/four interventions per day, while in 2023 it was supplied once a day. In both years, irrigation was managed to maintain the soil water content close to FC and timely satisfy vine water needs. Although this paper was not designed to quantitatively compare the effect of irrigation frequency on plant water status, the MT revealed the daily min:max oscillation of TWP was less pronounced in high frequency irrigation. Particularly, this range was -0.084:-0.236 and -0.051:-0.586 in split and single intervention, respectively (Fig. 3, 4).

Considering also the correlation between TWP and SWP and its prompt response to declining SWC, it appears that MT is sensitive enough to plant and environmental factors supporting its potential employment in irrigation management in kiwifruit.

Funding

This study has been partially supported by the Italian Ministry of University and Research (MUR) in the frame of the PON "RICERCA E INNOVAZIONE" 2014-2020 Project RESO "Sistemi di coltivazione resilienti, valutazione di impatto delle produzioni frutticole", AGRIFOOD CUP B34I200000320005 and in the frame of the Ecosistema TECH4YOU – Technologies for climate change adaptation and quality of life improvement - Missione 4 Componente 2 Investimento 1.5 NextGenerationEU ECS000000009 CUPC43C22000400006 - PP 3.3.1 SMART WATER.

Acknowledgements We are grateful to Dr. A. C. Tuzio for support in the water budget calculation and in irrigation management, to Dr. D. Laterza for technical and logistic support in the experimental trial and to the field owner Giacomo Xiloyannis for hosting the trial.

Author contributions

Conceptualization: B.D.; Methodology: R.D.B; Formal analysis and investigation: R.D.B, M.C., G.M., A.N.M.; Writing - original draft preparation: R.D.B, M.C.; Writing - review and editing: All authors; Funding acquisition: B.D.; Resources: B.D., G.M., A.N.M.; Supervision: B.D., G.M., A.N.M.

Declarations

Conflict of interest The author declares that no conflict of interest exists.

References

- Abrisqueta I, Vera J, Tapia L M, Abrisqueta J M, Ruiz-Sánchez M C (2012). Soil water content criteria for peach trees water stress detection during the postharvest period. *Agricultural Water Management*, 104, 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.11.015>
- Ahumada-Orellana L, Ortega-Farías S, Poblete-Echeverría C, Searles P S (2019). Estimation of stomatal conductance and stem water potential threshold values for water stress in olive trees (cv. Arbequina). *Irrig Sci* 37: 461-467. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00623-9>
- Amato D, Montanaro G, Vurro F, Coppedé N, Briglia N, Petrozza A, Janni M, Zappettini A, Cellini F, Nuzzo V (2021). Towards in vivo monitoring of ions accumulation in trees: Response of an in planta organic electrochemical transistor based sensor to water flux density, light and vapor pressure deficit variation. *Appl Sci*, 11(11), 4729. <https://doi.org/10.3390/app11114729>
- Améglio T, Archer P, Cohen M, Valancogne C, Daudet F A, Dayau S, Cruiziat P (1999). Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant Soil* 207: 155-167. <https://doi.org/10.1023/A:1026415302759>
- Bai Y, Li X, Liu S, Wang P (2017). Modelling diurnal and seasonal hysteresis phenomena of canopy conductance in an oasis forest ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 246, 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.006>
- Begg J E, Turner N C (1970). Water potential gradients in field tobacco. *Plant Physiology*, 46(2), 343-346. <https://doi.org/10.1104/pp.46.2.343>
- Blanco V, Domingo R, Pérez-Pastor A, Blaya-Ros P J, Torres-Sánchez R. (2018) Soil and plant water indicators for deficit irrigation management of field-grown sweet cherry trees. *Agric Water Manag* 208:83-94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.021>
- Blanco V, Kalcsits L (2021). Microtensiometers accurately measure stem water potential in woody perennials. *Plants*, 10: 2780. <https://doi.org/10.3390/plants10122780>
- Blanco V, Kalcsits L (2023). Long-term validation of continuous measurements of trunk water potential and trunk diameter indicate different diurnal patterns for pear under water limitations. *Agric Water Manag*, 281:108257. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108257>
- Briglia N, Williams K, Wu D, Li Y, Tao S, Corke F, Montanaro G, Petrozza A, Amato D, Cellini F, Doonan J H, Yang W, Nuzzo, V. (2020). Image-based assessment of drought response in grapevines. *Frontiers in plant science*, 11, 595. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00595>

Calabritto M, Mininni A N, Di Biase R, Pietrafesa A, Dichio B (2024). Spatio-temporal dynamics of root water uptake and identification of soil moisture thresholds for precision irrigation in a Mediterranean yellow-fleshed kiwifruit orchard. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1472093. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1472093>

Carrasco L O, Bucci S J, Di Francescantonio D, Lezcano O A, Campanello P I, Scholz F G, Rodríguez S, Madanes N, Cristiano P M, Hao G Y, Holbrook N M, Goldstein G (2015). Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species differing in wood density, growth rate and life history traits. *Tree physiology*, 35(4), 354-365. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu087>

