



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse Naturali e  
Ambiente

Corso di laurea magistrale in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente  
ed il Territorio

**Analisi degli scambi di energia e materia tra un frutteto di  
*Actinidia* protetto da rete e l'atmosfera in Sud Italia**

Relatore:

Prof. Andrea Pitacco

Correlatore:

Dott. Luca Tezza

Laureando:

Leonardo Freo

Matricola n.:

1238813

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

# Indice

<b>Riassunto</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>5</b>
<i>Introduzione generale</i> .....	5
<i>Gli effetti della rete sulle interazioni tra superficie coltivata e atmosfera</i> .....	11
La radiazione ed il bilancio radiativo .....	12
Il vento e la turbolenza.....	15
Temperatura, umidità e CO <sub>2</sub> : scambi di calore e di materia.....	26
<i>L'Eddy Covariance e l'analisi della chiusura bilancio energetico</i> .....	31
<i>Clima e agricoltura</i> .....	37
Il contesto climatico della Basilicata .....	38
Caratteristiche meteorologiche dell'estate Metapontina.....	39
L'agricoltura nel Metapontino .....	40
A. <i>deliziosa</i> e sua coltivazione .....	40
<i>Obiettivi dello studio</i> .....	43
<b>Materiali e metodi</b> .....	<b>45</b>
<i>Area di studio</i> .....	45
<i>Selezione del sito e struttura dell'actinidieta</i> .....	46
<i>Installazione del traliccio e della strumentazione</i> .....	49
Misura della radiazione .....	50
Misura dei flussi di energia e materia lungo il profilo verticale del frutteto .....	51
Misura del flusso di calore nel suolo e del suo contenuto idrico .....	53
<i>Analisi dei dati</i> .....	54
<b>Risultati</b> .....	<b>57</b>
<b>Discussione</b> .....	<b>81</b>
<b>Conclusioni</b> .....	<b>90</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>92</b>

## Riassunto

A fronte delle crescenti pressioni a cui è sottoposto il settore agricolo – sia in termini di qualità e quantità del raccolto che in relazione all'utilizzo intelligente delle risorse – l'impiego di varie tipologie di reti disposte a protezione delle colture di pregio si è rivelata una pratica per molti aspetti vincente e, perciò, sempre più diffusa. Questo studio presenta una caratterizzazione microclimatica completa di un frutteto di kiwi situato in sud Italia. L'obiettivo è quello di investigare quali siano le implicazioni della peculiare struttura stratificata del sistema colturale sugli andamenti giornalieri delle variabili micrometeorologiche misurate – simultaneamente e continuativamente per tre giorni estivi – a tre differenti quote (e cioè al di sotto delle chiome, tra chiome e rete e, infine, al di sopra della rete). Oltre alle variabili più convenzionali, a ciascuna livello di misura sono stati quantificati anche i flussi di calore e i flussi di CO<sub>2</sub> attraverso la tecnica dell'eddy covariance. I risultati hanno evidenziato che la rete, modulando solo leggermente gli scambi energetici e gassosi tra l'ecosistema interno e l'atmosfera, garantisce un elevato grado di continuità tra le caratteristiche fisiche, dinamiche e composizionali dell'aria presente nei due ambienti aerei ad essa adiacenti. Infatti, per la maggior parte delle variabili investigate, le differenze riscontrate tra i due livelli superiori sono risultate inferiori al 10%; tuttavia, rispetto alla velocità del vento, l'aria interna ha mostrato valori più che dimezzati rispetto a quella misurata esternamente (la forte relazione individuata è descritta da  $u_{in} = 0.45u_{ex} - 0.07$ ;  $R^2 = 0.96$ ). Tra i due livelli inferiori invece, i risultati hanno mostrato come lo spesso strato delle chiome sia in grado di mantenere condizioni microclimatiche interne estremamente differenti da quelle presenti esternamente; ciò è stato appurato relativamente a tutte le variabili micrometeorologiche analizzate. Le misure dei flussi di calore sono state condotte con successo solamente ai due livelli superiori, in quanto solo a queste quote sussistevano condizioni di turbolenza adeguate. I valori di Bowen Ratio sono risultati inferiori a 0.1 per entrambi i livelli e per la maggior parte del periodo analizzato, indicando la preponderanza del flusso di calore latente rispetto a quello di calore sensibile. Infine, grazie alle analisi della chiusura del bilancio energetico – descritte da  $y = 0.78x + 23.65$  ( $R^2 = 0.90$ ) e da  $y = 0.76x + 16.50$  ( $R^2 = 0.92$ ), rispettivamente per il livello intermedio e per il livello superiore – si è potuto appurare che l'eddy covariance è stata performata correttamente. Considerando che le estati di questa regione sono tendenzialmente secche e che la specie in esame ha elevate esigenze idriche, si conclude che la scelta impiantistica qui adottata ha, con molte probabilità, delle ripercussioni positive sulla coltivazione di *A. deliciosa* e, inoltre, potrebbe favorire un utilizzo più efficiente della risorsa idrica.

## Abstract

The agricultural sector is constantly facing new pressures both in terms of crop quality and quantity and also in relation to the efficient use of resources. In this context, the application of various types of nets, aimed at protecting valuable crops, has often proven to be a successful practice and therefore is increasing worldwide. This study presents a complete microclimatic characterisation of a kiwi orchard located in Southern Italy. The purpose is to investigate the implications of the peculiar stratified structure of the orchard ecosystem on the daily changes of the micrometeorological variables, measured simultaneously and continuously for three summer days at three different heights (i.e. below the canopies, between the canopies and the net and, finally, above the net). In addition to the more conventional parameters, heat fluxes and CO<sub>2</sub> fluxes were also quantified at each measurement level, using the eddy covariance technique. The results showed that the net modulates only slightly the energy and gas exchanges between the protected ecosystem and the atmosphere, ensuring a high degree of continuity between the physical, dynamic and compositional characteristics of the air in the two adjacent levels. In fact, for most of the variables investigated, the differences found between the two upper levels were less than 10%; however, with respect to wind speed, the air under the net showed values that were more than halved compared to those measured externally (the strong relationship identified is described by  $u_{in} = 0.45u_{ex} - 0.07$ ;  $R^2 = 0.96$ ). Instead, comparing the two lower levels, the results showed that the thick canopy layer is capable of maintaining internal microclimatic conditions that are substantially different from those found externally. Such evidence was consistent across all the micro-meteorological variables analysed. Heat flow measurements were carried out successfully only at the two upper levels, as adequate turbulence conditions existed only at these heights. Bowen Ratio values were below 0.1 for both levels and for most of the period analysed, indicating the predominance of latent heat fluxes over sensible heat fluxes. Finally, thanks to the energy balance closure analyses – which were described by  $y = 0.78x + 23.65$  ( $R^2 = 0.90$ ) and  $y = 0.76x + 16.50$  ( $R^2 = 0.92$ ) for the middle and upper levels, respectively - it was possible to conclude that the eddy covariance technique was performed correctly. Considering that the summers in this region tend to be dry and the species under consideration has high water requirements, one can conclude that the chosen orchard architecture likely has a positive impact on the cultivation of *A. deliciosa* and, in addition, could enhance water savings.

# Introduzione

## Introduzione generale

Il VI rapporto dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) dell'agosto 2021 ha ribadito e confermato che i cambiamenti climatici in atto sono inequivocabilmente la conseguenza delle attività antropiche. In particolare, l'aumento della temperatura media globale di oltre 1°C rispetto al periodo preindustriale è strettamente legato all'incremento delle concentrazioni atmosferiche dei principali gas serra, primo fra tutti l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Infatti, a causa del grande consumo di combustibili fossili, del disboscamento e dell'attività agricola, la concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> è più che raddoppiata rispetto ai valori medi del passato. Tale gas – una volta prodotto – non resta tutto in atmosfera, bensì una parte di esso viene sequestrata dagli oceani (≈25%), un'altra parte dalla vegetazione (≈30%) e la restante parte (≈45%) rimane di fatto in atmosfera (Friedlingstein *et al.*, 2019). Le piante possono quindi mitigare il fenomeno dell'aumento di temperatura all'origine, sottraendo CO<sub>2</sub> all'atmosfera e fissandola nei composti organici attraverso il processo della fotosintesi.

Tuttavia, le interazioni tra vegetazione e atmosfera non si limitano al ciclo del carbonio, bensì le piante hanno un ruolo attivo e fondamentale anche nello scambiare grandi quantità di acqua attraverso la traspirazione e, in misura minore, anche altre sostanze. Inoltre, poiché ricoprono gran parte delle terre emerse e si interfacciano direttamente e attivamente tra il suolo e l'atmosfera, esse mediano – nel tempo e nello spazio – molti degli scambi energetici che avvengono tra questi due compartimenti, interferendo sui flussi radiativi, sui flussi convettivi di calore sensibile e latente e sui flussi di calore nel suolo. In particolare, il flusso di calore latente associato all'evapotraspirazione dell'acqua è un fenomeno fondamentale nel regolare la temperatura delle piante, di molti animali, degli ecosistemi e, in definitiva, dell'intero pianeta. Esso è complementare al flusso di calore sensibile, in quanto in presenza di abbondante acqua prevale il primo a discapito di quest'ultimo, mentre in condizioni di scarsità d'acqua si verifica il contrario.

I flussi di calore sopracitati – unitamente al moto rotatorio della terra – generano le correnti atmosferiche e il conseguente rimescolamento dell'atmosfera. L'aria, infatti, una

volta riscaldata e/o arricchita in umidità a livello della superficie, diminuisce in densità e tende a risalire, venendo contestualmente sostituita da aria più fredda e/o più secca.

Grazie quindi al contributo attivo delle piante nel processo dell'evapotraspirazione e grazie alla loro struttura tridimensionale eterogenea e discontinua, la quale accentua lo scambio di quantità di moto col vento rispetto ad una superficie piana ed omogenea, la vegetazione contribuisce ad attivare e mantenere il regime turbolento della bassa atmosfera. Questa condizione di moto, la quale consiste nel movimento caotico, vorticoso, imprevedibile e con repentine fluttuazioni di velocità delle particelle costituenti l'aria, è un fattore chiave nel rimescolamento dell'atmosfera e, perciò, nei processi di trasporto di energia e materia su ampia scala.

In generale, dal punto di vista termodinamico, l'atmosfera e la superficie terrestre – con tutto ciò che giace su di essa – si definiscono come dei sistemi aperti, in quanto sono in grado di scambiare sia energia che materia. Tuttavia, affinché avvengano effettivamente dei flussi direzionali i due sistemi considerati si devono trovare in una situazione di disequilibrio. Quest'ultimo è garantito quasi esclusivamente dall'energia solare che arriva alla terra per mezzo della radiazione elettromagnetica, in quanto la sua entità varia sia a livello spaziale (per esempio con la latitudine, esposizione, ecc.) che temporale (per esempio durante il giorno, tra le stagioni, ecc.) e, inoltre, interagisce in modo differente con le varie componenti terrestri che incontra. È proprio questo grande apporto energetico, la sua variabilità e le diverse interazioni instaurate con la materia e con la vegetazione che mantengono condizioni di disequilibrio, al quale, per contro, si oppongono dei flussi funzionali a mitigarlo. Tali flussi avvengono a qualsiasi scala dimensionale e sono essenziali alla vita sulla terra: basti pensare, per esempio, al ciclo idrologico, alle correnti atmosferiche ed oceaniche, al mantenimento della temperatura entro un certo intervallo favorevole, all'allontanamento delle sostanze gassose di scarto e alla loro diluizione nell'aria.

L'intuizione che la biosfera, la geosfera e l'atmosfera si trovano in un rapporto di interdipendenza – e che quindi si influenzano reciprocamente – ha origini molto antiche. Tuttavia, la comprensione e la quantificazione di tali interazioni sono relativamente recenti e solo all'inizio del secolo scorso, grazie all'avanzamento scientifico e tecnologico, hanno visto una notevole evoluzione. L'interesse per quest'ambito di ricerca è tutt'ora

estremamente attivo ed attuale, in quanto sono molti i risvolti pratici ed applicabili, per esempio, alla comprensione e previsione delle risposte degli ecosistemi ai cambiamenti climatici, al miglioramento dell'efficienza in agricoltura e alla mitigazione del fenomeno delle isole di calore urbane.

L'intricata complessità delle interazioni tra biosfera ed atmosfera si evince dal fatto che sono numerose le discipline che si intersecano e che contribuiscono ad affrontare in modo completo lo studio e la comprensione dei fenomeni fisici, dinamici e biogeochimici che influenzano gli strati dell'atmosfera più prossimi al suolo e alla vegetazione che lo ricopre. Cimentandosi nell'analisi di tali interazioni su scala spaziale ridotta – ossia sulla caratterizzazione microclimatica di un'area particolare – è infatti indispensabile mantenere un approccio interdisciplinare che integri i principi fondamentali della fisica, della termodinamica e della fluidodinamica con i principali processi biogeochimici ed ecologici e con le peculiarità fisiologiche e morfologiche della vegetazione ivi presente, nonché con le caratteristiche climatiche proprie del luogo.

I primi studi micrometeorologici – basati quindi sull'analisi delle caratteristiche fisico-chimiche e dinamiche degli strati di atmosfera più prossimi alla superficie e, perciò, altamente influenzati da quest'ultima – sono stati effettuati su superfici omogenee, piane e relativamente semplici, quali un prato o una coltura agraria uniforme. Queste prime misurazioni facevano affidamento sul metodo del flusso-gradiente, il quale assumeva che il trasporto turbolento fosse analogo alla diffusione molecolare: ossia che i flussi fossero legati ai gradienti attraverso una semplice relazione di proporzionalità. Tale approssimazione era giustificata sia dalle limitazioni strumentali (dovute soprattutto al loro tempo di risposta poco rapido), che dalla scelta di analizzare gli scambi di una vegetazione poco alta e molto omogenea. Nel momento in cui si è voluto studiare gli scambi che avvengono in ambienti più eterogenei e discontinui, come le foreste, dove la turbolenza è molto più sviluppata ed efficiente nel trasporto di energia e materia e dove i gradienti verticali sono molto meno accentuati rispetto al caso del prato, l'approccio indiretto del flusso-gradiente non era più affidabile.

Solo negli ultimi decenni, grazie all'implementazione dei sensori per le misurazioni, alle capacità di acquisizione e di calcolo dei computer e al consolidamento del quadro teorico sotteso ai meccanismi del trasporto turbolento, si è andata affermando la tecnica

dell'eddy covariance. Tale tecnica consiste nel campionare simultaneamente e ad alta frequenza ( $\geq 10$  Hz) la componente verticale della velocità del vento e le grandezze scalari o vettoriali di interesse (quali il contenuto di calore o la quantità di moto posseduta da un dato volume d'aria, la concentrazione di un gas, ecc.). I dati istantanei così raccolti vengono successivamente analizzati statisticamente in modo tale da ottenere il flusso turbolento netto grazie al calcolo della covarianza delle fluttuazioni di velocità verticale del vento e dell'entità in esame. Questo metodo si è rivelato molto versatile ed affidabile per misurare gli scambi di quantità di moto, di calore sensibile e latente, di CO<sub>2</sub> e di altri gas associati ai processi biogeochimici che avvengono negli strati limite della bassa atmosfera. Tuttavia, il costo elevato della strumentazione, i molti accorgimenti necessari per un suo utilizzo adeguato e la complessità delle rielaborazioni dei dati grezzi fanno dell'eddy covariance una tecnica di non facile accesso. Ciononostante, se opportunamente applicata, questa è di certo la tecnica micrometeorologica che, ad oggi, meglio si presta alla quantificazione dei flussi promossi dal regime turbolento della bassa atmosfera, i quali sono rappresentativi di un'area più o meno estesa e, quindi, riducono gli errori dovuti all'elevatissima variabilità spaziale e temporale propria degli ecosistemi investigati. Inoltre, poiché la strumentazione non viene installata a diretto contatto con la vegetazione, bensì nella libera atmosfera sovrastante le chiome, i possibili disturbi sulle condizioni ambientali reali – dati proprio dall'installazione degli strumenti in campo – sono minimi. Il crescente interesse nel monitoraggio ambientale, con particolare riferimento alle concentrazioni atmosferiche dei principali gas serra responsabili del riscaldamento globale, ha indotto la comunità scientifica a creare delle reti internazionali composte da stazioni di misura continua situate negli ecosistemi più svariati e che vedono applicata l'Eddy covariance con la finalità di monitorare, sul lungo periodo, la risposta degli ecosistemi ai cambiamenti climatici.

L'applicazione di questa tecnica è di notevole interesse anche in ambito agrario e l'aumento dei relativi studi pubblicati in letteratura verificatosi negli ultimi decenni ne è la conferma. Tra le attività antropiche, l'agricoltura è infatti il settore produttivo maggiormente responsabile dell'uso di suolo e di risorse idriche. Perciò, la comprensione delle dinamiche e delle interazioni che si instaurano tra l'ecosistema colturale e la bassa



atmosfera costituisce un tassello fondamentale per intraprendere delle scelte finalizzate a ridurre al minimo il nostro impatto ambientale.

D'altra parte, spesso accade che l'intuizione e l'esperienza degli agricoltori precedano la scienza: il caso dell'utilizzo di reti schermanti in agricoltura ne è un esempio. Esistono attualmente svariate tipologie di reti agricole e il loro impiego su colture di pregio è in rapido aumento. Queste strutture – che costituiscono un compromesso tra il sistema isolato (e perciò interamente controllato) proprio delle serre climatizzate e il sistema classico di coltivazione in campo aperto – si sono rivelate molto efficienti in termini di costi-benefici. A seconda delle esigenze, tali reti possono schermare la coltura completamente (cioè sia orizzontalmente che lateralmente) oppure solo orizzontalmente. Le principali funzioni svolte sono l'esclusione di uccelli e di insetti patogeni, la riduzione della radiazione solare in eccesso, il miglioramento del regime termico del microclima colturale, la riduzione della velocità del vento in regioni molto ventose, la protezione dalla grandine e la modificazione dello spettro della radiazione solare per controllare i processi mediati da particolari bande della radiazione stessa.