Chartzoulakis K, Noitsakis B, Therios I (1993). Photosynthesis, plant growth and dry matter distribution in kiwifruit as influenced by water deficits. *Irrig Sci*, 14: 1-5. <https://doi.org/10.1007/BF00194999>

Conesa M R, Conejero W, Vera J, Ruiz-Sánchez M C (2023). Assessment of trunk microtensiometer as a novel biosensor to continuously monitor plant water status in nectarine trees. *Front Plant Sci*, 14:1123045. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1123045>

del Pozo A, Brunel-Saldias N, Engler A, Ortega-Farias S, Acevedo-Opazo C, Lobos G A, Jara-Rojas R, Molina-Montenegro M A (2019). Climate change impacts and adaptation strategies of agriculture in Mediterranean-climate regions (MCRs). *Sustain*, 11:2769. <https://doi.org/10.3390/su11102769>

De Swaef T, Steppe K, Lemeur R (2009). Determining reference values for stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in young apple trees based on plant responses to water deficit. *Agric Water Manag*, 96:541-550. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.013>

Dichio B, Montanaro G, Sofo A, Xiloyannis C (2013). Stem and whole-plant hydraulics in olive (*Olea europaea*) and kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Trees*, 27:183-191. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0787-3>

Du Y L, Wang Z Y, Fan J W, Turner N C, Wang T, Li F M (2012). β -Aminobutyric acid increases abscisic acid accumulation and desiccation tolerance and decreases water use but fails to improve grain yield in two spring wheat cultivars under soil drying, *J Exp Bot*, 63(13), 4849-4860., <https://doi.org/10.1093/jxb/ers164>

- Fernandes-Silva A, Oliveira M, Paço T A, Ferreira I (2018). Deficit irrigation in Mediterranean fruit trees and grapevines: Water stress indicators and crop responses. In: Ondrašek G (ed) *Irrigation in agroecosystems*. IntechOpen, London, pp 1-24. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80365>
- Fernández J E (2017). Plant-based methods for irrigation scheduling of woody crops. *Horticulturae*, 3:35. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020035>
- Fulton A, Buchner R, Olson B, Schwankl L, Gilles C, Bertagna N, Walton J, Shackel K (2001). Rapid equilibration of leaf and stem water potential under field conditions in almonds, walnuts, and prunes. *HortTechnology* 11(4):609-615
- Goudriaan J, van Laar H H (1994). *Modelling Potential Crop Growth Processes*. – Kluwer Academic Publ., Dordrecht – Boston – London. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0750-1>
- Gucci R, Massai R, Xiloyannis C (1997). Mechanism of drought avoidance in kiwifruit vines. *Acta Hort* 444:311-316. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.444.48>
- Hellkvist J, Richards G, Jarvis P G (1974). Vertical gradients of water potential and tissue water relations in Sitka spruce trees measured with the pressure chamber. *Journal of Applied Ecology*, 637-667. <https://doi.org/10.2307/2402215>
- Hsiao T C (1990). Measurements of plant water status. In: Steward B A, Nielsen D R (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph 30. ASA CSSA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 243-279
- Intrigliolo D S, Castel J R (2004). Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrig Sci*, 23:93-102. <https://doi.org/10.1007/s00271-004-0097-7>
- Intrigliolo D S, Castel J R (2006). Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agric Water Manag*, 83:173-180. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.12.005>
- Jones H G (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J Exp Bot*, 55: 2427-2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>

- Jones H G (2007). Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *J Exp Bot*, 58:119-130. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl118>
- Lakso A N, Intrigliolo D S (2022). Plant-based sensing for irrigation management in the field. *Acta Hort* 1335:247-262. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1335.30>
- Lakso A N, Santiago M, Stroock A D (2022) a. Monitoring Stem Water Potential with an Embedded Micro Tensiometer to Inform Irrigation Scheduling in Fruit Crops. *Horticulturae* 8:1207. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121207>
- Lakso A N, Zhu S, Santiago M, Shackel K, Volkov V, Stroock A D (2022) b. A microtensiometer sensor to continuously monitor stem water potentials in woody plants – design and field testing. *Acta Hort* 1335:317-324. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1335.39>
- Lampinen, B D, Shackel K A, Southwick S M, Olson W H (2001). Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune. *Irrig Sci*, 20:47-54. <https://doi.org/10.1007/s002710000028>
- López-Bernal Á, García-Tejera O, Testi L, Villalobos F J (2024). Irrigation Scheduling Using Plant- and Soil-Based Methods. In: Villalobos F. J., Fereres E. (Eds.), *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 285-303
- Martínez-Vilalta J, Garcia-Forner N (2017). Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: deconstructing the iso/anisohydric concept. *Plant Cell Environ*, 40:962-976. <https://doi.org/10.1111/pce.12846>
- Mayr S (2021). Relevance of time and spatial scales in plant hydraulics. *Tree Physiol*, 41(10), 1781–1784. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab093>
- McCutchan H, Shackel K A (1992). Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *J Am Soc for Hortic Sci* 117:606–611
- Meinzer F C, Johnson D M, Lachenbruch B, McCulloh K A, Woodruff D R (2009). Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Functional Ecology*, 23(5), 922-930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01577.x>

- Mills T M, Li J, Behboudian M H (2009). Physiological responses of gold kiwifruit (*Actinidia chinensis*) to reduced irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 134(6), 677-683. <https://doi.org/10.21273/JASHS.134.6.677>
- Mininni A N, Laterza D, Tuzio A C, Di Biase R, Dichio B (2022). Soil water content monitoring as a tool for sustainable irrigation strategy in a kiwifruit orchard under semi-arid conditions. *Acta Hortic* 1332:203-210 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1332.27>
- Montanaro G, Dichio B, Xiloyannis C (2007). Response of photosynthetic machinery of field-grown kiwifruit under Mediterranean conditions during drought and rewatering. *Photosynthetica*, 45:533-540. <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0091-4>
- Montanaro G, Dichio B, Xiloyannis C (2009) Shade mitigates photoinhibition and enhances water use efficiency in kiwifruit under drought. *Photosynthetica*, 47:363–371. <https://doi.org/10.1007/s11099-009-0057-9>
- Montanaro G, Briglia N, Petrozza A, Carlomagno A, Rustioni L, Cellini F, Nuzzo V (2024). Image-based sensing of salt stress in grapevine. *OENO ONE*, 58(1). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.1.7757>
- Moriondo M, Bindi M (2007). Impact of climate change on the phenology of typical Mediterranean crops. *Ital J Agrometeorol*, 3:5-12
- Naor A (2000). Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Hortic.* 537, 447-454. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.537.52>
- Naor A (2006). Irrigation Scheduling and Evaluation of Tree Water Status in Deciduous Orchards. In: Janick J, *Horticultural Reviews* Volume 32. John Wiley & Sons, Inc New Jersey, pp 111-166. <https://doi.org/10.1002/9780470767986.ch3>
- Nieto L G, Huber A, Gao R, Biasuz E C, Cheng L, Stroock A D, Lakso A N, Robinson T L (2023). Trunk Water Potential Measured with microtensiometers for Managing Water Stress in “Gala” Apple Trees. *Plants*, 12:1912. <https://doi.org/10.3390/plants12091912>
- Noun G, Lo Cascio M, Spano D, Marras S, Sirca C (2022). Plant-Based Methodologies and Approaches for Estimating Plant Water Status of Mediterranean Tree Species: A Semi-Systematic Review. *Agronomy* 12:2127. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092127>

Pagay V, Santiago M, Sessoms D A, Huber E J, Vincent O, Pharkya A, Corso T N, Lakso A N, Stroock A D (2014). A microtensiometer capable of measuring water potentials below -10 MPa. *Lab Chip* 14:2806–2817. <https://doi.org/10.1039/C4LC00342J>

Pagay V (2021). Dynamic aspects of plant water potential revealed by a microtensiometer. *BioRxiv*, 2021-06. <https://doi.org/10.1101/2021.06.23.449675>

Pagay V (2022). Evaluating a novel microtensiometer for continuous trunk water potential measurements in field-grown irrigated grapevines. *Irrig Sci*, 40:45-54. <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00758-8>

Phillips N, Oren R, Zimmermann R, Wright S J (1999). Temporal patterns of water flux in trees and lianas in a Panamanian moist forest. *Trees*, 14, 116-123. <https://doi.org/10.1007/s004680050216>

Pratima P, Sharma N, Kaushal R (2016). Effect of deficit irrigation and in situ moisture conservation on soil moisture content and frequency of irrigation in kiwifruit cultivar Allison. *J Appl Nat Sci*, 8:2093-2098. <https://doi.org/10.31018/jans.v8i4.1096>

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing Vol. 2021 (Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing). Available at: <https://www.R-project.org/>

Sakamoto Y, Ishiguro M, Kitagawa G (1986). Akaike information criterion statistics. Springer Dordrecht Publishing Company

Santesteban L G, Miranda C, Marín D, Sesma B, Intrigliolo D S, Mirás-Avalos J M, Escalona J M, Montoro A, de Herralde F, Baeza P, Romero P, Yuste J, Uriarte D, Martínez-Gascuña J, Cancela J J, Pinillos V, Loidi M, Urrestarazu J, Royo J B (2019). Discrimination ability of leaf and stem water potential at different times of the day through a meta-analysis in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agric Water Manag*, 221:202-210. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.020>

Segovia-Cardozo D A, Franco L, Provenzano G. (2022). Detecting crop water requirement indicators in irrigated agroecosystems from soil water content profiles: An application for a citrus orchard. *Sci Total Environ*, 806:150492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150492>