Nonostante ciascuna tipologia di rete sia progettata per svolgere una funzione benefica principale, è intuibile che qualsiasi struttura di questo tipo modifica contemporaneamente sia gli scambi radiativi che il trasporto di calore, di materia e di quantità di moto tra il campo coltivato e l'atmosfera, alterando in definitiva il microclima e le esigenze idriche della coltura.

I notevoli e plurimi vantaggi dell'utilizzo di reti agricole – quali l'economicità dell'impianto, la qualità del prodotto finale, l'uso più efficiente delle risorse e la riduzione dei danni associati a fenomeni atmosferici e biologici avversi – hanno stimolato alcuni gruppi di ricerca a studiare e quantificare in modo analitico gli effetti dell'impiego di queste strutture in agricoltura e le sue implicazioni sulle interazioni tra la coltura e la bassa atmosfera. Tuttavia, la ricerca scientifica in tale ambito è relativamente giovane: infatti, buona parte degli studi pubblicati evidenziano la necessità di approfondimento e confronto, sia attraverso la sperimentazione e la misurazione diretta che attraverso l'elaborazione di modelli numerici predittivi.

Soprattutto in ambito agrario, scomporre, comprendere e quantificare l'entità di questi scambi continui ed interdipendenti è estremamente importante al fine di trovare

strategie sempre più efficienti e razionali volte a rispondere in modo adeguato alle crescenti pressioni sia in termini di quantità e qualità di produzione che in relazione ai cambiamenti climatici che sono ormai in atto.

Pertanto, nel presente studio sperimentale si sono analizzati gli scambi che avvengono durante i giorni estivi tipici del sud Italia tra un frutteto di *Actinidia deliciosa* e l'atmosfera. Lo scopo è quello di quantificare ed interpretare, attraverso l'analisi dei flussi di energia e di materia, gli effetti della presenza della rete antigrandine (disposta orizzontalmente sopra questa coltura) sul microclima interno all'impianto. Gli auspici sono che questo studio contribuisca a consolidare le conoscenze scientifiche relative ai fenomeni micrometeorologici che si verificano in questo particolare ecosistema agrario e che i risultati ottenuti possano guidare gli agricoltori verso strategie produttive più efficienti sia dal punto di vista delle scelte impiantistiche che dell'utilizzo razionale delle risorse.

## Gli effetti della rete sulle interazioni tra superficie coltivata e atmosfera



Figura 1. Foto scattata nel frutteto di kiwi in cui sono state effettuate le misurazioni. In alto, verso il cielo, si intravedono le pieghe della rete trasparente disposta a protezione della coltura di *A. deliciosa*. La rete e le chiome sono attraversate dal traliccio, il quale sorreggere la strumentazione adibita alle misurazioni degli scambi di energia e materia tra la coltura e l'atmosfera.

## La radiazione ed il bilancio radiativo

Come già accennato, la terra riceve dal sole moltissima energia, la quale si propaga attraverso lo spazio per mezzo della radiazione elettromagnetica. Solo una parte ( $\approx 50\%$ ) della radiazione solare che arriva all'esterno dell'atmosfera interagisce effettivamente con la superficie terrestre. Infatti, la restante parte o viene riflessa tale quale – sia dall'atmosfera che da ciò che ricopre la superficie stessa – oppure viene assorbita dall'atmosfera. Contemporaneamente, poiché l'emissione di radiazione è una proprietà intrinseca di qualsiasi corpo avente una temperatura superiore allo zero assoluto, sia la superficie terrestre che l'atmosfera, non trovandosi a 0 K, irradiano energia. Tuttavia, sia la quantità che la qualità della radiazione emessa dipendono fortemente dalla temperatura del corpo emettitore: il sole, infatti, essendo estremamente più caldo della terra, irradia principalmente nella banda del visibile (radiazione ad onda corta, fotoni più energetici); mentre la terra e le sue componenti – più fredde rispetto al sole – emettono principalmente nella banda dell'infrarosso (radiazione ad onda lunga o radiazione termica, fotoni meno energetici).

Pertanto, il bilancio radiativo misurato in prossimità della superficie si compone di quattro flussi radiativi, due in entrata e due in uscita. Il flusso totale in entrata è dato dalla somma della radiazione solare incidente (sia diretta che diffusa) e dalla radiazione infrarossa emessa dall'atmosfera verso la terra, mentre il flusso totale in uscita è dato dalla somma della radiazione solare riflessa e dalla radiazione infrarossa emessa dalla superficie. La radiazione netta disponibile per una data superficie equivale alla differenza tra il flusso totale in entrata e il flusso totale in uscita e, quindi, alla differenza tra l'energia radiante effettivamente assorbita e quella riemessa nell'infrarosso. Durante il giorno, tale assorbimento di radiazione altera il bilancio energetico della superficie, la quale si riscalda e/o dissipa l'energia in eccesso attraverso una serie di meccanismi volti a ripristinare l'equilibrio energetico tra i vari compartimenti ambientali tra loro adiacenti. La conduzione di calore agli strati sotto-superficiali del suolo, la cessione di calore all'aria e all'acqua a contatto con la superficie (se più fredde) e l'allontanamento di calore latente associato all'evaporazione dell'acqua ne sono i principali meccanismi (Monson & Baldocchi, 2014).

È evidente che, quando la superficie è coperta da vegetazione, il bilancio radiativo si complica: le piante infatti riflettono, assorbono, trasmettono ed emettono radiazione e, di conseguenza, modificano – nello spazio e nel tempo – la quantità di energia disponibile al suolo. A maggior ragione, la presenza di una rete a copertura della vegetazione aggiunge un ulteriore livello di complessità. Anch'essa infatti riflette, assorbe e trasmette sia la radiazione ad onda corta che quella ad onda lunga. Ciò avviene in proporzioni dipendenti dalle sue proprietà radiometriche (che sono determinate a loro volta dalle caratteristiche fisico-chimiche del materiale costituente le fibre, dalla sua porosità, dal suo colore, dal suo spessore, ecc.), dalla tipologia di radiazione e dal suo angolo di incidenza rispetto alla rete. Inoltre, anche la rete stessa – in base alla sua temperatura ed alla sua emissività – emette radiazione termica e questo contributo al bilancio energetico del microclima sottostante è significativo soprattutto durante le ore notturne, e cioè quando viene a mancare la componente solare e le superfici tendono a raffreddarsi attraverso la perdita di calore per irraggiamento verso l'atmosfera.

La prima dettagliata analisi degli effetti di una rete ombreggiante sulle componenti del bilancio radiativo è stata condotta in un campo di tabacco del Connecticut da parte di Waggoner *et al.* (1959), i quali hanno riportato che, sotto una rete di cotone avente una porosità del 56% e disposta orizzontalmente a 2.7 m dal suolo nudo, la riduzione della radiazione ad onda corta era pari al 20% e al 33%, mentre l'aumento della radiazione ad onda lunga era pari al 4% e al 25%, rispettivamente per una giornata nuvolosa e per una giornata serena.

Successivamente, numerosi altri studi si sono cimentati nel misurare e predire le proprietà radiometriche di svariate tipologie di reti, nonché di valutarne gli effetti sulle componenti del bilancio radiativo dell'ambiente sottostante.

L'effetto più significativo che accomuna tutte le reti è che esse trasmettono solo una parte della radiazione solare globale. La loro trasmissività (o trasmittanza) dipende – oltre che dalle loro caratteristiche fisiche e radiometriche – dall'angolo di elevazione del sole: infatti, a parità di altre condizioni, la porzione di radiazione trasmessa decresce al diminuire dell'angolo di elevazione del sole rispetto alla rete (Möller *et al.*, 2003, 2010; Möller & Assouline 2007). Un altro aspetto rilevante è che, nonostante le reti presenti sul mercato vengono spesso distinte in base al loro grado di trasmissività, l'esposizione agli

agenti atmosferici per periodi prolungati ne compromette le proprietà radiometriche originali. Per esempio, le misurazioni di Möller *et al.* (2010), condotte durante il periodo estivo ed in assenza di precipitazioni in un bananeto protetto da rete, hanno mostrato come la trasmissività di quest'ultima diminuisse linearmente nel tempo di circa 0,1% al giorno a causa dell'accumulo di polvere sulla stessa.

Inoltre, poiché parte della radiazione solare diretta viene deviata dalle fibre costituenti le reti, si è visto che sotto a tali strutture si ha un apprezzabile aumento della radiazione diffusa: ciò è stato verificato sia da misurazioni effettuate sul campo (Allen, 1975) che da prove effettuate in condizioni di semi-laboratorio (Möller *et al.*, 2010). L'effetto dell'aumento della radiazione diffusa (a discapito di quella diretta) rappresenta uno dei motivi per cui si ha una migliore efficienza nell'utilizzo dell'acqua da parte delle colture protette da rete (Tanny, 2013; Healey *et al.*, 1998). Infatti, specialmente per le piante mature, grazie all'aumento della luce diffusa, anche le foglie più basse – e quindi ombreggiate da quelle sovrastanti – ricevono l'energia necessaria per mantenere buoni livelli di fotosintesi e questo effetto ha probabilmente delle ripercussioni positive sulla produttività della coltura (Möller *et al.*, 2010; Healey *et al.*, 1998).

D'altra parte, mentre durante il giorno il bilancio radiativo per una data superficie è dominato dalla radiazione solare, durante la notte tale bilancio è univocamente definito dai flussi ascendenti e discendenti di radiazione ad onda lunga. Pertanto, poiché il regime termico – sia giornaliero che stagionale – è decisivo nel determinare la produttività di una coltura e la qualità del raccolto, negli ultimi anni è stata posta particolare attenzione nell'analizzare le proprietà termiche di alcune tipologie di reti.

Si è visto che le reti costituite da materiali altamente riflettenti, aventi una bassa emissività e una bassa trasmissività limitano la perdita di radiazione termica da parte dell'ambiente sottostante durante le ore notturne (Teitel & Segal, 1995) e, perciò, riducono l'incidenza delle gelate per irraggiamento (Tanny *et al.*, 2003; Teitel *et al.*, 1996). Inoltre, a parità di altre condizioni, il tasso di perdita di calore per irraggiamento diminuisce al diminuire del rapporto tra l'area della rete e la superficie su cui essa insiste: ciò equivale a dire che una rete orizzontale è più efficiente nel trattenere il calore rispetto ad una rete disposta a formare un tunnel semicilindrico o rettangolare (Teitel & Segal, 1995).

Similmente a quanto riportato per la rete, seppur in misura differente, le foglie delle piante (e nel loro insieme le chiome) interagiscono con la radiazione producendo effetti analoghi sul bilancio radiativo dell'ambiente sottostante: le chiome, infatti, attenuano la radiazione solare incidente e ne aumentano la sua frazione diffusa; così come, contestualmente, promuovono un incremento della radiazione infrarossa diretta verso il suolo.

Tuttavia, rispetto al caso della rete, poiché la variabilità spaziale e temporale che definisce le proprietà radiometriche delle chiome (quali l'indice dell'area fogliare, l'orientazione delle singole foglie, il loro spessore e la loro opacità, il loro contenuto idrico e la loro temperatura, ecc.) è estremamente elevata, risulta molto più incerto desumere quale sia il bilancio radiativo sotto-chioma mediato per un intero ecosistema attraverso misurazioni locali effettuate su un singolo punto del campo. Per esempio, uno studio condotto in una foresta di conifere della Svizzera ha concluso quanto già affermato da Link *et al.* (2004), e cioè che è necessario un array di circa 10 piranometri per produrre una stima giornaliera ragionevole della radiazione solare incidente sotto-chioma (Webster *et al.*, 2016).

Per questi motivi, una caratterizzazione dettagliata e rappresentativa del bilancio radiativo sotto-chioma di un ecosistema può essere solo stimata grazie all'impiego simultaneo e prolungato di numerosi radiometri o, altrimenti, attraverso un approccio modellistico indiretto.

## Il vento e la turbolenza

Come ben noto dall'esperienza quotidiana di ciascuno di noi, la miscela di gas e vapori che costituisce l'atmosfera terrestre è in continuo movimento. Questa condizione dinamica del fluido aria è garantita quasi esclusivamente dall'energia proveniente dal sole, la quale, variando in quantità sia a livello spaziale che temporale, produce modificazioni e discontinuità nella distribuzione del calore all'interno dell'atmosfera, compromettendone costantemente l'equilibrio idrostatico. Si creano così delle differenze di densità – e perciò di pressione – tra le diverse masse d'aria, le quali, subendo la forza derivante dall'esistenza di un gradiente di pressione, fluiscono da regioni dove

quest'ultima è maggiore a regioni dove è minore generando il vento. A questa forza promotrice dell'accelerazione dell'aria si oppone la forza di attrito che, per contro, ne determina una decelerazione a causa del trasferimento e della dissipazione di parte della sua energia cinetica. L'attrito a cui è soggetta l'aria in movimento è dovuto sia alla sua viscosità, e cioè all'attrito interno fra le molecole del fluido stesso (gli strati di particelle di aria incontrano resistenza quando scorrono con diverse velocità gli uni sugli altri), che alla sua interazione con la superficie terrestre (gli ostacoli solidi e le irregolarità della superficie modificano localmente il campo di moto dell'aria e ne determinano un rallentamento, in quanto assorbono parte dell'energia cinetica da essa posseduta).

In generale, in relazione al rapporto tra l'intensità delle forze inerziali e delle forze viscosi esistenti in un fluido in movimento, quest'ultimo può trovarsi in un regime di moto laminare oppure turbolento. I fattori che determinano il verificarsi di uno o dell'altro regime di flusso sono la velocità imposta al fluido, la sua viscosità e le caratteristiche della superficie su cui fluisce.

Il flusso laminare si ha quando un fluido possiede bassa velocità e/o elevata viscosità: in questo caso il moto è ordinato e prevedibile in quanto le particelle che lo compongono scorrono su lamine indipendenti e non si ha rimescolamento tra uno strato e l'altro. Nel regime laminare le forze viscosi sono predominanti e la dislocazione verticale di una sostanza tra uno strato e l'altro avviene molto lentamente e solo per diffusione molecolare (e perciò in modo selettivo e specifico per ciascuna sostanza). Con riferimento agli scambi tra vegetazione ed atmosfera, per esempio, il moto laminare si ha nei primi strati di molecole di aria più prossimi ad una superficie (quale può essere una foglia). Qui l'aria, risentono fortemente della resistenza che si verifica dalla sua interazione con la superficie, perde moltissima della sua energia cinetica: la velocità del fluido in questa microregione è dunque così bassa da garantire un regime di moto laminare. Questo strato prende il nome di strato limite laminare ed è molto importante per le piante e per gli animali. Esso funge infatti da isolante in quanto in questo regime di moto la dislocazione del calore e delle sostanze gassose avviene molto più lentamente, favorendo così la gradualità degli scambi con l'ambiente esterno.

Al contrario, allontanandosi dalla superficie in esame, a mano a mano che la velocità dell'aria aumenta, avviene la transizione al moto turbolento. Il flusso turbolento si ha



dunque quando la velocità del fluido è elevata e le forze inerziali prevalgono sulle forze viscosi (minore è la viscosità del fluido minore è la velocità sufficiente al passaggio dal regime laminare a quello turbolento). In questa condizione, la velocità e la direzione di spostamento delle singole particelle d'aria non sono costanti ed omogenee, ma sono, di fatto, soggette a variazioni repentine e difficilmente prevedibili. Tuttavia, nonostante la turbolenza possa apparire come un moto puramente caotico e disordinato, la sua manifestazione fisica consiste nell'insieme di strutture vorticosi tridimensionali coerenti, chiamate comunemente eddies (o vortici). Una volta generati per convezione libera o per convezione forzata, gli eddies evolvono continuamente durante il loro movimento in atmosfera: le loro instabilità intrinseche e/ gli scontri con la superficie fanno sì che essi decompongano in vortici di dimensioni via via minori e questo fenomeno di trasferimento energetico a cascata continua fino a quando tali strutture sono così piccole che tutta la loro energia cinetica viene dissipata in calore a causa dell'attrito viscoso. Il trasporto in regime turbolento è enormemente più efficace e, inoltre, non è selettivo: è infatti il fluido stesso che, rimescolandosi continuamente, trascina con sé le sostanze (come molecole, ma anche piccole particelle solide) in esso contenute, le quali vengono traslocate passivamente e indistintamente.

Per quanto riguarda l'atmosfera terrestre, l'azione simultanea delle forze di gradiente e di quelle d'attrito (unitamente alla loro elevata variabilità spazio-temporale, alle proprietà fisico-dinamiche del fluido aria e alla scabrezza della superficie terrestre) fanno sì che il vento nella bassa atmosfera si trovi tendenzialmente in un regime di moto turbolento. Questa condizione è fondamentale per garantire la vita sulla terra, poiché le sostanze di scarto, così come il calore in eccesso, vengono allontanate rapidamente e, allo stesso modo, si ha una continua disponibilità di sostanze necessarie (come, per esempio, l'ossigeno per gli animali e la CO<sub>2</sub> per la fotosintesi delle piante).

Tuttavia, sebbene la turbolenza descriva il regime di moto generale della bassa atmosfera e sia molto efficace nel rimescolamento dell'aria, le sue caratteristiche dinamiche – così come la composizione chimica e la temperatura dell'aria – non sono omogenee e costanti, ma variano con l'altezza, spesso in modo improvviso e non lineare. Tali evidenze hanno indotto gli scienziati ad organizzare la struttura dell'atmosfera in strati, che, seppur

a loro volta molto variabili nelle proprie caratteristiche, sono solitamente ben distinguibili e classificabili.