Shackel K A, Ahmadi H, Biasi W, Buchner R, Goldhamer D, Gurusinghe S, Hasey J, Kester D, Krueger B, Lampinen B, McGourty G, Micke W, Mitcham E, Olson B, Pelletrau K, Philips H, Ramos

- D, Schwankl L, Sibbett S, Snyder R, Southwick S, Stevenson M, Thorpe M, Weinbaum S, Yeager, J. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *Hort Technology*, 7:23-29
- Shackel K A (2007). Water relations of woody perennial plant species. *J. Int. des Sci. de la Vigne et du vin* 41(3):121-129. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2007.41.3.847>
- Shackel K (2011). A plant-based approach to deficit irrigation in trees and vines. *HortScience*, 46(2), 173-177. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.2.173>
- Shackel K, Moriana A, Marino G, Corell M, Pérez-López D, Martin-Palomo M J, Caruso T, Marra F P, Alcaras L M A, Milliron L, Rosecrance R, Fulton A, Searles, P. (2021). Establishing a reference baseline for midday stem water potential in olive and its use for plant-based irrigation management. *Front Plant Sci*, 12, 791711. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.791711>
- Scharwies J D, Dinneny J R (2019). Water transport, perception, and response in plants. *Journal of plant research*, 132(3), 311-324. <https://doi.org/10.1007/s10265-019-01089-8>
- Scholz F G, Bucci S J, Goldstein G, Meinzer F C, Franco A C, Miralles-Wilhelm F (2007). Biophysical properties and functional significance of stem water storage tissues in Neotropical savanna trees. *Plant, cell & environment*, 30(2), 236-248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01623.x>
- Scholz, F. G., Phillips, N. G., Bucci, S. J., Meinzer, F. C., Goldstein, G. (2011). Hydraulic capacitance: biophysics and functional significance of internal water sources in relation to tree size. Size-and age-related changes in tree structure and function, 341-361. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1242-3_13
- Silva R M, Ferreira M I (2014). A new microdendrometric index to quantify water status in kiwifruit. *Acta Hort* 1038:43-50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1038.3>
- Stewart W L, Fulton A E, Krueger W H, Lampinen B D, Shackel K A (2011). Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. *Cal Ag*. 65:90-99
- Velazquez-Chavez L J, Daccache A, Mohamed A Z, Centritto M (2024). Plant-based and remote sensing for water status monitoring of orchard crops: Systematic review and meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 303, 109051. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109051>

- Vera J, Conejero W, Conesa M R, Ruiz-Sánchez M C (2019). Irrigation factor approach based on soil water content: A nectarine orchard case study. *Water*, 11:589. <https://doi.org/10.3390/w11030589>
- Wan L, Zhang Q, Cheng L, Liu Y, Qin S, Xu J, Wang Y (2023). What determines the time lags of sap flux with solar radiation and vapor pressure deficit?. *Agric For Meteorol*, 333, 109414. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109414>
- Wang Z, Sun Z, Cui J (2023). Time lag effect on solar radiation of tree sap flux density for different DBH of *Larix olgensis*. *Journal of Plant Ecology*, 16(3), rtac092. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtac092>
- Williams L E, Baeza P (2007). Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *American journal of enology and viticulture*, 58(2), 173-181. <https://doi.org/10.5344/ajev.2007.58.2.173>
- Xiloyannis C, Montanaro G, Dichio B (2012). Crop yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper Nr. 66*, FAO, Rome, Italy
- Xiloyannis C, Dichio B, Mininni A N (2023). Vine Nutrition and Water Requirement. In Richardson A C, Burdon J N, Ferguson A R (eds) *Kiwifruit: Botany, Production and Uses*. CAB International, Boston, pp 164-183
- Zeppel M J, Murray B R, Barton C, Eamus D (2004). Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia. *Functional Plant Biology*, 31(5), 461-470. <https://doi.org/10.1071/FP03220>

Supplementary material

1. Tables

Table S1 – Stem water potential (SWP) measured with the pressure chamber at different times of leaf wrapping (15, 30 and 60 min). Data are mean $\pm$ standard error of the mean ($n = 8$). Comparison within SWP values was performed with an ANOVA at $\alpha=0.05$. ns= not significant

Time (min)	SWP (MPa)
15	-0.41 $\pm$ 0.06
30	-0.32 $\pm$ 0.03
60	-0.42 $\pm$ 0.04
Significance	ns

Table S2 – Parameters of the various linear model fitting data of only well-watered vines (CTRL) and those pooled over the CTRL, Mild and Severe irrigation treatments

Dataset	Model	coefficient		Std. Error	Sign.
CTRL	Y ~ VPD Adj. R^2 = 0.77	(Intercept)	-0.014021	0.007142	.
		VPD	-0.115426	0.003111	***
	Y ~ SWC Adj. R^2 = 0.05	(Intercept)	2.713	0.58560	***
		SWC	-0.07684	0.01518	***
Pooled CTRL, Mild, Severe	Y ~ SWC Adj. R^2 = 0.32	(Intercept)	-1.104881	0.041413	***
		SWC	0.025013	0.001221	***
	Y ~ VPD Adj. R^2 = 0.37	(Intercept)	-0.002692	0.012806	
		VPD	-0.128638	0.005591	***
	Y ~ VPD +SWC Adj. R^2 = 0.62	(Intercept)	-0.7706539	0.0334229	
		VPD	-0.1160802	0.0043811	***
		SWC	0.0221148	0.0009187	***
	Y ~ VPD +SWC +VPD*SWC Adj. R^2 = 0.62	(Intercept)	-0.5085360	0.0705702	***
		VPD	-0.2381733	0.0293508	***
		SWC	0.0143095	0.0020669	***
VPD:SWC		0.0036684	0.0008722	***	

Significance codes ***, α = 0.001; ** α = 0.01, * α = 0.05, "." α = 0.1

Table S3 – Parameters of the segmented linear model fitting SWP and TWP pairwise data pooled from all irrigation treatments

Estimated Break-Point(s): SWP_MPa -1.601 (Std Err 0.089)				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	-0.4887	0.2308	-2.118	0.0354 *
SWP_MPa	0.2493	0.1251	1.993	0.0475 *
U1.SWP_MPa	0.5302	0.1307	4.058	NA

Significance codes: '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

2. Figures

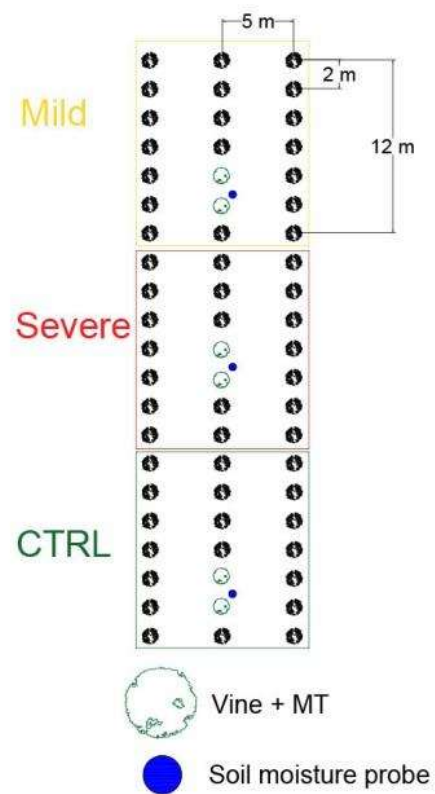


Fig. S1 Experimental design with planting density, irrigation treatments (CTRL, Mild, Severe), vines with microtensiometers (MT) installed and soil moisture probes.

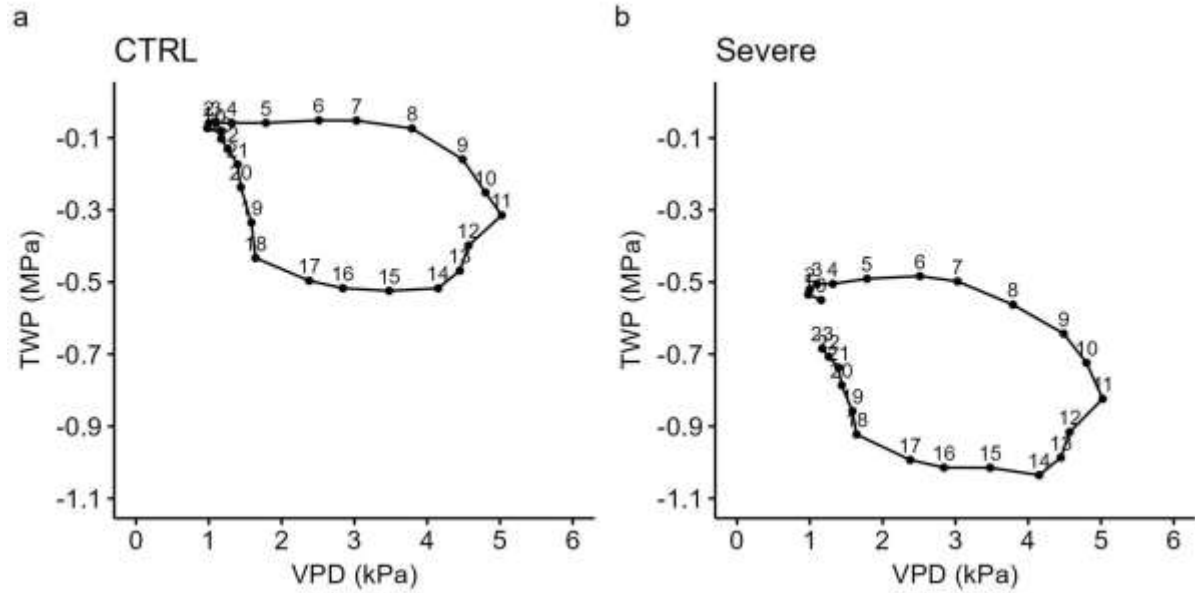


Fig. S2 Diurnal hysteresis response of hourly trunk water potential (TWP) to air vapour pressure deficit (VPD) in (a) well irrigated vines (CTRL) and (b) progressively exposed to water stress (Severe)