Il macro-strato adiacente alla superficie terrestre è la troposfera. Essa ha uno spessore medio di circa 11 km, contiene la quasi totalità del vapore acqueo ed è molto dinamica in quanto è qui che avvengono i principali fenomeni meteorologici. All'interno della troposfera, separate da una fascia di inversione termica, si possono individuare a loro volta due regioni distinte: la troposfera libera (dove la velocità orizzontale del vento è elevata e relativamente costante con l'altezza) e lo strato limite planetario. Come suggerisce il nome, quest'ultimo rappresenta la porzione di atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre e, perciò, maggiormente influenzata dall'interazione con essa. Infatti, nello strato limite planetario – che ha uno spessore di 1-2.5 km – le caratteristiche chimico-fisiche e dinamiche dell'aria rispondono in tempi molto brevi (in meno di un'ora) alle variazioni delle condizioni della superficie. Ne consegue che, al suo interno, si differenziano dei sotto-strati che evolvono costantemente sia in relazione al momento del giorno che in base alle caratteristiche proprie dell'ecosistema con cui l'aria sta interagendo.

La comprensione delle proprietà e dell'evoluzione spazio-temporale di questi strati più prossimi alla superficie terrestre è di fondamentale importanza qualora si vogliano effettuare misurazioni e studi micrometeorologici relativi all'interazione tra un ecosistema e l'atmosfera sovrastante. Infatti, le loro caratteristiche chimico-fisiche e dinamiche, così come il loro spessore, influenzano significativamente l'intensità degli scambi di energia e materia che avvengono tra questi due compartimenti ambientali.

In generale, mentre durante le ore diurne il riscaldamento della superficie terrestre innesca e mantiene i moti convettivi di ascesa dell'aria più calda e di contestuale discesa di quella più fredda facendo sì che la turbolenza nello strato limite planetario sia molto ben sviluppata ed efficace nel trasporto verticale di energia e materia; al contrario, durante le ore notturne il raffreddamento della superficie porta ad una stabilizzazione degli strati di aria riducendo progressivamente l'intensità della turbolenza e, quindi, anche la velocità del trasporto verticale.

A fini pratici, indipendentemente dalla condizione di instabilità, neutralità o stabilità dello strato limite planetario, la sua porzione inferiore prende il nome di strato superficiale. Lo

spessore di quest'ultimo equivale a circa il 10% dello strato limite planetario e le proprietà dell'aria in esso contenuta sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche specifiche dell'ecosistema considerato: questa parte di atmosfera si trova infatti in equilibrio con la superficie sottostante. Qui la velocità del vento, risentendo fortemente dell'attrito con i corpi superficiali sia solidi che liquidi e presentando perciò un elevato tasso di trasferimento e dissipazione della sua energia cinetica, decresce sempre più a mano a mano che ci si avvicina al suolo, assumendo un profilo logaritmico. La turbolenza in questa regione atmosferica ha origine prevalentemente meccanica, ossia si sviluppa e si mantiene grazie agli scontri continui tra l'aria in movimento e gli ostacoli superficiali e grazie all'evoluzione delle instabilità legate all'esistenza di un elevato gradiente verticale della velocità media del vento.

Per le sue caratteristiche di forte interdipendenza con la superficie, le misurazioni dei flussi di energia e materia tra ecosistema e atmosfera per mezzo della tecnica dell'eddy covariance vengono condotte all'interno dello strato superficiale. Tuttavia, l'eterogeneità strutturale e le asperità aerodinamiche delle chiome, fanno sì che nella porzione inferiore di tale strato i moti del vento siano solitamente così complessi ed imprevedibili che risulterebbe molto difficile caratterizzare adeguatamente i flussi verticali degli scalari di interesse in corrispondenza e/o in stretta prossimità del volume occupato dalle chiome, in quanto l'elevata variabilità spaziale porterebbe a stime locali non rappresentative degli scambi dell'ecosistema nel suo complesso. Questa sotto-regione dello strato superficiale (che prende il nome di sotto-strato della scabrezza) si estende dal suolo fino ad una altezza pari a circa 2-3 volte quella della vegetazione stessa: qui le caratteristiche dinamiche del vento sono sito-specifiche e fortemente dipendenti dalle proprietà morfologiche delle chiome. Al contrario, nella porzione superiore dello strato superficiale (denominata sotto-strato inerziale) i flussi verticali di energia e materia promossi dalla turbolenza sono approssimativamente costanti con l'altezza in quanto variano meno del 10% rispetto al loro valore medio (Stull, 1988). Proprio per tale motivo, questa regione atmosferica viene anche chiamata strato di flusso costante. Qui è dunque possibile effettuare una caratterizzazione statistica della turbolenza in funzione del tempo e misurare con adeguata affidabilità gli scambi turbolenti che avvengono tra ecosistema e atmosfera. Allo stesso tempo però, dal momento che la vegetazione è attraversata dal

vento e poiché essa stessa gioca un ruolo attivo e determinante nell'influenzare l'entità e la direzionalità dei flussi di energia e materia, è fondamentale analizzare contemporaneamente le dinamiche del trasporto sia sopra le chiome che al loro interno al fine di avere un quadro quanto più completo degli scambi che avvengono tra ecosistema e atmosfera. Infatti, all'interno del volume occupato dalle piante, per ciascuno scalare, esiste una forte complessità legata alla distribuzione delle sue sorgenti e dei suoi pozzi che, unitamente alle caratteristiche del vento, concorrono a determinarne la sua ripartizione e la sua dislocazione.

Ovviamente, così come vale per i flussi radiativi, la presenza di una rete installata orizzontalmente al di sopra dalle chiome modifica e complica anche gli scambi di quantità di moto, di calore e di materia che avvengono tra la superficie coltivata e l'atmosfera. La rete si comporta infatti da barriera che, seppure permeabile a tutti i flussi sopracitati, isola parzialmente l'ecosistema colturale dall'ambiente esterno e, perciò, ne condiziona il grado di interazione con l'atmosfera sovrastante. Ciò ha inevitabilmente delle ripercussioni sul microclima colturale, il quale influenza a sua volta la fisiologia delle piante, la loro produttività e la loro efficienza nell'utilizzo delle risorse.

Proprio perché il moto dell'aria è un fattore chiave nel determinare l'entità dei flussi di calore e di materia, uno degli effetti più rilevanti delle reti agricole dal punto di vista micrometeorologico è quello di modificare le caratteristiche del vento in prossimità e al di sotto di esse, alterando così anche le proprietà delle sub-regioni atmosferiche dello strato superficiale. Infatti, come conseguenza della resistenza imposta al passaggio dell'aria, tali strutture determinano una diminuzione della velocità media del vento nell'ambiente ad esse sottostante, riducendone così anche la sua capacità complessiva di trasporto sia orizzontale che verticale. Per queste ragioni, numerosi studi si sono focalizzati nel misurare ed analizzare l'influenza che diverse tipologie di reti (collocate in altrettante situazioni di campo) avessero sul vento e sul trasporto turbolento in tali ecosistemi parzialmente confinati, ma comunque fortemente vincolati alle condizioni atmosferiche esterne.

Riguardo alla riduzione della velocità media del vento dovuta alla presenza di una rete, molti studi micrometeorologici hanno individuato (sperimentalmente e/o teoricamente) delle relazioni lineari che legassero la velocità dell'aria al di sotto della rete con quella che

si avrebbe, a parità di altre condizioni, in sua assenza (per esempio, Waggoner *et al.*, 1959; Tanny & Cohen, 2003; Tanny *et al.*, 2006; Möller & Assouline, 2007; Siqueira *et al.*, 2012; Teitel *et al.*, 2015; Teitel *et al.*, 2020). Nella panoramica elaborata da Tanny (2013) – la quale riassume e confronta le ricerche scientifiche relative al microclima e all’evapotraspirazione delle colture protette da reti agricole – l’autore evidenzia come tali relazioni siano molto variabili tra loro e suggerisce che la velocità interna del vento non è determinata solamente dalla tipologia di rete e dalla dimensione dei suoi fori, bensì anche da molteplici altri fattori, quali: la dimensione e la densità della vegetazione, l’altezza di campionamento, la collocazione del sensore all’interno del campo e le caratteristiche dell’ambiente limitrofo. Inoltre, contrariamente a quanto osservato da Allen (1975) che riporta un profilo uniforme della velocità del vento nello spazio compreso tra le chiome e la rete, Tanny *et al.* (2010) e Siqueira *et al.* (2012) riscontrano che la velocità media dell’aria aumenta con l’altezza, a mano a mano che dal limite superiore delle chiome ci si avvicina alla rete.

Come ben documentato in letteratura, oltre a ridurre l’intensità del vento, la presenza di una rete a copertura della vegetazione ne modifica, in alcuni casi, anche la sua direzione. Questo effetto è stato osservato sperimentalmente soprattutto negli impianti dotati di una rete avente una maglia molto stretta, la cui funzione principale è l’esclusione degli insetti patogeni (Möller *et al.*, 2003; Tanny *et al.*, 2003; Teitel *et al.*, 2015; Teitel *et al.*, 2020). Per esempio, Möller *et al.* (2003) hanno constatato che, al di sotto della rete, la direzione del vento nella metà del campo sopravento era opposta a quella del flusso d’aria esterno, mentre nella porzione sottovento la direzione del vento interna ed esterna era la medesima. Prevedere questa eterogeneità spaziale relativa alla direzione del vento è molto importante al fine di caratterizzare adeguatamente il microclima colturale: essa implica inevitabilmente la presenza di regioni di afflusso e di deflusso dell’aria all’interno del campo e, di conseguenza, le misurazioni degli scambi tra ecosistema ed atmosfera potrebbero essere enormemente distorte in relazione alla zona del campo in cui vengono effettuate. Tuttavia, negli impianti dotati di reti ombreggianti e antigrandine, non si verifica questo fenomeno e la direzione interna del vento coincide solitamente con quella che si ha esternamente (Tanny *et al.*, 2006 e 2010).

Strettamente legato alla riduzione della velocità interna del vento, un altro effetto molto importante dal punto di vista microclimatico promosso dalle reti è quello di ridurre la ventilazione degli ecosistemi agricoli ad esse sottostanti. Lo studio di Tanny *et al.* (2003) è il primo ad aver quantificato sperimentalmente il tasso di ventilazione in una coltura schermata da rete (in questo caso una rete antinsetto). Gli autori, misurando simultaneamente la velocità esterna del vento e il tasso di ventilazione (con la tecnica del bilancio del vapore acqueo), hanno dimostrato l'esistenza di una forte relazione lineare tra queste due variabili. Inoltre, comparando la retta ottenuta sperimentalmente con quella calcolata teoricamente per la stessa coltura in campo aperto (senza rete), essi hanno evidenziato che, nel caso in cui la rete è presente, l'incremento del tasso di ventilazione con l'aumento della velocità esterna del vento è minore di quello che si avrebbe nella medesima situazione ma in assenza di tale struttura. Per la coltura protetta da rete, Tanny *et al.* (2003) riportano una riduzione del tasso di ventilazione di oltre il 50% rispetto al caso in cui la medesima ne fosse priva (e spesso fino al 70%, a seconda del sito di misura, della velocità esterna effettiva del vento e del periodo del giorno).

Anche nello studio condotto in una grande piantagione di banane ( $\approx 8$  ha) coperta da una rete ombreggiante Tanny *et al.* (2006) hanno riscontrato come il tasso di ventilazione fosse dipendente dalla velocità esterna del vento. Confrontando i loro risultati con quelli di Tanny *et al.* (2003) e con quelli di Demrati *et al.* (2001) (questi ultimi relativi ad una grande serra ventilata naturalmente), Tanny *et al.* (2006) suggeriscono che per una struttura sufficientemente grande e ventilata naturalmente, dove è presente una vegetazione fitta e ben sviluppata, il tasso di ricambio dell'aria al centro del campo è meno dipendente dalle sue dimensioni e dall'area attraverso la quale può avvenire la ventilazione. Tuttavia, Rigakis *et al.* (2015) riportano invece come le dimensioni dell'impianto sembrano influenzare fortemente il tasso di ricambio d'aria: infatti, a parità di altre condizioni, più questi ultimi sono estesi, minore risulta la loro ventilazione.

Un ulteriore aspetto che condiziona significativamente la velocità dell'aria interna e la ventilazione di tali ecosistemi è rappresentato dalla configurazione strutturale delle reti (e cioè come esse vengono installate in campo). Infatti, una rete disposta su un unico piano parallelo al suolo ha un effetto più marcato nel ridurre sia la velocità interna dell'aria che

il tasso di ventilazione dell'ecosistema sottostante rispetto alla medesima tipologia di rete collocata a formare colmi e valli (Teitel & Wenger, 2012).

Oltre a quanto già affermato, altrettanto importante – e solo recentemente approfondito – è la comprensione di come (e quanto) le reti agricole modifichino le proprietà e l'intensità della turbolenza al di sopra e all'interno degli impianti colturali che ne sono dotati. Queste informazioni sono infatti molto utili per misurare ed analizzare correttamente i flussi di energia e materia che avvengono tra la vegetazione protetta e la sovrastante atmosfera, specialmente qualora, a tal fine, venga impiegata una tecnica basata proprio sulle caratteristiche turbolente del moto dell'aria quale, per esempio, l'eddy covariance.

Una prima indagine sperimentale degli effetti indotti da una rete agricola sulle caratteristiche del vento e sui principali parametri che definiscono le proprietà fisico-dinamiche dello strato limite al di sopra e al di sotto di tali strutture è quella proposta da Tanny & Cohen (2003), relativa ad una rete ombreggiante collocata orizzontalmente appena sopra le chiome di alcuni alberi in un agrumeto. Successivamente, in un campo di peperoni abbastanza esteso ( $\approx 0.66$  ha) e protetto da una rete antinsetto, uno studio analogo condotto da Tanny *et al.* (2009) ha prodotto risultati qualitativamente simili (ma quantitativamente diversi per via della differente tipologia ed estensione della rete e della diversa morfologia della coltura). In entrambi i casi è stato dunque dimostrato che, in condizioni di neutralità o stabilità atmosferica, la presenza della rete induce l'inibizione della turbolenza, la riduzione della scabrezza (espressa in metri), la dislocazione verso l'alto (appena sopra la rete) del profilo del vento e l'aumento della resistenza aerodinamica; inoltre, relativamente ai rispettivi valori in condizioni di stabilità, quando lo strato limite al di sopra della rete diventa termicamente instabile, la velocità di attrito (parametro che quantifica, in forma di velocità, la tendenza del vento a trasferire quantità di moto verso la superficie e generare turbolenza) e la scabrezza aumentano, mentre diminuisce lo spostamento del piano zero (ossia la distanza dal suolo alla quale viene dislocato il profilo del vento a causa della presenza delle chiome e/o dalla rete) (Tanny & Cohen, 2003; Tanny *et al.*, 2009).

Tuttavia, la prima descrizione analitica e dettagliata delle caratteristiche della turbolenza all'interno di un ambiente colturale confinato da una rete agricola si ha solamente con il

lavoro di Tanny *et al.* (2006), nel quale vengono presentati i risultati delle misurazioni di un sistema Eddy Covariance installato al centro dell'impianto ad un'altezza compresa tra la rete ombreggiante e le chiome del bananeto sottostante. In questo studio sperimentale, Tanny *et al.* (2006) osservano che i vortici (perlomeno quelli di dimensioni maggiori) esibiscono una forma marcatamente ellissoidale, la quale viene accentuata maggiormente con l'aumento della velocità orizzontale del vento. Gli autori suggeriscono che questa forma particolarmente allungata potrebbe essere dovuta o al ridotto spazio esistente tra la rete e le chiome (1.8 m) per garantire la formazione di vortici ben sviluppati in altezza o all'effetto della rete di scomporre le grandi strutture vorticosi in vortici ampi ma poco spessi. Per quanto riguarda l'intensità media della turbolenza al di sotto della rete, Tanny *et al.* (2006) hanno misurato un valore che si discosta di poco da 0.5, quest'ultimo considerato il limite superiore individuato da Willis & Deardorf (1976) per poter considerare valida l'ipotesi di Taylor di congelamento della turbolenza (Tanny *et al.*, 2006). Inoltre, come affermato da Tanny *et al.* (2006) – e, in seguito, anche da Dicken *et al.* (2013) – le densità spettrali di energia della turbolenza riportate in funzione della frequenza – e relative a tre distinti periodi del giorno in cui la velocità media del vento era anch'essa diversa – risultano descritte da rette di regressione la cui pendenza si avvicina molto a  $-5/3$ , e cioè il valore tipico del sotto-intervallo inerziale degli strati limite turbolenti stazionari (Stull, 1988). Alla luce di quanto osservato, nonostante Raupach *et al.* (1996) abbiano suggerito che le proprietà della turbolenza che si ha al di sopra delle chiome normalmente esposte sono più analoghe a quelle di uno strato di rimescolamento che a quelle di uno strato limite, Tanny *et al.* (2006) concludono che le caratteristiche del vento nel volume al di sotto di una rete agricola sono più simili a quelle proprie di uno strato limite piuttosto che a quelle tipiche di uno strato di rimescolamento.

Poco dopo, sempre in una piantagione di banane protetta da una rete simile e nello stesso strato d'aria, Tanny *et al.* (2010) hanno implementato tale studio misurando le statistiche del vento interno per mezzo di due sistemi eddy covariance, allineati a due diverse altezze e sincronizzati nell'acquisizione dei dati, al fine di esplorare meglio la qualità della turbolenza. I loro risultati hanno confermato che, poiché la velocità di attrito è abbastanza simile ai due livelli – e, perciò, indipendente dall'altezza – le caratteristiche turbolente del vento al di sotto di tali strutture non sono molto diverse da quelle che si



hanno nello strato limite al di sopra della vegetazione in campo aperto (Tanny *et al.*, 2013).