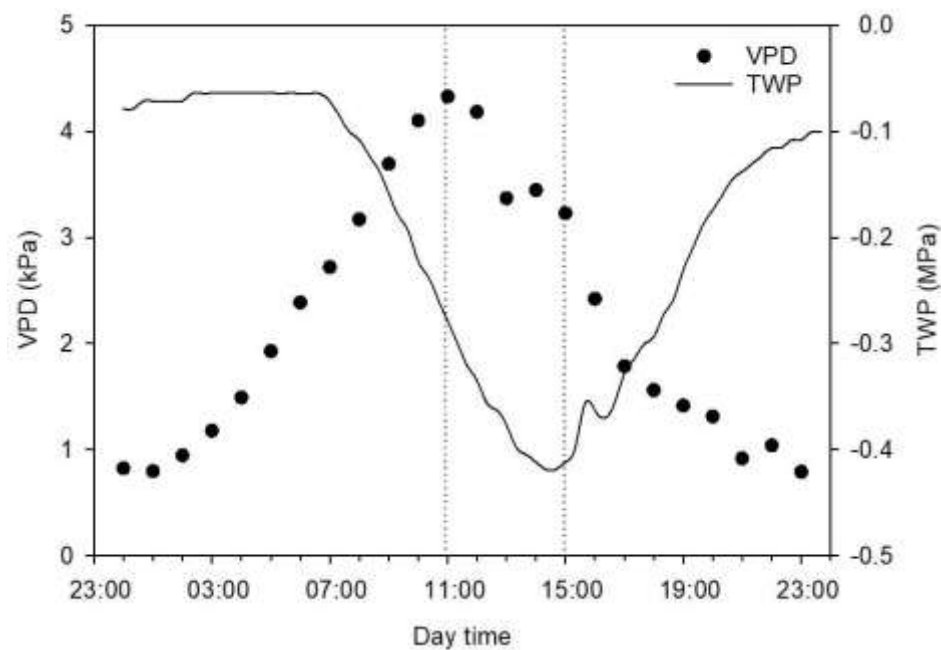


Fig. S3 Time lag response of trunk water potential (TWP) to air vapour pressure deficit (VPD) in well irrigated (CTRL) vines. One day of the experiment was chosen to illustrate the phenomenon

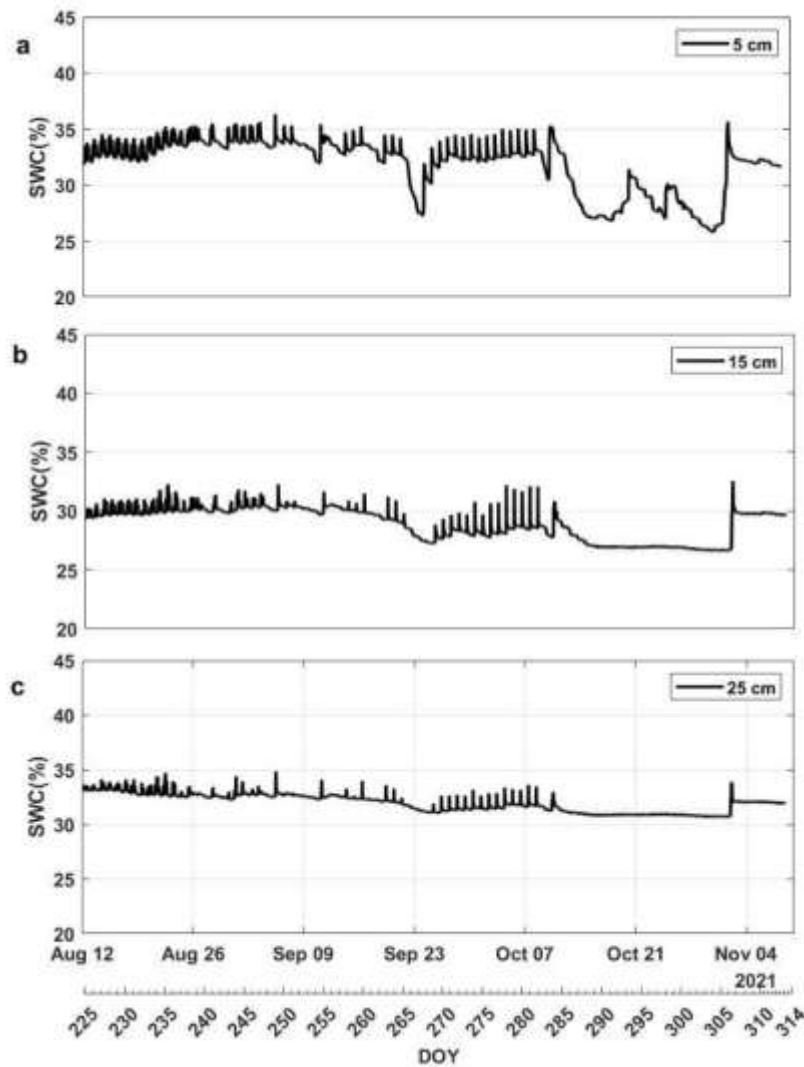


Fig. S4 Seasonal trend in soil water content (SWC) in individual soil layers measured at (a) 5, (b) 15, and (c) 25 cm depth during the 2021 experimental period

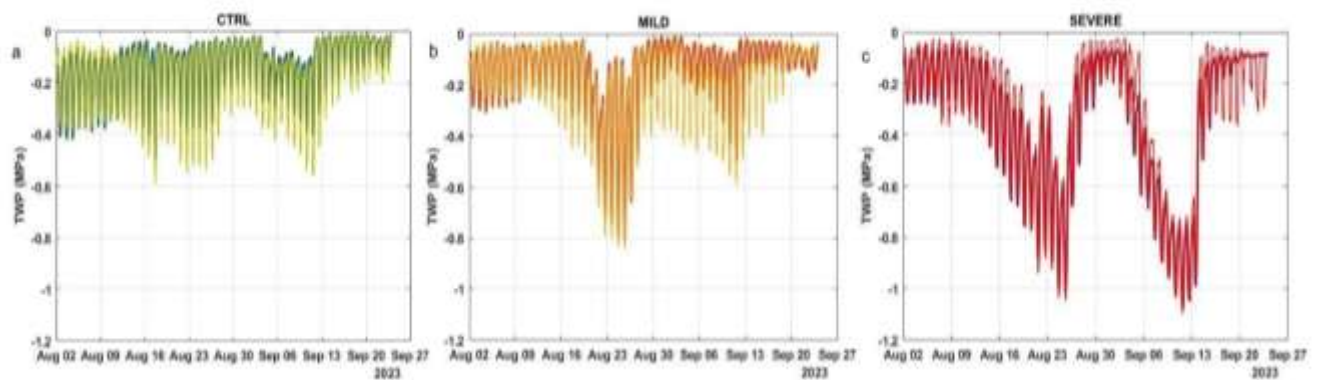


Fig. S5 Seasonal trends of trunk water potential (TWP) in (a) CTRL, (b) Mild and (c) Severe irrigation treatments during the 2023 experimental period