Il recente studio di Tanny *et al.* (2018) approfondisce ulteriormente le principali caratteristiche della turbolenza e come queste varino con l'altezza e con le dimensioni della vegetazione in una piantagione di banane protetta da una rete ombreggiante. A dimostrazione del ruolo della rete nel sottrarre energia cinetica al vento e agire dunque da pozzo per il flusso di quantità di moto, viene riportato che la velocità di attrito interna (misurata al di sotto della rete) è circa il 50% di quella misurata esternamente (Tanny *et al.*, 2018). Inoltre, mentre all'esterno le pendenze degli spettri di energia si avvicinano molto a  $-5/3$ , all'interno (sia nel volume tra la rete e le chiome che nello spazio parzialmente occupato da queste ultime) le pendenze risultano avere valori maggiori, implicando un tasso più elevato di trasferimento di energia cinetica tra le diverse scale dimensionali delle strutture vorticosi (Tanny *et al.*, 2018). È stato anche osservato come, all'interno e appena al di sopra delle chiome, le dimensioni degli eddies siano correlate positivamente con la grandezza delle piante e con la distanza esistente tra di esse; esternamente alla rete invece, l'estensione dei vortici aumenta linearmente con l'altezza, analogamente a quanto avviene per gli strati limite turbolenti ben sviluppati al di sopra delle chiome normalmente esposte (Tanny *et al.*, 2018). Infine, i valori di intensità della turbolenza individuati da Tanny *et al.* (2018) si sono rivelati anch'essi molto variabili, in quanto dipendenti sia dall'altezza alla quale sono stati misurati che delle dimensioni delle piante. Nonostante l'intensità media della turbolenza sia molto vicina al limite superiore per la validità dell'ipotesi di Taylor, gli autori riportano valori superiori a 0.5 nel volume parzialmente occupato delle chiome, valori di poco inferiori a 0.5 nel volume compreso tra le chiome e la rete e valori quasi sempre minori a 0.5 al di sopra della rete. Alla luce di questi risultati Tanny *et al.* (2018) concludono che al di sopra della rete sussistono le condizioni migliori per misurare adeguatamente i flussi di energia e materia per mezzo della tecnica dell'eddy covariance, mentre al di sotto della rete le caratteristiche della turbolenza sono meno idonee per l'applicazione di questa tecnica.

Le caratteristiche della turbolenza sono state investigate dettagliatamente da parte di Teitel *et al.* (2020) anche all'interno di un campo di pomodori protetto da una rete antinsetto. Relativamente allo spazio compreso tra le chiome e la rete, gli autori

osservano che gli scarti quadratici medi delle tre componenti della velocità del vento, l'intensità della turbolenza e l'energia cinetica ad essa associata seguono un andamento giornaliero simile, dove i rispettivi valori massimi si hanno a mezzogiorno mentre quelli minimi si registrano in corrispondenza della notte; questi parametri risultano dunque meglio correlati all'andamento della temperatura dell'aria piuttosto che alla velocità media del vento misurata esternamente. Inoltre, mentre durante il giorno le pendenze del decadimento della densità spettrale di energia in relazione alla frequenza si sono rivelate generalmente vicine al valore teorico di  $-5/3$  (tipico del sotto-intervallo inerziale di uno strato limite turbolento stazionario), durante la notte, quando la velocità del vento diminuisce, queste pendenze aumentate notevolmente (Teitel *et al.*, 2020). Infine, in accordo con gli studi precedenti di Tanny *et al.* (2006 e 2018), anche Teitel *et al.* (2020) confermano che gli eddies presentano una forma marcatamente ellissoidale a causa del confinamento dovuto alla presenza della rete in alto e a quella delle chiome in basso.

## Temperatura, umidità e CO<sub>2</sub>: scambi di calore e di materia

Alterando a più livelli il grado di interazione tra la superficie terrestre e l'atmosfera, la presenza di una rete disposta a protezione di una coltura agraria modifica inevitabilmente anche la temperatura, l'umidità e la concentrazione di CO<sub>2</sub> dell'aria interna a tali ecosistemi parzialmente confinati. Al di là della presenza o dell'assenza di una rete, è importante sottolineare che, poiché i valori effettivi di questi parametri dipendono da molteplici fattori e da altrettanti flussi tra loro interdipendenti, risulta particolarmente complesso scomporre e distinguere in che misura i singoli fenomeni contribuiscano alle diverse realtà microclimatiche – nonché all'evoluzione delle stesse – che si osservano nei vari ambienti (sia naturali che agrari, ma anche artificiali).

Per quanto riguarda la temperatura dell'aria nella bassa atmosfera, essa è il risultato integrato di numerosi processi continui di trasferimento di energia che avvengono contemporaneamente e interessano tutte le diverse scale spaziali. Tra questi processi, i più rilevanti sono gli scambi di radiazione, i passaggi di stato dell'acqua, la ventilazione, la convezione e la conduzione del calore. Con queste premesse, è dunque evidente che l'effetto della rete di alterare significativamente sia i flussi radiativi che le caratteristiche

del vento ha delle ripercussioni complesse sull'andamento delle temperature dell'ambiente interno.

Rispetto al bilancio radiativo, come è vero che una rete disposta al di sopra di una coltura riduce, durante il giorno, la radiazione solare diretta verso le chiome e/o il suolo implicando necessariamente un minor apporto di energia per il potenziale riscaldamento dell'ambiente ad essa sottostante, è altrettanto vero che una rete ostacola – intercettando, riflettendo e riemettendo una parte della radiazione infrarossa proveniente dal suolo e/o dalle chiome – il trasferimento di calore per irraggiamento dalla superficie verso l'atmosfera, riducendo così il tasso di raffreddamento dell'ambiente interno. Questo secondo effetto è rilevante soprattutto durante le ore notturne, specialmente quando il cielo è limpido e la perdita di calore da parte della superficie per emissione di radiazione infrarossa è elevata, in quanto non è compensata da un flusso altrettanto consistente di radiazione termica proveniente dall'atmosfera.

Inoltre, l'effetto della rete di diminuire la velocità del vento e il tasso di ventilazione dell'ambiente sottostante favorisce la stabilizzazione dell'aria interna e ne riduce la sua capacità di trasporto: tali strutture possono quindi rallentare gli scambi di calore sensibile e latente con la sovrastante atmosfera e determinare, così, un aumento della temperatura e dell'umidità rispetto al caso in cui la rete non sia presente.

Misurando simultaneamente le principali variabili microclimatiche sia all'interno che all'esterno di questi ambienti semi-confinati (o, in alcuni casi, attraverso l'elaborazione di appositi modelli teorici), numerosi studi hanno potuto quantificare l'effetto complessivo delle reti investigate sull'andamento delle temperature e individuare, inoltre, quali fattori e/o meccanismi legati alla presenza di tali strutture incidano maggiormente sull'alterazione di questo parametro (per es. Waggoner *et al.*, 1959; Allen, 1975; Rossel & Ferguson, 1979; Teitel *et al.*, 1996; Desmarais *et al.*, 1999; Möller *et al.*, 2003; Tanny *et al.*, 2003; Möller & Assouline, 2007; Tanny *et al.*, 2008; Siqueira *et al.*, 2012; Kittas *et al.*, 2012). Nella maggior parte di questi studi le differenze di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno alle reti ombreggianti hanno segno opposto rispetto a quelle osservate negli impianti colturali dotati di reti antinsetto (Tanny, 2013). Infatti, mentre le reti ombreggianti generalmente (con alcune eccezioni) promuovono una leggera diminuzione della temperatura dell'aria interna durante il giorno e, in alcuni casi, un lieve aumento

durante le ore notturne, quelle antinsetto, pur riducendo maggiormente la quantità di radiazione solare che le attraversa, inibiscono a tal punto la ventilazione dell'ambiente sottostante che favoriscono un aumento della temperatura interna nell'intero arco delle 24 ore. Tuttavia, indipendentemente dalla tipologia di rete investigata, le osservazioni riportate in letteratura evidenziano che le differenze medie di temperatura tra l'aria interna e quella esterna difficilmente superano i 3°C (sia in positivo che, a maggior ragione, in negativo) e sono solitamente più marcate durante il giorno che durante la notte. Inoltre, si è visto che la presenza di una rete non modifica solamente la temperatura dell'aria, ma altera in modo apprezzabile anche la temperatura superficiale del suolo (per es. Guo *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2017) e quella delle foglie (per es. Kittas *et al.*, 2012).

Contrariamente a quanto avviene per la temperatura dell'aria – la quale, a seconda della tipologia di rete, delle soluzioni impiantistiche e delle condizioni meteorologiche, può essere sia maggiore che minore rispetto a quella dell'ambiente esterno di riferimento – la presenza di una qualsiasi rete favorisce sempre (o quasi) un incremento dell'umidità relativa dell'aria interna, con differenze tra interno ed esterno che sono più accentuate durante il giorno e pressoché inesistenti durante le ore notturne (per es. Waggoner *et al.*, 1959; Tanny *et al.*, 2003; Möller & Assouline, 2007; Tanny *et al.*, 2008, Siqueira *et al.*, 2012; Pirkner, 2014; Xu *et al.*, 2017). Nella loro rassegna sui recenti progressi scientifici relativi agli effetti delle reti agricole sul microclima e sulla produttività delle colture che ne sono dotate, Mahmood *et al.* (2018) hanno riportato che tali strutture incrementano l'umidità relativa dell'aria interna del 2-21% rispetto a quella che si avrebbe esternamente qualora la coltura fosse normalmente esposta. Così come vale per gli altri parametri micrometeorologici già visti, anche il grado di alterazione dell'umidità relativa dell'aria dipende da molteplici fattori, alcuni dei quali sono legati alle proprietà della rete, altri alle condizioni meteorologiche regionali ed altri ancora dipendono dalle caratteristiche della coltura e dalle tecniche colturali. In generale, più una rete inibisce la ventilazione dell'ecosistema e più favorisce la stabilizzazione degli strati d'aria ad essa sottostanti e limitrofi maggiore sarà la differenza tra l'umidità relativa interna e quella esterna.

Dal punto di vista pratico, nonostante per alcune specie vegetali un ambiente eccessivamente umido favorisca l'insorgere di malattie fungine, un'elevata umidità dell'aria (che equivale ad un basso deficit di pressione di vapore) contribuisce a ridurre l'evapotraspirazione dell'ecosistema nel suo complesso e, per questo motivo, l'aumento dell'umidità interna promosso dalle reti è una delle ragioni che concorrono al potenziale risparmio idrico delle colture così protette rispetto alle medesime coltivate in campo aperto (Tanny, 2013).

Oltre al confronto dei valori di temperatura e di umidità tra l'ambiente interno e quello esterno, un altro aspetto di particolare interesse per via delle sue implicazioni sul trasporto turbolento verticale è rappresentato dal grado in cui una rete condiziona e modifica i gradienti verticali di tali parametri. Infatti, i gradienti verticali di temperatura e di umidità dell'aria, i quali sono definiti dall'insieme delle condizioni ambientali e microclimatiche, determinano il grado di stabilità dello strato superficiale e, di conseguenza, il potenziale termodinamico per il suo rimescolamento. A tal fine, il parametro che considera contemporaneamente gli effetti della temperatura e dell'umidità sulla densità dell'aria – e che, quindi, indica in modo univoco la condizione di stabilità termica dell'atmosfera – è rappresentato dal gradiente della temperatura virtuale potenziale (Monteith e Unsworth, 1990): nel caso in cui quest'ultimo sia positivo (e cioè quando il suo valore aumenta con l'altezza) l'atmosfera è stabile; viceversa, quando è negativo, l'atmosfera è instabile; se invece è nullo, l'atmosfera si trova in una condizione di neutralità (Tanny, 2013). Ciononostante, poichè la temperatura ha un effetto molto più incisivo sulla densità dell'aria rispetto a quello associato al suo contenuto idrico, molti studi hanno considerato solo il gradiente di temperatura come misura approssimativa della stabilità termica dello strato superficiale.

Ora, mentre negli ecosistemi agrari normalmente esposti lo strato superficiale si trova solitamente in una condizione di instabilità termica durante la maggior parte del giorno (ossia dal mattino fino a sera inoltrata) e risulta stabile solo per poche ore della notte, ciò che è stato osservato per gli ambienti protetti da reti agricole è differente. Infatti, la presenza di una tale struttura favorisce un'atmosfera interna tendenzialmente stabile durante l'intero arco del giorno e questa condizione di stabilità è tanto più accentuata quanto più è piccolo il valore di porosità della rete (Tanny *et al.* 2009), quanto più è bassa

la velocità del vento (Tanny *et al.* 2003) e quanto più vicina al suolo viene collocata la rete (Tanny *et al.* 2008). Questo effetto stabilizzante dell'aria è essenzialmente il risultato combinato di due fenomeni principali: da una parte, poiché la rete assorbe una frazione della radiazione incidente, tale struttura riscalda l'aria ad essa circostante e, inoltre, diminuisce la quantità di radiazione solare che raggiunge il suolo (limitandone così la sua capacità di riscaldare l'aria che ne è a contatto (Tanny *et al.* 2009); dall'altra, la rete riduce la velocità del vento e inibisce la ventilazione dell'ecosistema interno favorendo la stratificazione dell'aria secondo un gradiente termico positivo (Tanny *et al.* 2003).

Poiché uno strato superficiale instabile tende a incrementare i tassi di scambio di energia e materia tra la vegetazione e l'atmosfera mentre uno strato superficiale stabile tende a ridurli, è verosimile ipotizzare che l'effetto della rete di indurre e mantenere gradienti termici verticali positivi possa contribuire ad una maggiore efficienza nell'utilizzo della risorsa idrica da parte delle colture protette (Tanny *et al.* 2013).

Infine, anche l'andamento delle concentrazioni medie di anidride carbonica dell'aria dell'ambiente interno risente della presenza di una rete disposta a protezione di una coltura agraria. In generale – ovvero sia in presenza che in assenza di rete – si osserva che le concentrazioni di CO<sub>2</sub> nei primi metri di atmosfera, al di sopra di una superficie coperta da una vegetazione rigogliosa, variano molto nell'arco della giornata. Questo avviene perché, proprio in base al periodo del giorno considerato, il sistema suolo-vegetazione può fungere sia da sorgente che da pozzo per la CO<sub>2</sub>: esso tende infatti ad arricchire di CO<sub>2</sub> l'atmosfera circostante durante le ore notturne (e cioè quando prevalgono i processi di respirazione), mentre tende ad impoverirla durante le ore di luce (ossia quando il tasso di assorbimento e fissazione della CO<sub>2</sub> associato alla fotosintesi è maggiore del suo tasso di rilascio in atmosfera derivante dai vari processi di respirazione).

Attraverso il loro modello teorico che stima gli effetti di una rete sugli scambi tra una piantagione estensiva di banane e l'atmosfera sovrastante, Siqueira *et al.* (2012) hanno dimostrato che la presenza di una rete si risolve nell'accentuare l'ampiezza delle variazioni giornaliere delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> dell'aria interna a tali ecosistemi parzialmente confinati rispetto ai medesimi normalmente esposti. Sempre nello stesso studio, gli autori riportano come i flussi di CO<sub>2</sub> vengano alterati indirettamente dalla presenza della rete: quest'ultima, infatti, modulando sia la radiazione che il trasferimento

di quantità di moto, influenza in modo molto complesso le dinamiche della CO<sub>2</sub>, modificando nello spazio e nel tempo l'intensità degli scambi di tale gas tra l'ecosistema interno e la sovrastante atmosfera. Un altro studio che ha misurato i flussi di CO<sub>2</sub> – questa volta sperimentalmente con la tecnica dell'eddy covariance – è quello condotto da Dicken *et al.* (2013) in una piantagione di banane protetta da una rete ombreggiante. In questa indagine gli autori hanno studiato gli effetti dello sviluppo delle piante (da piccole a grandi) sui flussi turbolenti in questo particolare ecosistema in evoluzione, suggerendo che la presenza di una rete e la sua proprietà di aumentare la radiazione diffusa possa incentivare il tasso fotosintetico delle foglie più basse e quindi più in ombra rispetto a quelle sovrastanti.

Poiché le colture agrarie perenni, se ben gestite, possono rappresentare un pozzo per la CO<sub>2</sub> atmosferica anche al netto del raccolto asportato (Pitacco *et al.*, 2007), studiarne i flussi che avvengono in tali ecosistemi agrari è molto importante nell'ottica della lotta ai cambiamenti climatici. Nel particolare, per quanto riguarda la presenza di una rete, poiché la concentrazione atmosferica di anidride carbonica – in quanto gas essenziale al processo fotosintetico – concorre a determinare il tasso di accrescimento degli organismi vegetali, è lecito pensare che il suo effetto di modificare nel tempo la disponibilità per le piante di tale gas possa avere dei risvolti significativi sulla produttività delle colture agrarie protette da tali strutture.

## L'Eddy Covariance e l'analisi della chiusura bilancio energetico

La tecnica micrometeorologica dell'eddy covariance viene utilizzata in tutto il mondo allo scopo di misurare gli scambi di quantità di moto, di calore e di materia che avvengono tra i più svariati ecosistemi e la sovrastante atmosfera. Sebbene il principio su cui essa si basa fu presentato nella sua forma definitiva intorno agli anni Cinquanta grazie al contributo di Montgomery (1948), Swinbank (1951) e Obukhov (1951), le forti limitazioni strumentali ostacolarono l'implementazione e la diffusione precoce di questa tecnica (Foken *et al.*, 2012). Nei decenni successivi, grazie ad una intensa attività di ricerca che favorì un rapido sviluppo tecnologico, il metodo dell'eddy covariance venne progressivamente affinato, sia sul piano teorico che operativo e strumentale, fino a rappresentare, ad oggi, la tecnica

che, per robustezza e per affidabilità, meglio si presta allo studio sul medio e lungo periodo dei flussi verticali di energia e materia che interessano lo strato limite superficiale (Baldocchi, 2003). Attualmente, sparse in tutto il mondo, esistono infatti parecchie centinaia di stazioni eddy che, operando in continuo da anni (alcune delle quali perfino da decenni), forniscono informazioni indispensabili allo studio dei cambiamenti climatici e alla comprensione delle risposte degli ecosistemi a questi – ma anche ad altri – fattori di disturbo (Baldocchi, 2014).

Come vale per tutte le tecniche micrometeorologiche finalizzate alla misura e all'interpretazione dei flussi tra biosfera e atmosfera, anche l'eddy covariance trova le sue basi teoriche sulle leggi generali di conservazione della massa e dell'energia (Baldocchi *et al.*, 1988). Partendo da queste ultime, grazie ad una serie di operazioni matematiche – tra cui la scomposizione di Reynolds (1895) – e grazie ad alcune approssimazioni giustificate dalla selezione di condizioni sperimentali e atmosferiche ideali, è possibile passare da una formulazione teorica e complessa dei flussi turbolenti a delle equazioni semplici, pratiche e direttamente applicabili alla quantificazione degli scambi verticali promossi dal regime turbolento dello strato limite superficiale.