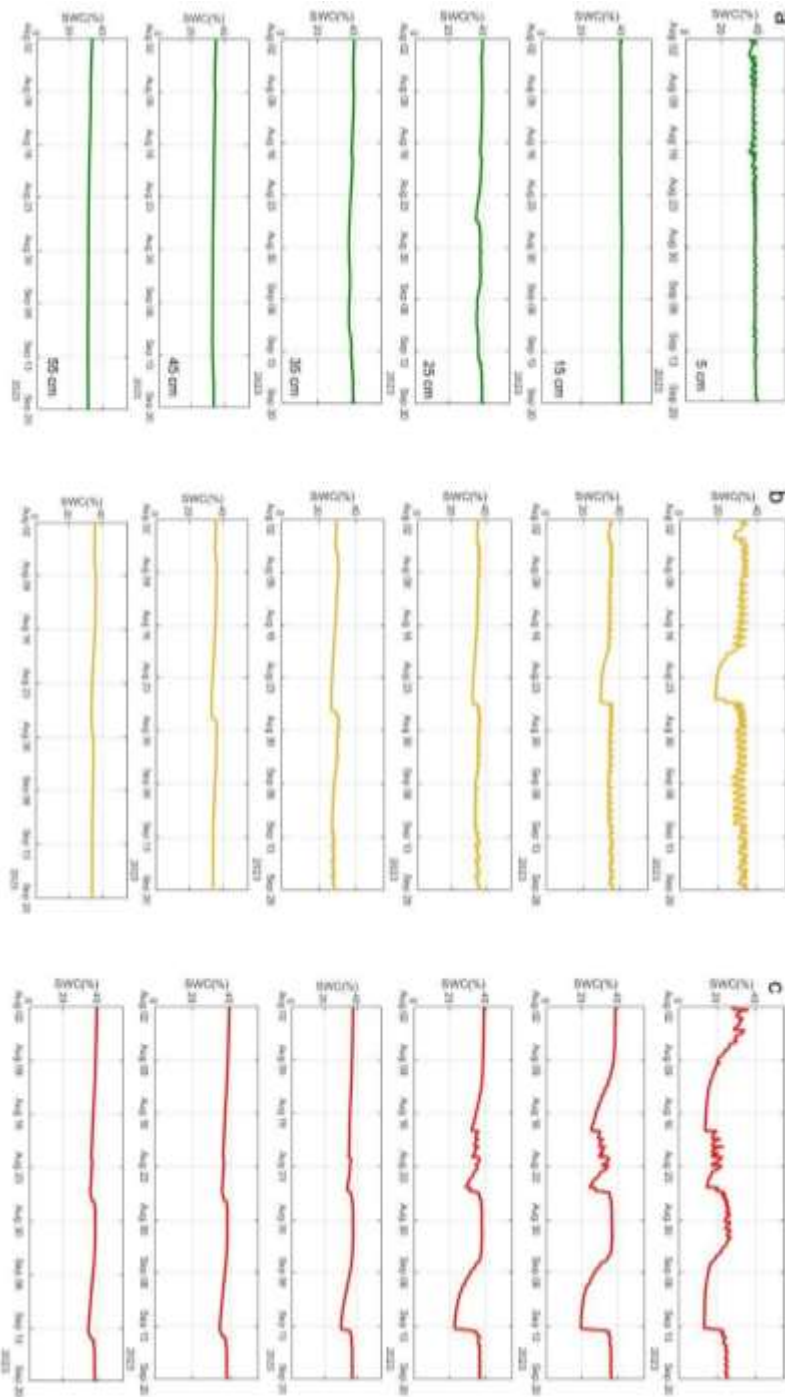


Fig. S6 Seasonal trends in soil water content (SWC) in individual soil layers (5, 15, 25, 35, 45 and 55 cm) in (a) CTRL, (b) Mild and (c) Severe irrigation treatments during the 2023 experimental period

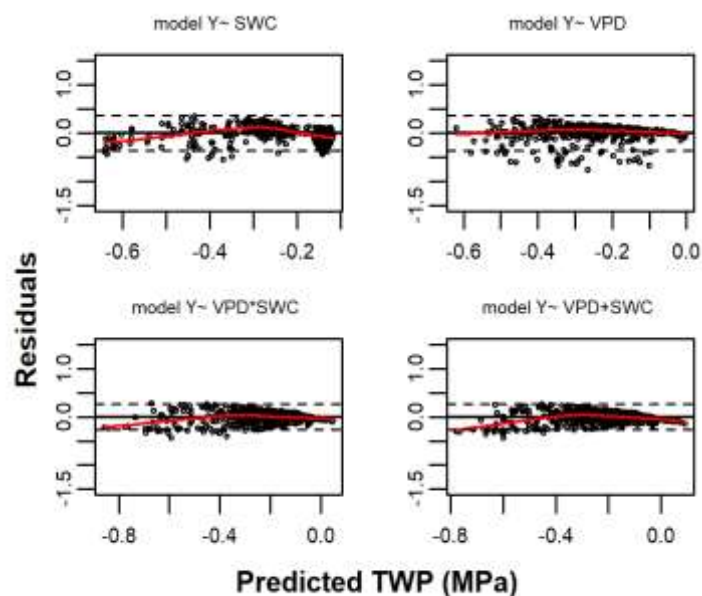


Fig. S7 Residuals plots of the various linear models for the estimates of trunk water potential (TWP). The bold horizontal lines represent zero in the ordinate's values, dashed horizontal lines define the interval of the ± 2 standard deviations calculated on the residuals, and the red one is the locally-weighted scatterplot smoothing line

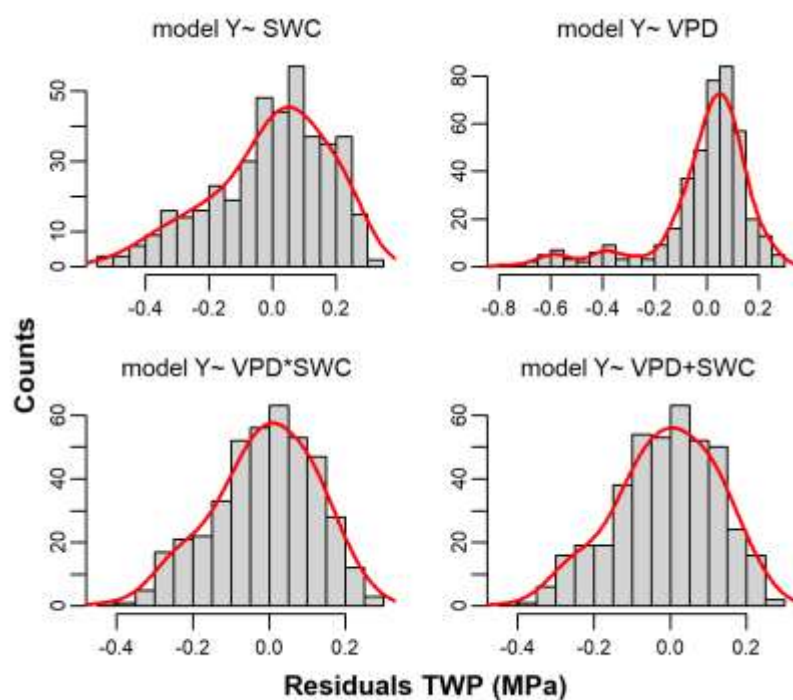


Fig. S8 Distribution of residuals values of the predicted trunk water potential (TWP). The red line represents the frequency curve scaled to counts