Il metodo dell'eddy covariance richiede innanzitutto il campionamento simultaneo, prolungato e ad alta frequenza ( $\geq 10$  Hz) delle tre componenti del vettore vento e delle quantità di interesse (quali temperatura, umidità, concentrazione di CO<sub>2</sub>, ecc.). Le misure vengono effettuate nella libera atmosfera per mezzo di uno o più sistemi eddy covariance che, grazie all'elevata frequenza di campionamento, intercattano la quasi totalità delle strutture vorticosi che attraversano il punto di collocamento dei sensori e forniscono informazioni sulle proprietà dinamiche, fisiche e chimiche di ciascuna di esse. Per assolvere a tale compito complesso, un sistema eddy covariance completo si compone di un anemometro sonico triassiale, il quale misura la velocità del vento nelle tre dimensioni e la temperatura dell'aria, di un analizzatore di H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, che ne quantifica le concentrazioni atmosferiche a partire dall'assorbimento nell'infrarosso di queste specie chimiche, e di un datalogger, il quale gestisce l'acquisizione sincrona degli strumenti e memorizza i dati. Per quanto riguarda la configurazione spaziale degli strumenti, affinché abbia senso l'analisi dell'eddy covariance, l'anemometro e l'analizzatore devono essere posti a distanza ravvicinata, senza tuttavia disturbarsi l'un l'altro. Nel caso si voglia



quantificare il flusso di sostanze diverse dall'acqua e dall'anidride carbonica, è sufficiente installare, con i medesimi accorgimenti, un'analizzatore in grado di rilevare le concentrazioni atmosferiche di tale specie.

Una volta ottenuti i dati, per ciascun paramentro, si calcolano delle medie relative ad intervalli temporali che solitamente sono di 15-30 minuti, potendo così individuare lo scostamento (fluttuazione) di ogni valore istantaneo dalla sua parte media. Successivamente si effettua un'analisi statistica che prevede il calcolo della covarianza tra le fluttuazioni istantanee della velocità verticale del vento e le simultanee fluttuazioni dell'entità in esame. Infine, per conoscere la densità del flusso verticale della quantità di interesse occorre moltiplicare tale covarianza per il valore medio di densità dell'aria. Le equazioni che coinvolgono l'eddy covariance e consentono il calcolo diretto dei flussi turbolenti delle quantità più comunemente investigate sono le seguenti.

- Il flusso medio di quantità di moto  $\tau$  (espresso in  $N\ m^{-2}$ ) è dato dal prodotto tra la densità media dell'aria  $\overline{\rho_a}$  (in  $Kg\ m^{-3}$ ) e la covarianza tra le fluttuazioni della componente verticale del vettore vento  $w'$  con le fluttuazioni delle sue componenti orizzontali  $u'$  e  $v'$ , le quali sono espresse in  $m\ s^{-1}$ . Le barre orizzontali indicano la mediazione nell'intervallo di tempo considerato dei termini sottostanti. Il flusso di quantità di moto è sempre negativo, in quanto la superficie non può trasferire energia meccanica al vento.

$$\tau = -\overline{\rho_a} \sqrt{(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2}$$

- Il flusso di calore sensibile  $H$  (espresso in  $W\ m^{-2}$ ) è dato dal prodotto tra la densità media dell'aria  $\overline{\rho_a}$ , il calore specifico dell'aria secca a pressione costante  $c_p$  (in  $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ) e la covarianza tra le fluttuazioni della componente verticale del vento  $w'$  e le fluttuazioni di temperatura  $T'$  (in  $K$ ).

$$H = \overline{\rho_a} c_p \overline{w'T'}$$

- Il flusso di vapore acqueo, o il tasso di evapotraspirazione, (espresso in  $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) è dato dal prodotto tra la densità molare media dell'aria  $\overline{\rho_m}$  (in  $mol\ m^{-3}$ ) e la covarianza tra le fluttuazioni della componente verticale del vento  $w'$  e le fluttuazioni della concentrazione di vapore acqueo  $c'_{H_2O}$  (in frazione molare).

$$E_{H_2O} = \overline{\rho_m} \overline{w'c'_{H_2O}}$$

- Il flusso di anidride carbonica (espresso in  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) è dato dal prodotto tra la densità molare media dell'aria  $\overline{\rho_m}$  e la covarianza tra le fluttuazioni della velocità verticale del vento  $w'$  e le fluttuazioni della concentrazione di  $\text{CO}_2$   $c'_{\text{CO}_2}$  (in frazione molare).

$$F_{\text{CO}_2} = \overline{\rho_m} \overline{w'c'_{\text{CO}_2}}$$

- Il flusso di calore latente LE (espresso in  $\text{W m}^{-2}$ ) è dato dal prodotto tra il calore latente di vaporizzazione dell'acqua  $\lambda_{H_2O}$  (in  $\text{J mol}^{-1}$ ) e il flusso di vapore acqueo  $E_{H_2O}$  e (in frazione molare).

$$LE = \lambda_{H_2O} E_{H_2O}$$

Il successo dell'eddy covariance è giustificato dai plurimi vantaggi associati al suo impiego. Innanzitutto, come d'altronde vale per tutte le misurazioni micrometeorologiche, gli strumenti vengono collocati nella libera atmosfera al di sopra dell'ecosistema investigato, evitando dunque che le condizioni reali dell'ambiente risultino alterate dalla strumentazione stessa. Inoltre, essa permette un monitoraggio continuo degli scambi e, a seconda dello scopo, le misurazioni possono protrarsi anche per anni e perfino decenni, in modo automatizzato e pressappoco indipendente dalla presenza di un operatore. Infine, un altro aspetto molto interessante dal punto di vista ecologico è che i dati così raccolti forniscono informazioni sull'ecosistema nel suo insieme: infatti, i flussi calcolati integrano la variabilità e le complessità proprie degli ambienti reali e risolvono l'entità dei flussi di materia ed energia alla scala spaziale di ecosistema e alla scala temporale di interesse.

D'altra parte, però, la buona applicazione di questa tecnica ha delle esigenze particolari, sia rispetto alle caratteristiche che deve avere l'ambiente da investigare che per quanto concerne le attrezzature e le conoscenze tecnico-operative necessarie. Idealmente, per poter trascurare il trasporto orizzontale, il luogo su cui si effettuano le misure deve essere piano, omogeneo e parecchio esteso; lo strato limite deve trovarsi in una condizione di stazionarietà (ossia le sue caratteristiche dinamiche, fisiche e chimiche medie non devono variare con eccessiva repentinità); la turbolenza dev'essere ben sviluppata, tanto che al di sotto di un certo valore della sua intensità è opportuno scartare i dati (ciò si verifica comunemente durante le ore notturne, quando, con l'aumento della stabilità

atmosferica, diminuisce notevolmente l'intensità della turbolenza). Gli strumenti impiegati sono molto sofisticati e costosi e il loro corretto utilizzo richiede competenze tecniche specifiche; infine, anche il processo di elaborazione ed analisi dei dati demanda abilità informatiche, statistiche e scientifiche per nulla scontate.

Per valutare la qualità e la correttezza dei flussi verticali stimati attraverso la tecnica dell'eddy covariance esistono diversi approcci indipendenti (Monson & Baldocchi, 2014). Tra questi, un metodo comunemente utilizzato è quello dell'analisi della chiusura del bilancio energetico. Quest'ultimo, essendo una formulazione della prima legge della termodinamica, richiede che la somma dei flussi di calore (latente (LE) e sensibile (H)) sia uguale al flusso di energia effettivamente disponibile alla superficie (il quale è dato dal flusso netto di radiazione in entrata ( $R_n$ ) corretto per il flusso di calore nel suolo (G)). Quindi, idealmente, il bilancio energetico della superficie dovrebbe obbedire alla seguente equazione:

$$LE + H = R_n - G$$

A partire da questa formula e sostituendo i rispettivi termini (e cioè, i flussi di calore ottenuti dall'eddy covariance, la radiazione disponibile misurata da un radiometro netto e il flusso di calore nel suolo quantificato da un'apposito sensore) è possibile calcolare, nell'arco di tempo considerato, il rapporto tra l'energia consumata e quella disponibile, che, nel caso ideale, dovrebbe essere pari ad 1. Nella realtà, tuttavia, ciò accade difficilmente in quanto le somme dei flussi di calore stimati attraverso l'eddy covariance non eguagliano i rispettivi flussi netti di energia disponibile. Solitamente, infatti, la pendenza della retta di regressione tra questi rapporti varia da 0.55 a 0.99 con una media di 0.79 (Wilson *et al.*, 2002). Per la sua rilevanza nella validazione delle misure micrometeorologiche e per le sue implicazioni sull'interpretazione dei flussi stimati, la non chiusura del bilancio energetico è stata ampiamente discussa in letteratura e, tra le numerose possibili cause di tale criticità, sembrerebbe che l'eddy covariance tenda a sottostimare i flussi reali di calore sensibile e latente (Wilson *et al.*, 2002). Ad ogni modo, potendo confrontare i propri risultati con numerosi altri casi di studio presenti in letteratura, l'analisi della chiusura del bilancio energetico rappresenta la metodologia più comunemente utilizzata al fine di valutare la qualità delle stime dei flussi turbolenti verticali misurati con la tecnica dell'eddy covariance. Infatti, nonostante questo test di

verifica sia applicabile in modo diretto solamente ai flussi di calore latente e sensibile, indirettamente, esso è indicativo anche della qualità degli altri flussi stimati, poichè le modalità del trasporto turbolento del calore e della materia sono le medesime.

In anni recenti, numerose indagini sperimentali hanno utilizzato la tecnica dell'eddy covariance in ecosistemi colturali protetti da reti agricole, quantificando i flussi turbolenti di calore latente e sensibile e caratterizzando le proprietà della turbolenza dello strato limite superficiale di tali ambienti parzialmente protetti. Sebbene la presenza di una rete posta al di sopra di una coltura tenda a ridurre l'intensità della turbolenza dell'aria ad essa interna e limitrofa, questi studi hanno dimostrato l'applicabilità dell'eddy covariance per la misura diretta dei flussi di energia e materia, sia negli impianti provvisti di reti antinsetto (per es. Möller *et al.*, 2004) che in quelli muniti di reti ombreggianti (per es. Tanny *et al.*, 2006, 2010, 2018; Dicken *et al.*, 2013; Pirkner *et al.*, 2014). Come dimostrato da Tanny *et al.* (2018), mentre al di sotto della rete sussistono condizioni solo parzialmente idonee all'applicazione dell'eddy covariance, al di sopra di essa (ammesso che si rimanga all'interno dello strato limite) questa tecnica può essere applicata correttamente.

Anche relativamente alle analisi della chiusura del bilancio energetico, presentate da molti degli studi sopracitati, sono state ottenute rette di regressione le cui pendenze sono in linea con quelle riportate per gli ecosistemi normalmente esposti. Per esempio, l'analisi di chiusura del bilancio energetico presentata da Tanny *et al.* (2006) ha prodotto una retta avente pendenza di 0.94 e intercetta di  $2.4 \text{ W m}^{-2}$ . Sempre rimanendo sul tema del bilancio energetico, mentre Dicken *et al.* (2013) hanno constatato come si ottenga una migliore chiusura dello stesso con l'aumento delle dimensioni della vegetazione (suggerendo l'importanza dell'uniformità delle chiome al fine di stimare correttamente i flussi turbolenti per mezzo dell'eddy covariance), le osservazioni di Tanny *et al.* (2018) sono differenti. Quest'ultimo studio ha infatti evidenziato come il deficit di chiusura del bilancio energetico sia aumentato con l'accrescimento delle piante a causa dell'effetto stabilizzante delle chiome sull'aria interna: gli autori hanno interpretato ciò come conseguenza della diminuzione, con la crescita delle piante, del rapporto di Bowen (ossia il rapporto tra il flusso di calore sensibile e quello latente), in quanto il flusso di calore

latente ha una capacità minore di destabilizzazione dell'aria rispetto al flusso di calore sensibile.

## Clima e agricoltura

Il clima è definito come l'insieme delle condizioni meteorologiche – mediate su un periodo di almeno 30 anni – che si verificano in una certa area geografica nel corso dell'anno (World Meteorological Organization). Le principali variabili meteorologiche che vengono misurate al fine di definire il clima di un'ampia area sono la temperatura e la piovosità; tuttavia, soprattutto per aree più contenute, l'intensità e la durata della radiazione solare, così come la ventosità, la nuvolosità, l'umidità e la pressione atmosferica sono tutti fattori molto importanti alla caratterizzazione del suo clima.

Esistono forti relazioni di dipendenza tra il tipo di clima e il tipo di vegetazione che insistono in una data regione (Woodward, 1987). Questa evidenza ha indotto molti scienziati a proporre, durante il secolo scorso, una suddivisione della biosfera terrestre in grandi aree fitoclimatiche dette biomi (per esempio Köppen in De Philippis, 1937).

Allo stesso modo, anche in ambito agronomico il clima rappresenta una variabile estremamente importante e decisiva nel determinare la propensione all'attività agricola di una certa regione: esso infatti definisce, per esempio, quale sia il regime termico e pluviometrico a cui le specie vegetali coltivate sono esposte e, di conseguenza, ne influenza la loro diffusione, distribuzione e produttività.

D'altra parte, anche le piante giocano un ruolo molto importante nel determinare le peculiarità ambientali e climatiche locali: la copertura vegetale, di fatto, modifica i flussi di energia e di materia tra la superficie e l'atmosfera, alterando sia le caratteristiche fisiche della superficie (come l'albedo e la scabrezza), che i processi biogeofisici (come, per esempio, il ciclo idrologico), che la composizione gassosa dell'atmosfera (Brovkin, 2002).

Per queste ragioni, qualora si vogliano investigare le complesse interazioni tra la coltura e l'atmosfera, è dunque fondamentale conoscere sia il clima della regione che le caratteristiche adattative, fisiologiche e morfologiche della vegetazione in esame.

## Il contesto climatico della Basilicata

In Basilicata, così come in tutto il sud Italia, le precipitazioni non sono distribuite uniformemente durante l'anno, ma si concentrano nei mesi autunno-invernali. Le estati sono invece tendenzialmente calde e secche; tuttavia, in condizioni di instabilità, si possono verificare fenomeni temporaleschi anche in questa stagione. Inoltre, l'Appennino Lucano a picco sul Mar Tirreno ad ovest, un'ampia area collinare ad est e una vasta pianura lungo tutta la costa ionica rendono la Basilicata una regione molto ricca ed eterogenea dal punto di vista geografico: è proprio l'elevata diversificazione del territorio a far sì che questa regione sia inevitabilmente tutt'altro che omogenea anche dal punto di vista meteorologico. Pertanto, la Basilicata può essere scomposta in tre principali aree climatiche: tirrenica, dell'entroterra e jonica.

La fascia tirrenica è montagnosa con vette che superano i 2.000 m di altitudine. Grazie alla prossimità dell'Appennino alla costa tirrenica e grazie alla particolare conformazione del Golfo di Policastro – il quale convoglia i venti umidi in arrivo dal Mar Tirreno – si creano le condizioni ideali tali per cui quest'area è tra le più piovose dell'intera penisola italiana, superando facilmente, in molte località, i 2.000 mm di precipitazione cumulata annuale (dati ISPRA). A mano a mano che ci si sposta verso l'entroterra le precipitazioni diminuiscono, rimanendo tuttavia consistenti. Gli inverni sono molto rigidi e le temperature più basse si registrano nelle aree interne, dove le precipitazioni nevose sono frequenti ed abbondanti durante tutto l'inverno. Le estati sono invece moderatamente calde, con notti tipicamente fresche. Inoltre, le gelate – sia tardive che precoci – e la forte presenza di nebbia sono fenomeni ricorrenti e distintivi di quest'area.

La fascia dell'entroterra coincide con la porzione nord-orientale e collinare della Basilicata. Quest'area è anch'essa eterogenea dal punto di vista della distribuzione delle precipitazioni, le quali variano da circa 1.000 mm nella fascia più prossima all'Appennino a circa 600 mm nelle aree al confine con la Puglia (dati ISPRA). Ciò è dovuto alla presenza della catena appenninica, la quale funge da schermo alle correnti atmosferiche ricche di umidità provenienti dal Mar Tirreno. Gli inverni sono freddi e si hanno spesso precipitazioni nevose anche consistenti; mentre le estati sono generalmente calde e secche, presentando forti escursioni termiche tra il giorno e la notte.

La fascia Jonica include la Piana di Metaponto e le colline ad essa limitrofe. Quest'area è la più calda e la meno piovosa di tutta la Basilicata. Le precipitazioni annuali medie variano infatti da 600 a 400 mm (dati ISPRA). Gli inverni sono miti ed umidi e le precipitazioni nevose rappresentano eventi molto rari. Le estati sono invece calde e secche con picchi di temperatura che superano i 40° C, ma tendenzialmente ventilate.

#### Caratteristiche meteoclimatiche dell'estate Metapontina

Uno studio condotto dalla Sezione di Metaponto del C.R.A.-Istituto Sperimentale Agronomico di Bari ha elaborato i dati raccolti tra il 1981 ed il 2006 da una stazione agrometeorologica situata a Metaponto e realizzata secondo le indicazioni della World Meteorological Organization (Doorenbos, 1976). Da tale studio – unitamente alla consultazione dei rapporti climatici ISPRA – emerge che luglio è il mese dell'anno in cui si registrano i valori medi giornalieri più alti di eliofania (circa 10 h/d), di radiazione netta (circa 15 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e, insieme al mese di agosto, di temperatura (la temperatura media giornaliera è circa 25°C, la minima media è 18.5°C e la massima media è 31.5°C). Per quanto riguarda le precipitazioni nei mesi di giugno, luglio ed agosto i rispettivi valori cumulati medi mensili non superano i 30 mm. Anche l'umidità relativa dell'aria è minima durante il mese di luglio, con un valore medio pari a circa il 57%. Il vento invece presenta una velocità e delle direzionalità medie piuttosto costanti durante tutto l'anno nella località di Metaponto: i valori medi mensili di velocità sono compresi tra i 2 e i 3 m/s e la maggior parte di essi provengono dal IV quadrante, mentre la restante parte provengono dal Mar Ionio (sud-est).

Considerando che il vento è pressappoco costante durante tutto l'anno, mentre la radiazione netta e la temperatura sono massime, unitamente al fatto che l'umidità relativa è minima, anche l'evapotraspirazione potenziale sarà massima proprio durante il mese di luglio. Ciò implica che i quantitativi di acqua necessari al mantenimento delle colture agrarie in buone condizioni di disponibilità idrica sono massimi durante questo periodo, così come sono massimi i quantitativi di acqua effettivamente evapotraspirata (questo vale solamente se il campo è costantemente e abbondantemente irrigato,

altrimenti si parla di deficit idrico, il quale è dato dalla differenza tra l'evapotraspirazione potenziale e la quantità di apporti idrici naturali e/o artificiali nel periodo considerato).

## L'agricoltura nel Metapontino

La Piana di Metaponto (o Metapontino) è la pianura più vasta della Basilicata e occupa una superficie di circa 800 km<sup>2</sup>, estendendosi lungo tutta la costa ionica di questa regione e sconfinando in piccola parte in Puglia e in Calabria. Essa è una pianura di tipo alluvionale, formata grazie alla deposizione dei sedimenti trasportati dai fiumi Bradano, Basento, Cavone, Agri e Sinni che sfociano nel Mar Ionio. Poiché il territorio della Basilicata è prevalentemente montuoso e collinare e solo una piccola percentuale (inferiore al 10%) è pianeggiante, la Piana di Metaponto costituisce un'area molto importante per il settore agricolo di questa regione italiana. Qui, grazie alla grande disponibilità di acqua proveniente dall'Appennino e alla facile lavorabilità dei suoli piani, si è andata sviluppando un'agricoltura di tipo intensivo e sempre più industrializzato di colture orticole, di agrumi e di molte altre specie arboree da frutto, tra cui *A. deliciosa*, la quale ha visto negli ultimi decenni una grande espansione.

### *A. deliciosa* e sua coltivazione

*A. deliciosa* ((A. Chev.) C. F. Liang et A. R. Ferguson var. *deliciosa*) è una pianta legnosa dioica da frutto (kiwi), arrampicante e molto vigorosa. L'apparato radicale di questa specie è poco profondo, mentre il fusto si dirama in tralci anche molto lunghi, i quali ospitano grandi foglie cuoriformi e abbastanza rigide (Figura 2).

*A. deliciosa* è originaria delle foreste umide centro-meridionali della Cina (Ferguson, 1984), caratterizzate da una bassa variabilità stagionale e da frequenti precipitazioni. Le condizioni ambientali ottimali per la sua crescita riflettono inevitabilmente quelle proprie dell'area di cui è originaria. Tali condizioni ambientali sono un'elevata umidità del terreno, basso deficit atmosferico di pressione di vapore, frequenti ed abbondanti piogge, una lunga stagione di crescita e bassa ventosità (Gucci *et al.*, 1996, Ferguson, 1984).



Solo a partire dai primi decenni del secolo scorso la coltivazione di questa specie al di fuori della sua area d'origine ha iniziato ad avere una certa rilevanza commerciale (A. R. Ferguson, 1984). Inizialmente in Nuova Zelanda e successivamente in Italia (ma anche in altri paesi) la coltivazione di *A. deliciosa* si è fortemente espansa, rappresentando ad oggi una coltura di notevole interesse economico. L'Italia, dopo la Cina e la Nuova Zelanda, è il terzo paese per produzione ed esportazione del kiwi, contribuendo per circa il 12% della produzione mondiale totale (elaborazione dati UN FAO per l'anno 2019).



Figura 2. Illustrazione botanica di *A. deliciosa* ((A. Chev.) C. F. Liang et A. R. Ferguson var. *deliciosa*). Immagine scaricata da internet e realizzata da Teeshea Gray.

Tuttavia, a differenza della maggior parte delle colture agrarie, la pianta del kiwi – proprio per il fatto che ha avuto interesse e rilevanza per il settore frutticolo solo a partire da anni molto recenti – non ha avuto il tempo di subire un forte miglioramento genetico e adattativo da parte dell’uomo. È quindi una specie ancora poco addomesticata che, se coltivata in aree dove le condizioni ambientali differiscono molto da quelle caratterizzanti il suo areale d’origine, necessita di numerosi ed onerosi input per garantirne una buona produttività. In particolare, per la sua coltivazione nelle regioni temperate, l’irrigazione frequente ed abbondante è indispensabile, poiché periodi anche brevi di siccità possono ridurre gravemente la qualità dei frutti (Judd *et al.*, 1989). Inoltre, come per molte altre colture poco adattate a climi aridi e ventosi, le tecniche agricole quali la forma di allevamento a tendone, l’installazione di reti protettive e un’adeguata strategia irrigua, favoriscono l’instaurarsi di un microclima idoneo alla pianta del kiwi, garantendo così una buona produzione anche in aree dove le condizioni ambientali naturali non sarebbero del tutto favorevoli. D’altra parte, la coltivazione di una specie in un’area meteorologica diversa da quella d’origine può avere anche i suoi vantaggi: sfavorire, per esempio, la presenza e l’attacco di patogeni che si sono co-evoluti alla specie stessa (ma che non sono presenti oppure non sopravvivono nella nuova regione), potendo così ridurre o addirittura eliminare l’impiego di prodotti fitosanitari altrimenti indispensabili.

Con queste premesse è evidente che la coltivazione di *A. deliciosa* nel sud-Italia non è priva di difficoltà, soprattutto per il fatto che la curva della domanda idrica del kiwi durante la sua stagione di crescita è perfettamente opposta alla distribuzione temporale delle precipitazioni e sono quindi necessari importanti sforzi sia economici che ecologici per adattare l’ambiente alle esigenze di questa coltura.

Pertanto, monitorare, interpretare e prevedere in modo analitico le complesse interazioni tra le colture agrarie e l’ambiente in cui queste si inseriscono è di fondamentale importanza al fine di intraprendere delle scelte che massimizzino l’uso razionale ed efficiente delle risorse.

## Obbiettivi dello studio

Questo studio, condotto durante la seconda metà del mese di luglio 2021 in un impianto di kiwi situato nella Piana di Metaponto, esamina gli effetti della presenza di una rete antigrandine sul microclima interno al frutteto attraverso l'analisi delle interazioni tra questo ecosistema e l'atmosfera circostante. In particolare, gli obiettivi principali sono i seguenti:

- quantificare l'entità, nonché le variazioni nell'arco del giorno, dei flussi di energia e di materia che avvengono in questo particolare e sofisticato ecosistema agrario;
- comprendere, attraverso misurazioni effettuate simultaneamente a tre distinti livelli, quali sono le implicazioni della peculiare conformazione multistrato dell'impianto sul profilo verticale delle principali variabili micrometeorologiche esaminate;
- valutare, attraverso l'analisi della chiusura del bilancio energetico, l'affidabilità e l'applicabilità della tecnica dell'eddy covariance per la misura dei flussi di calore e di materia per l'ecosistema agrario influenzato dalla presenza della rete;

Sulla base delle informazioni e dei risultati ottenuti da studi precedenti, si ipotizza che la presenza della rete, oltre a proteggere il raccolto da fenomeni atmosferici violenti, favorisca anche l'instaurarsi di condizioni microclimatiche generalmente più favorevoli alla coltivazione di *A. deliciosa*, specialmente in regioni caratterizzate da un clima simile a quello tipico del sud Italia. Infatti, ci si aspetta che la diminuzione del carico radiativo incidente e la diminuzione della ventilazione interna al frutteto riducano la domanda idrica della coltura, aumentando di conseguenza l'efficienza nell'utilizzo di questa risorsa.

Ipotizzando poi che l'input principale di carbonio inorganico disponibile per la fotosintesi provenga principalmente dai processi di respirazione del suolo e delle piante stesse e, solo in parte minoritaria dall'atmosfera esterna al frutteto, ci si attende che, durante buona parte del giorno, la concentrazione di CO<sub>2</sub> dell'aria interna al frutteto sia maggiore rispetto a quella dell'aria esterna ad esso; per cui, una ridotta ventilazione non dovrebbe compromettere il tasso fotosintetico delle piante, ma altresì incrementarlo.

D'altra parte, un possibile effetto negativo della rete potrebbe essere legato all'aumento eccessivo della temperatura dell'ambiente interno al frutteto durante le ore più calde del

giorno e in condizioni di bassa ventosità (e quindi di basso ricambio dell'aria). Tuttavia, considerando l'elevata porosità della rete antigrandine, tale effetto non dovrebbe raggiungere livelli critici.

## Materiali e metodi

### Area di studio

Il presente studio sperimentale è stato realizzato in un frutteto di *A. deliciosa* coperto da rete e situato nel comune lucano di Bernalda (provincia di Matera, Italia del sud). Inserito in un paesaggio caratterizzato da un'intensa attività agricola, l'actinidieto si colloca nella fertile Piana di Metaponto, tra il fiume Bradano e il fiume Basento, a circa 7.5 km dalla costa del Mar Ionio e ad un'altitudine di circa 45 m s.l.m. Il frutteto è suddiviso in quattro impianti rettangolari adiacenti che si sviluppano longitudinalmente con un'orientazione SE-NO. Ciascun impianto ha un'estensione di circa 1.4 ettari ed è circondato da passaggi che ne facilitano l'accesso alle macchine agricole (Figura 3).

L'intera campagna di raccolta dati si è svolta dal 15 al 30 luglio 2021, comprendendo sia l'installazione che lo smontaggio del traliccio e degli strumenti da esso supportati. Inoltre, alcuni giorni iniziali di maltempo – caratterizzati da precipitazioni intermittenti di diversa intensità e durata – hanno compromesso la qualità e l'affidabilità dei dati fino al giorno 19 luglio. Per queste ed altre ragioni (legate a piccole difficoltà tecniche, oltre che meteorologiche) si è scelto di analizzare nel dettaglio solamente gli ultimi giorni di misurazione, ossia dal 27 al 29 luglio compresi. Pertanto, i risultati presentati nel prossimo capitolo – ottenuti a seguito dell'elaborazione dei dati grezzi – riguardano questo intervallo temporale.



Figura 3. Immagine aerea del frutteto di *A. deliciosa* (rettangolo giallo). Il frutteto è diviso in quattro impianti adiacenti aventi un'estensione di circa 1.5 ha. Le misurazioni micrometeorologiche sono state condotte al centro dell'impianto contraddistinto dal rettangolo rosso. Come si evince dalla figura 3, il frutteto è inserito in un paesaggio fortemente dominato dall'attività agricola. Immagine scaricata da Google Earth e successivamente rielaborata.

## Selezione del sito e struttura dell'actinidieto

Come già detto e come rappresentato in Figura 3, il frutteto è diviso in quattro impianti adiacenti, ciascuno avente una superficie di circa 1.4 ha. Per studiare al meglio le interazioni e gli scambi di energia e di materia tra il frutteto e l'atmosfera, è stato scelto di installare il traliccio e condurre le misurazioni nella zona centrale del terzo impianto (riquadro rosso nella Figura 3). Le ragioni che hanno portato a questa scelta sono la regolarità del campo (infatti gli altri campi si presentano più irregolari, soprattutto per via della loro pendenza, che, seppur lieve, avrebbe potuto compromettere la qualità dei dati)

e la sua centralità (aspetto ancora più importante in quanto permette di ridurre al minimo tutti quei disturbi dovuti a ciò che esiste e avviene al di fuori del frutteto).

Il campo scelto è perfettamente rettangolare (lungo 150 m e largo 90 m) e ospita 20 file: ciascuna fila è formata da 75 piante di *A. deliciosa* collocate ad una distanza di 2 m l'una dall'altra (per un totale di 1500 piante), mentre la larghezza dell'interfila misura 4.60 m. La forma di allevamento è a tendone, così che le chiome, impalcate a circa 2 m da terra, creano uno strato piano e di spessore costante su tutta la superficie del campo (salvo alcune discontinuità dovute a piante giovani o assenti). Poiché il frutteto si trova all'apice della sua rigogliosità sia in termini di età delle piante che in termini di stagione di crescita, lo spessore delle chiome è di circa 60 cm (vale a dire che la foglia media inferiore si trova a 1.70 m da terra e la foglia superiore media si trova a 2.30 m da terra) (Figura 4).

Ai fini di questo studio, la peculiarità più interessante è la presenza di una rete antigrandine che ricopre tutta la superficie dell'impianto. Tale rete è in polietilene incolore e trasparente, ha una trama di 5x3 mm e non si presenta del tutto piana, bensì forma valli e colmi poco accentuati: è posta ad un'altezza di 4.30 m in corrispondenza delle file (dove è sostenuta da pali in cemento armato facenti parte dell'impalcatura dell'impianto), mentre si trova ad una quota di 4.00 m nel mezzo dell'interfila (dove la distanza dai sostegni è massima) (Figura 5).

L'actinidieto in cui si è svolta questa campagna di studio è dotato di un efficiente e tecnologico impianto di irrigazione ibrido che può funzionare a goccia (per mezzo di 3 ale gocciolanti per fila), a pioggia (sotto-chioma per mezzo di microjets collocati lungo la fila) o combinando i due sistemi. Specialmente durante i mesi estivi, per ridurre al minimo lo stress idrico delle piante e massimizzare la resa, le irrigazioni vengono applicate due volte al giorno e sono molto abbondanti ( $\approx 60 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{d}^{-1}$ ). Infatti, *A. deliciosa* è una pianta che, per le sue caratteristiche fisiologiche e adattative, non tollera carenze idriche significative e prolungate (Ferguson, 1984). Il suolo su cui insiste il campo è costituito prevalentemente da argille e limo, risultando estremamente duro quando il contenuto di acqua è basso. Esso presenta tuttavia importanti discontinuità zonali dovute all'aggiunta artificiale di abbondante sostanza organica in corrispondenza delle file e zone dove una maggiore frazione di sabbia ne modifica le proprietà. L'interfila è mantenuta inerbita con sfalci meccanici poco frequenti, mentre la fila viene diserbata manualmente. Durante il

periodo in cui si è svolto lo studio, l'altezza media dell'erba è stata stimata pari a 40 cm e non è mai stata sfalcata.



Figura 4. Immagine dell'ambiente sotto-chioma del frutteto. La distanza tra una fila e l'altra è di 4.60 m, mentre, lungo la fila, le piante si trovano a 2 m le une dalle altre. Le chiome formano uno strato più o meno omogeneo il cui centro si colloca a circa 2 m da terra. Come ben rappresentato, il suolo risulta fortemente inerbito.



Figura 5. Immagine dell'ambiente delimitato in basso dalle chiome e in alto della rete antigrandine. La rete è sostenuta da pali di cemento collocati lungo le file e si trova ad un'altezza di circa 4 m. Anche da questa prospettiva si può apprezzare la rigogliosità e l'omogeneità delle chiome delle piante di kiwi.



## Installazione del traliccio e della strumentazione

La torre in alluminio adibita a sostenere la strumentazione ha un'altezza di 6 metri ed è composta da due segmenti di traliccio WGM L-40 da 3 m ciascuno (Letrona AG, Friltschen, CH). Questa è stata collocata nel mezzo di un'interfila al centro del campo, in un punto dove lo spessore delle chiome fosse rappresentativo ma allo stesso tempo permettesse l'attraversamento del traliccio senza danneggiare le piante. Prima di poterlo issare è stato necessario aprire temporaneamente un varco nella rete (che, fortunatamente, presenta le giunture proprio nel mezzo di ciascuna interfila). Per assicurarne la verticalità e la stabilità – dovendo sostenere gli strumenti e, soprattutto, un operatore per l'installazione, la manutenzione e lo smontaggio di questi ultimi – il traliccio è dotato di una base che ne evita lo sprofondamento nel terreno e di 3 tiranti ancorati al suolo per mezzo di altrettanti picchetti in acciaio zincato da 60 cm.

Al fine di studiare l'influenza della struttura a tendone dell'actinidiato e della presenza della rete sul microclima colturale e sugli scambi di energia e materia tra quest'ultimo e l'atmosfera, le misure dei flussi di radiazione, di anidride carbonica, di vapore d'acqua (e quindi anche di calore latente), di calore sensibile e di quantità di moto sono state effettuate contemporaneamente a tre differenti livelli (Figura 6):

- il **livello 1** si colloca tra il suolo e le chiome, idealmente a metà tra la quota superiore dal manto erboso e la quota inferiore delle chiome (vale a dire ad un'altezza di 1.05 m). Per ragioni pratiche, l'altezza scelta e definitiva è 1.10 m da terra.
- il **livello 2** si colloca tra le chiome e la rete, idealmente a metà tra la quota superiore delle chiome e la quota della valle della rete (vale a dire ad un'altezza di 3.15 m). Anche in questo caso per ragioni pratiche, l'altezza scelta e definitiva è 3.05 m da terra.
- il **livello 3** si colloca tra il sistema frutteto e l'atmosfera esterna, ad una distanza dalla rete pari a quattro volte la scabrosità della stessa (la scabrosità è data dallo scarto di 30 cm tra la quota dei colmi e quella delle valli della rete stessa). L'altezza scelta e definitiva è 5.20 m da terra.

Oltre alle misurazioni effettuate nell'atmosfera, è stato monitorato anche il flusso di calore nel suolo ed il contenuto idrico del suolo, così da avere un quadro più completo del bilancio energetico e del bilancio idrico dell'ecosistema colturale investigato.

Poiché non è stato possibile allacciarsi alla rete elettrica, l'intera campagna ha fatto affidamento sull'energia garantita da batterie al piombo (12 V, 100 Ah), le quali sono state quotidianamente sostituite e ricaricate.

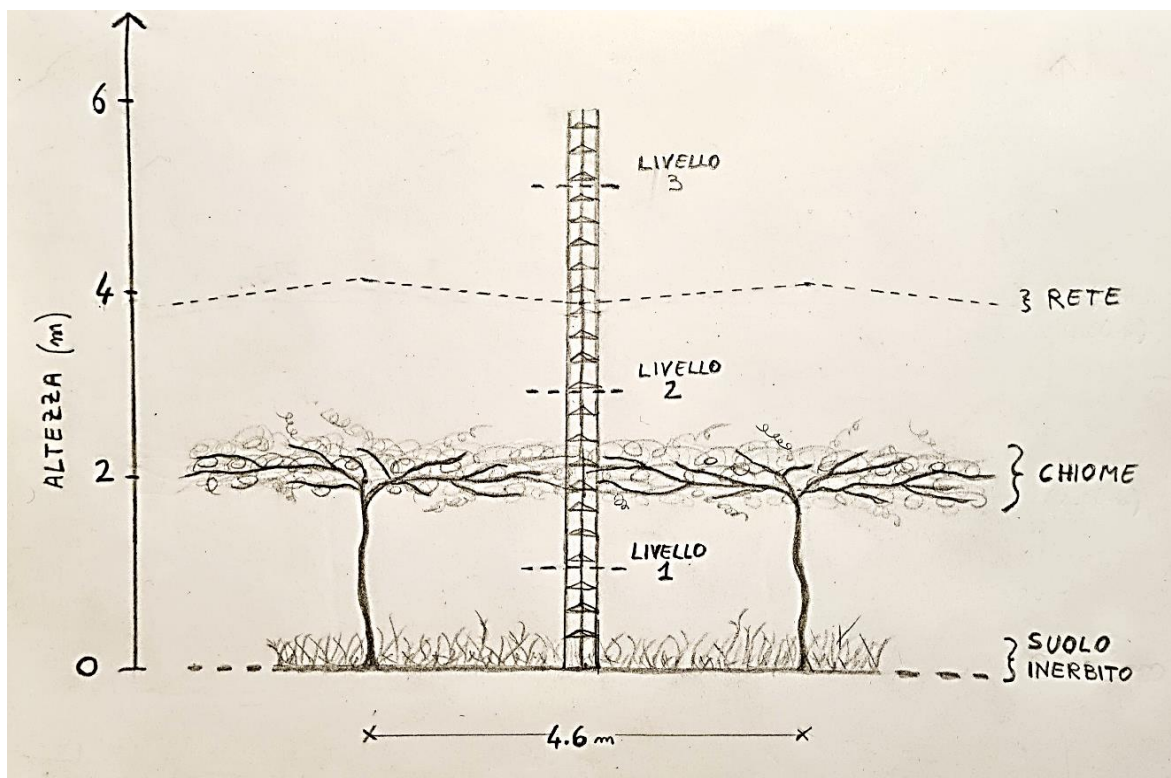


Figura 6. Rappresentazione schematica della struttura dell'impianto di *A. deliciosa* e dei tre livelli in cui sono state effettuate le misurazioni dei flussi verticali di energia e di materia. La copertura erbosa del suolo ha un'altezza di circa 40 cm, le chiome sono impalcate a 2 m da terra e la rete si trova ad una quota di 4 m. Sul traliccio, per ciascun livello, è stato installato un radiometro netto, un anemometro sonico triassiale, un IRGA ed un termoigrometro. Il livello 1 si trova a 1.10 m da terra, il livello 2 a 3.05 m e il livello 3 a 5.20 m.

### Misura della radiazione

Per analizzare il bilancio radiativo della radiazione solare (ad onda corta) e della radiazione infrarossa (ad onda lunga), a ciascun livello è stato installato un radiometro netto (Figura 7): il modello CNR1 sul livello 1 e sul livello 2 e il modello più recente CNR4

sul livello 3 (Kipp & Zonen, Delft, NL). Questi radiometri sono progettati in modo tale che la radiazione solare e la radiazione lontano-infrarossa vengano misurate separatamente. La radiazione solare viene misurata da due piranometri, uno rivolto verso l'alto per la misurazione della radiazione solare in arrivo dal cielo e l'altro, rivolto verso il basso, per la misurazione della radiazione solare riflessa. La radiazione infrarossa viene invece misurata da due pirgeometri, uno, rivolto verso l'alto, per misurare la radiazione infrarossa emessa dal cielo, l'altro, rivolto verso il basso, per misurare la radiazione infrarossa emessa dalla superficie del suolo e da tutto ciò che lo copre.

Per evitare l'ombreggiamento dovuto al traliccio i radiometri netti sono stati orientati verso sud. Questi ultimi sono stati collegati ad un datalogger CR6 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) che il Professor Andrea Pitacco (DAFNAE, Università di Padova) ha programmato in modo tale da sincronizzare l'acquisizione delle misure ai tre livelli con una frequenza di campionamento pari a 1 Hz. I dati sono stati raccolti e memorizzati dallo stesso datalogger e periodicamente scaricati.

### Misura dei flussi di energia e materia lungo il profilo verticale del frutteto

Per analizzare i flussi verticali di calore, di quantità di moto, di acqua e di anidride carbonica ai tre differenti livelli è stata utilizzata la tecnica dell'Eddy covariance che, dal punto di vista della configurazione spaziale degli strumenti, consiste nell'affiancare, alla stessa quota e a poca distanza laterale, un anemometro sonico, un analizzatore di gas a raggi infrarossi non dispersivo (IRGA) ed un termoigrometro (Figura 7). Pertanto, alla quota individuata per ciascun livello, è stato installato un anemometro sonico triassiale CSAT3 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) per misurare la velocità del vento nelle sue tre direzioni, un IRGA LI-7500 con percorso aperto (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA) per misurare le concentrazioni gassose di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O ed un termoigrometro HMP155A (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) per misurare la temperatura dell'aria e per correggere le successive elaborazioni dei dati integrandole con le informazioni contestuali di temperatura e umidità relativa dell'aria.

Gli anemometri sonici sono stati orientati in modo tale da garantire l'intercettazione indisturbata dei venti prevalenti della zona, cioè prima che questi siano intercettati – e

quindi alterati – dal traliccio e dalla restante strumentazione. Per cui, in seguito all'analisi della direzionalità ed intensità dei venti ivi presenti nelle giornate del mese di luglio dei due anni precedenti (2019 e 2020), gli anemometri sonici sono stati orientati a 240°. La maggior parte dei venti proviene, infatti, dal IV quadrante (precisamente tra 240° e 360°), mentre la restante parte proviene da S-SE (tra 135° e 270°).

Alla stessa quota di campionamento dell'anemometro, ma ad una distanza di 23 cm da quest'ultimo (evitando così possibili interferenze sulle caratteristiche fisiche del vento), è stato collocato l'IRGA.

Inoltre, per ciascun livello, sempre ad una quota simili e con gli stessi accorgimenti, è stato installato un termoigrometro.

La configurazione strumentale dei tre livelli è stata collegata ad un datalogger CR300 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) che il Professor A. Pitacco ha programmato in modo tale da sincronizzare l'acquisizione delle misure. La frequenza di campionamento è stata impostata a 10 Hz, i dati sono stati raccolti e memorizzati dallo stesso datalogger periodicamente scaricati.

Oltre alla quantificazione dei flussi di energia e materia, le misurazioni effettuate simultaneamente ai tre distinti livelli hanno anche permesso di caratterizzare i rispettivi profili verticali delle principali variabili micrometeorologiche esaminate (quali velocità del vento, temperatura, umidità, concentrazione di CO<sub>2</sub>, ecc.); nonché come essi siano influenzati dalla peculiare conformazione multistrato dell'impianto e come varino durante il giorno.

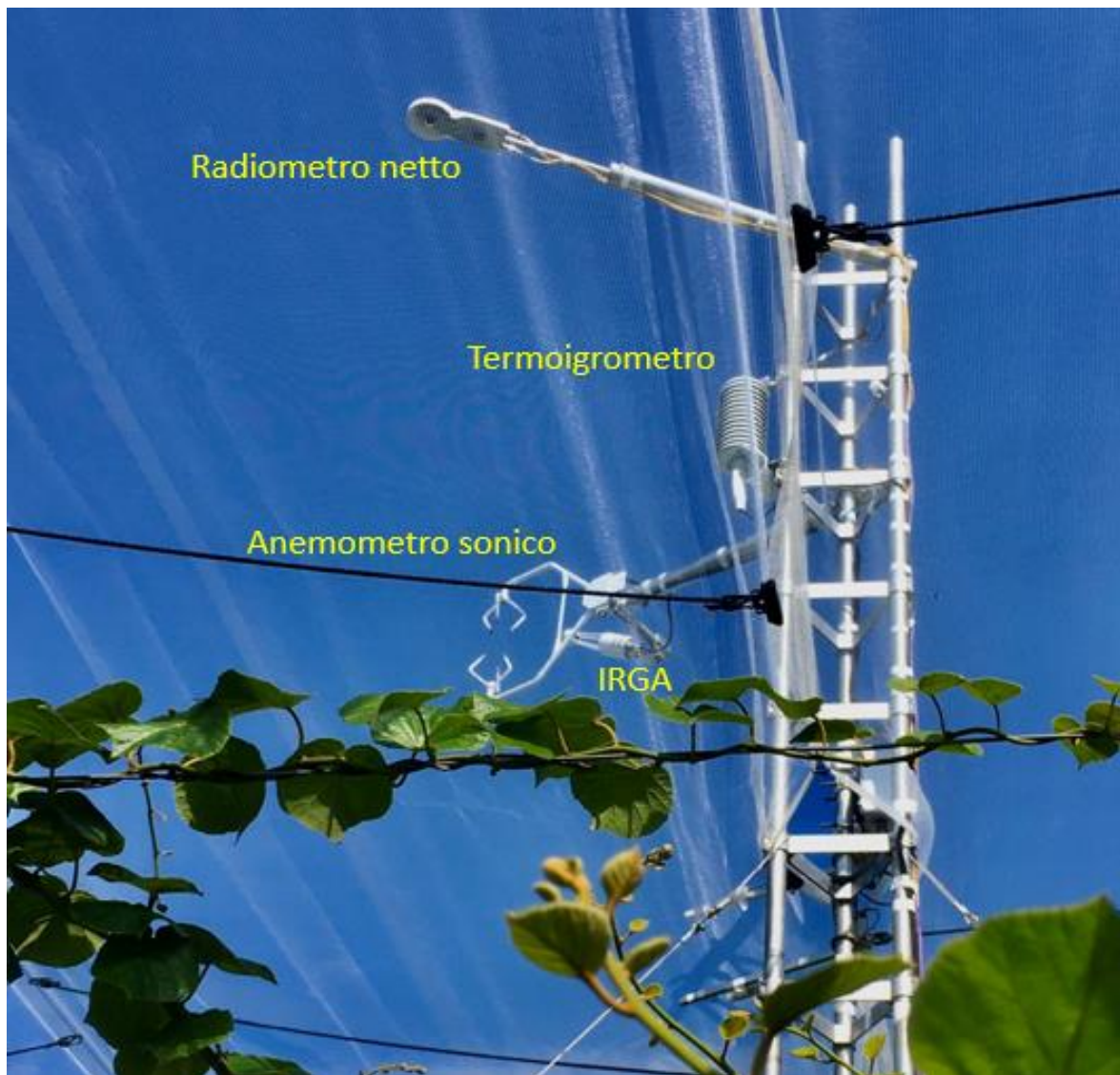


Figura 7. Immagine esemplificativa della configurazione degli strumenti installati per ciascun livello (qui è rappresentato il livello 3). Il radiometro netto è orientato verso sud, mentre l'anemometro sonico e l'IRGA ad esso adiacente sono orientati a 240° (SO-O). Il termoigrometro si trova in posizione centrale ed è inserito in una struttura passivamente areata ma altamente riflettente, in modo tale che il sensore non si riscaldi per assorbimento di radiazione solare diretta (non sovrastimando così la temperatura dell'aria).

### Misura del flusso di calore nel suolo e del suo contenuto idrico

Il flusso di calore nel suolo è stato misurato con due piastre di flusso di calore HFP01 (Hukseflux, Delft, NL) inserite orizzontalmente nel terreno a 5 cm di profondità. Le due piastre sono state collocate a 1.25 m l'una dall'altra ed in prossimità del traliccio.

Per monitorare il contenuto idrico del suolo sono state utilizzate due sonde TDR CS650 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA). Una è stata installata a 48 cm dal centro della fila (dove il contenuto d'acqua è maggiore a causa delle frequenti irrigazioni proprio in corrispondenza della fila), mentre l'altra è stata installata a 97 cm dal centro della fila (dove il contenuto idrico è minore). Gli strumenti sono stati collegati ad un datalogger che ha gestito l'acquisizione dei dati con una frequenza di campionamento adeguata.

## Analisi dei dati

Per tutte le variabili micrometeorologiche investigate in continuum, i dati grezzi sono stati suddivisi per intervalli temporali di 30 minuti e, successivamente, i valori ricadenti in ciascuna mezzora sono stati elaborati separatamente, attraverso analisi specifiche e mirate al raggiungimento degli obiettivi.

Separatamente per ciascun livello, i flussi delle quattro componenti della radiazione (rilevati ad 1 Hz dai tre radiometri netti collocati alle tre altezze) sono stati mediati separatamente e relativamente ad intervalli temporali di 30 minuti: per ogni giorno e per ogni componente della radiazione, si sono dunque ottenuti 48 valori di flusso medi. Sempre per ciascun livello, dalla somma delle differenze tra i rispettivi flussi medi discendenti e ascendenti, ad onda corta e ad onda lunga, si sono estrapolati i valori di flusso netto di radiazione. A partire dai flussi medi di radiazione, si sono calcolati anche i valori di trasmittanza, sia per la rete che per la canopy, per ogni mezzora dei periodi diurni. I valori di trasmittanza della rete sono stati ottenuti dividendo il flusso medio di radiazione solare incidente al livello 2 con quello incidente riscontrato al livello 3; in modo analogo, solo scendendo di un livello, si sono calcolate le trasmittanze della canopy. Oltre alle trasmittanze, si sono anche calcolati i valori di albedo relativi alla rete, alle chiome, al suolo e al sistema frutteto nel suo insieme. Al flusso di radiazione solare ascendente del livello 3 è stato sottratto il valore del medesimo flusso misurato al livello 2 (previa moltiplicazione di quest'ultimo per la trasmittanza della rete) tale differenza è stata dunque divisa per il flusso di radiazione solare incidente del livello 3, ottenendo così l'albedo della rete. L'analogo ragionamento è stato fatto per estrapolare l'albedo delle chiome; mentre più semplice risulta il calcolo di quello del suolo e di quello complessivo del sistema frutteto, in quanto essi sono rispettivamente dati dal solo rapporto tra la

componente solare riflessa e quella incidente misurate al di sopra del suolo e al di sopra della rete. Un'ulteriore elaborazione che ha coinvolto i flussi di radiazione (in questo caso i flussi ad onda lunga) è stata quella relativa al calcolo delle temperature apparenti delle superfici inferiori e superiori dei diversi elementi costituenti il sistema frutteto: infatti, invertendo la legge di Stefan-Boltzmann – la quale stabilisce che l'emittanza di un corpo nero è uguale al prodotto tra  $\sigma$  (costante di Stefan-Boltzmann equivalente a  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) e la sua temperatura superficiale assoluta elevata alla quarta potenza – è possibile ricavare la temperatura apparente del corpo a partire dall'energia che esso irradia. Infine, integrando per il tempo i flussi di radiazione netta, sono stati ricavati anche i valori di energia netta disponibile giornalmente a ciascun livello.

Dalle misure di temperatura dell'aria e del suo contenuto idrico, sempre mediando i valori istantanei per intervalli di 30 minuti, sono stati calcolati i valori medi (relativi ad ogni mezzora) della temperatura dell'aria e della sua umidità relativa ai tre differenti livelli. Conoscendo contemporaneamente queste due variabili è stato possibile calcolare i rispettivi valori di pressione di vapor d'acqua a saturazione, i valori di pressione di vapor d'acqua reali e, infine, dalla differenza dei due, si è calcolato il VDP dell'aria (ossia il deficit di pressione di vapore acqueo dell'aria).

Per quanto riguarda il calcolo dei flussi di calore sensibile, di calore latente e di  $\text{CO}_2$  si è applicato il metodo statistico dell'eddy covariance utilizzando il software open source Li-Cor EddyPro®. Grazie a questo software, i dati grezzi sono stati corretti ed elaborati seguendo le procedure e le metodologie standard proprie di questa tecnica, ottenendo così i flussi medi di interesse, calcolati su intervalli temporali di 30 minuti per ciascun livello investigato. Al di là dei flussi di energia e di materia sopracitati, questa elaborazione ha prodotto valori medi di velocità del vento, oltre che numerosi altri parametri statistici e di controllo qualità. In seguito, ad entrambi i livelli superiori, dividendo ciascun valore medio di flusso di calore sensibile con il contestuale flusso di calore latente, si sono calcolati gli indici di ripartizione tra i due flussi (ossia la Bowen Ratio). Infine, come metodo indipendente di valutazione della qualità dei flussi stimati attraverso la tecnica dell'eddy covariance, si è effettuata l'analisi della chiusura del bilancio energetico. Poiché un bilancio energetico ideale si ha quando l'energia effettivamente disponibile alla superficie (la quale coincide con la radiazione netta

aggiustata per il calore immagazzinato o rilasciato dal suolo) è eguagliata dall'energia che tale superficie trasferisce come calore sensibile e latente verso l'atmosfera, la relazione tra i flussi medi osservati di energia disponibile e quelli di energia consumata dovrebbe produrre una retta avente pendenza pari ad 1 e intercetta nulla. Nella realtà ciò accade raramente e quanto più la retta risultante dall'analisi della chiusura del bilancio energetico si discosta da tale idealità, tanto meno i flussi sono stati stimati correttamente.



## Risultati

La Figura 8 mostra l'andamento delle diverse componenti della radiazione nelle tre giornate analizzate ed ai tre distinti livelli a cui sono state effettuate le misure. Come si evince dall'andamento e dall'intensità del flusso di radiazione solare incidente ( $R_{s\_up3}$ , Figura 8a), le giornate estive presentate sono state serene e regolari. L'alba ed il tramonto coincidono rispettivamente con le ore 5:30 e le ore 19:00. All'interno di questo intervallo, il flusso di radiazione solare incidente aumenta fino a raggiungere un picco in corrispondenza delle ore 12:30 – che, esternamente alla rete, sfiora i  $900 \text{ Wm}^{-2}$  – per poi diminuire progressivamente con l'avanzare della giornata. Anche gli altri flussi di radiazione – in quanto promossi e mantenuti dall'energia proveniente dal sole – mostrano un andamento giornaliero simile, pur attestandosi su densità di flusso differenti. Dal confronto tra la Figura 8a e la Figura 8b si osserva che la rete modifica, seppure leggermente, l'intensità dei flussi di radiazione e, inoltre, la sua presenza comporta un'alterazione maggiore dell'entità dei flussi di radiazione ad onda corta rispetto a quelli ad onda lunga: infatti, mentre i primi risultano ridotti di circa il 10%, i secondi sono pressoché inalterati. Un effetto molto più significativo è invece dovuto alla presenza delle chiome, le quali, costituendo un corpo molto opaco, sono difficilmente attraversabili dalla radiazione. Durante il giorno, infatti, al di sotto delle chiome arriva pochissima radiazione solare (circa  $50 \text{ Wm}^{-2}$  nel picco di mezzogiorno contro gli oltre  $800 \text{ Wm}^{-2}$  incidenti al di sopra delle chiome). Per contro, al livello 1, l'intensità dei flussi di radiazione termica ascendente e discendente sono costantemente maggiori di quelli misurati agli altri livelli e inoltre risultano molto simili tra loro (e cioè  $R_{l\_up1} \approx R_{l\_down1}$ ). Ai tre distinti livelli viene riportata anche la radiazione netta (linea tratteggiata), la quale diminuisce scendendo di livello.

Molte delle cose già dette per la Figura 8 sono riscontrabili anche nella Figura 9. Quest'ultima presenta separatamente i flussi di radiazione ad onda corta e ad onda lunga, discendenti e ascendenti, misurati ai diversi livelli. Per ciascuna componente della radiazione si può quindi apprezzare come essa venga modificata dalla presenza della rete e delle chiome, attuando un confronto con i contemporanei valori del medesimo flusso radiativo misurato al di sopra del sistema frutteto. Mentre le curve di radiazione ad onda

corta hanno un andamento molto regolare nel tempo a tutti e tre i livelli, quanto avviene per quelle ad onda lunga è differente. Si può infatti vedere come queste ultime abbiano un andamento più discontinuo nel tempo e, inoltre, le differenze registrate tra i diversi livelli – oltre che meno regolari – si invertono spesso perfino di segno. Quanto appena detto vale soprattutto per il confronto tra il livello 2 e 3: infatti, al livello inferiore (livello 1) gli andamenti dei flussi di radiazione infrarossa discendente e ascendente sono più regolari nel corso delle tre giornate e tendono ad eguagliarsi in intensità. D'altra parte, rispetto ai livelli 2 e 3, si nota come vi sia una piccola differenza tra i rispettivi flussi ad onda lunga discendenti Figura 9c mentre leggermente più marcate (ma comunque poco accentuate) sono le differenze tra quelli ascendenti Figura 9d specialmente durante le ore notturne. Inoltre, ad eccezione di quanto avviene al livello 1, merita sottolineare che nell'intero arco delle tre giornate analizzate i flussi di radiazione termica diretti verso l'atmosfera sono sempre stati maggiori di quelli diretti verso la superficie terrestre. Dalla figura 9d emerge che durante la notte il flusso misurato tra chiome e rete è inferiore al suo corrispettivo misurato fuori rete. Infine, rispetto alla Figura 9c, la grande differenza riscontrata tra il livello 2 e 3 durante le ore di buio del primo giorno (e fino alle ore 8:00 dello stesso) è dovuta alla presenza di rugiada sulla faccia superiore del radiometro del livello 2 e ciò è suffragato dalle altre informazioni micrometeorologiche raccolte durante la campagna sperimentale in oggetto.

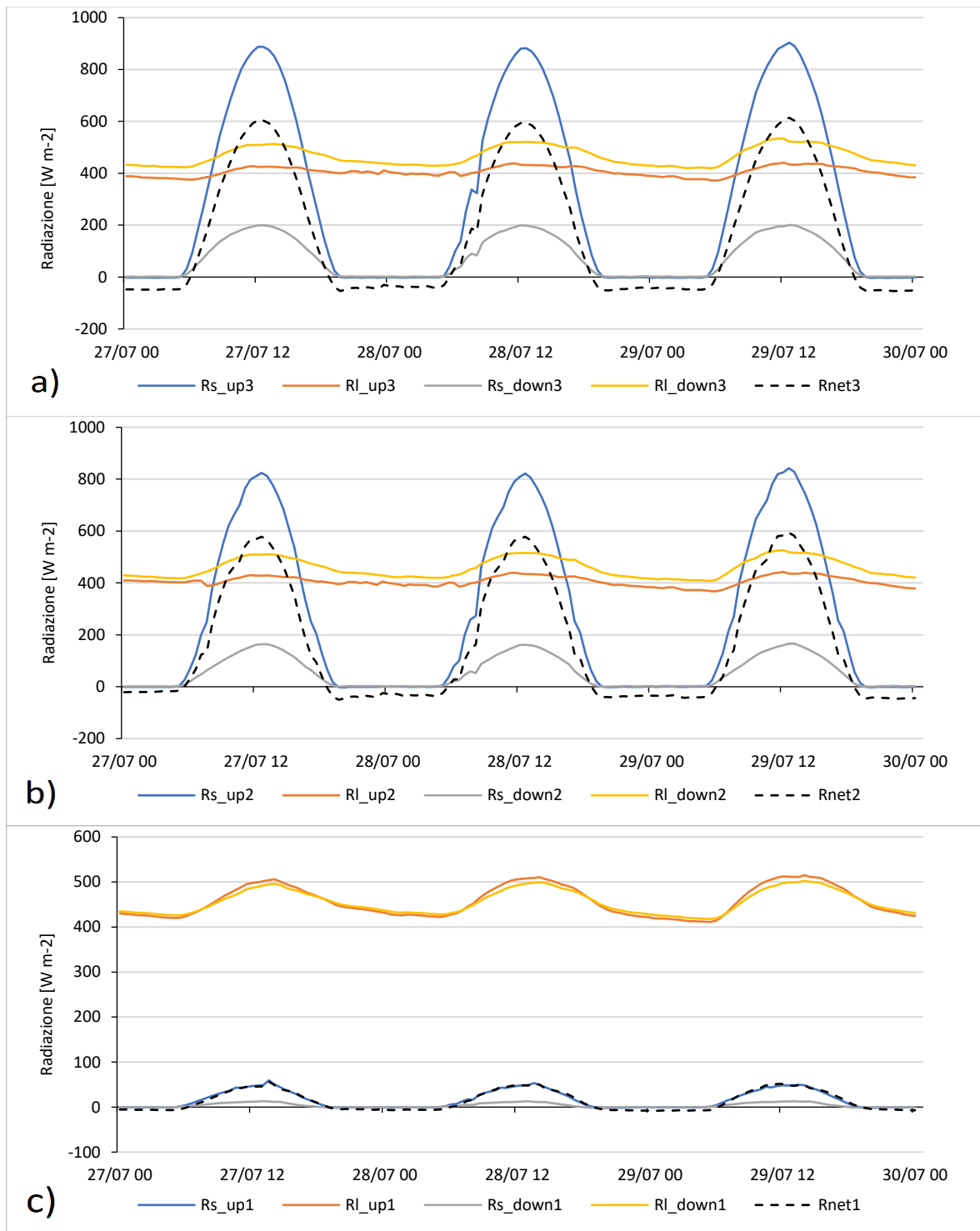


Figura 8. Andamenti dei flussi delle quattro componenti del bilancio radiativo (linee continue) e del flusso di radiazione netta (linea tratteggiata) ottenuti ai tre distinti livelli: (a) riguarda quanto osservato all'esterno della rete (livello 3); (b) si riferisce all'ambiente delimitato dalla rete e dalle chiome (livello 2); mentre (c) quello proprio del livello 1, quest'ultimo situato tra suolo e chiome.  $R_s$ ,  $R_I$  e  $R_{net}$  indicano rispettivamente i flussi di radiazione ad onda corta, ad onda lunga e di radiazione netta; la dicitura up indica un flusso discendente mentre down uno ascendente; infine, il numero 1, 2, 3 distingue i rispettivi livelli (altezze) a cui sono state effettuate le misurazioni.

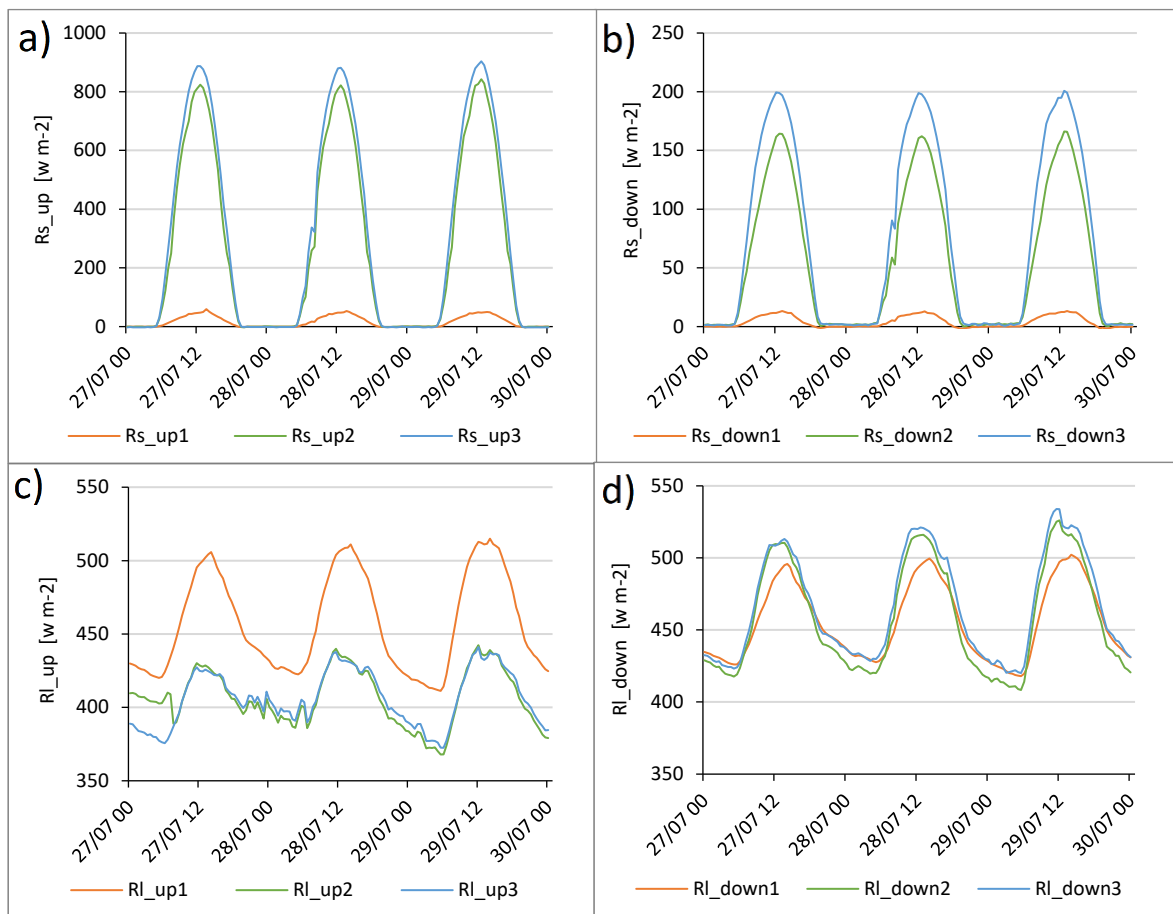


Figura 9. Confronto di ciascuna componente del bilancio radiativo misurata ai tre livelli: (a) flussi di radiazione solare incidente; (b) flussi di radiazione solare riflessa; (c) flussi di radiazione termica discendenti e (d) flussi di radiazione termica ascendenti.

A partire dalle misure dei flussi di radiazione ad onda corta effettuate ai tre differenti livelli è stato possibile calcolare sia i rispettivi valori di trasmittanza della rete e delle chiome (Figura 10) che i valori di albedo della rete, delle chiome, del suolo e del sistema frutteto nel suo insieme (Figura 11). La trasmittanza della rete è stata ottenuta dal rapporto tra la radiazione solare incidente misurata al livello 2 e quella incidente al livello 3; in modo analogo, solo scendendo di un livello, si è calcolata la trasmittanza della canopy. Leggermente più complesso è invece il calcolo dell'albedo dei diversi elementi sopracitati: al flusso di radiazione solare ascendente del livello 3 è stato sottratto il valore del medesimo flusso misurato al livello 2 previa moltiplicazione di quest'ultimo per la trasmittanza della rete, tale differenza è stata dunque divisa per il flusso di radiazione solare incidente del livello 3, ottenendo così l'albedo della rete. L'analogo ragionamento è

stato fatto per estrapolare anche l'albedo delle chiome; mentre più semplice risulta il calcolo dell'albedo del suolo e quello complessivo del sistema frutteto, in quanto essi sono rispettivamente dati dal solo rapporto tra la componente riflessa e quella incidente misurate al di sopra del suolo e al di sopra della rete.

La Figura 10 mostra come la trasmittanza della rete sia molto elevata, avendo un valore medio pari a circa 0.9. Tale struttura ha quindi una bassa capacità di assorbimento e di riflessione della radiazione solare. Inoltre, si osserva come i suoi valori di trasmittanza varino durante il corso del dì: infatti, la trasmittanza misurata al mattino (o alla sera) è apprezzabilmente inferiore rispetto a quella registrata a mezzogiorno. Pertanto, la trasmittanza della rete non è costante nel tempo, in quanto varia in funzione dell'angolo di elevazione del sole: quanto più il sole è perpendicolare alla rete tanto più elevata è la trasmittanza di quest'ultima. Per contro, la trasmittanza della canopy è molto bassa (inferiore 0.06) e anche la sua variabilità associata alla diversa inclinazione del sole è minore rispetto a quanto visto per la rete. Esse – costituendo un corpo molto opaco, più o meno uniforme e compatto – lasciano passare solo una piccola frazione della radiazione solare incidente.

Per quanto riguarda i rispettivi valori di albedo della rete, delle chiome, del suolo e dell'ecosistema frutteto nel suo complesso si fa riferimento alla Figura 11. Si nota subito come i vari elementi abbiano valori di albedo che, seppure differenti tra loro, seguono un andamento giornaliero regolare (ad eccezione del suolo) e inverso rispetto a quanto visto per le trasmittanze. L'albedo delle diverse superfici è infatti più elevato all'alba e al tramonto che durante le ore centrali della giornata. A causa della bassa solidità della rete (ovvero della sua elevata porosità ottica), essa riscontra i valori di albedo più bassi, i quali oscillano tra lo 0.15 (misurati al mattino e alla sera) e lo 0.05 a mezzogiorno. Le chiome mostrano valori di albedo più elevati, con una media pari a circa 0.2. Il sistema frutteto – considerato come l'insieme degli elementi – possiede un'albedo ancora maggiore che si attesta ad un valore medio vicino allo 0.25. Infine, l'albedo calcolato per il suolo evidenzia un andamento decisamente ambiguo in quanto decresce dal mattino a sera. Ciò è probabilmente dovuto alla discontinuità delle chiome, implicando elevate variazioni dei flussi di radiazione solare misurati al livello 1 in funzione della posizione del sole nel corso della giornata.

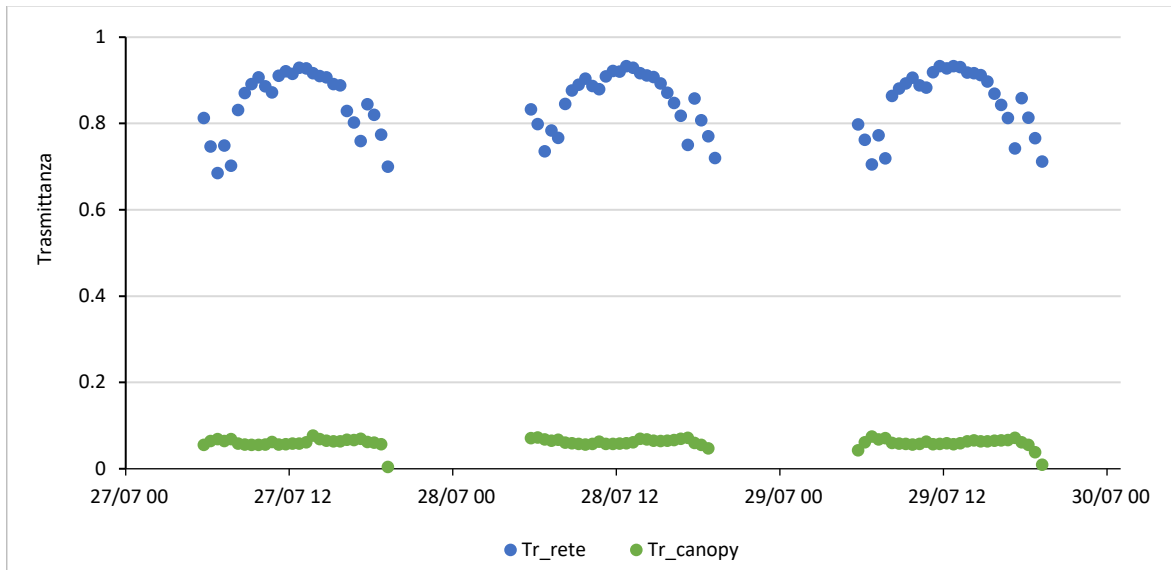


Figura 10. Valori di trasmittanza della rete (Tr\_rete) e della canopy (Tr\_canopy) rappresentati in funzione del tempo.

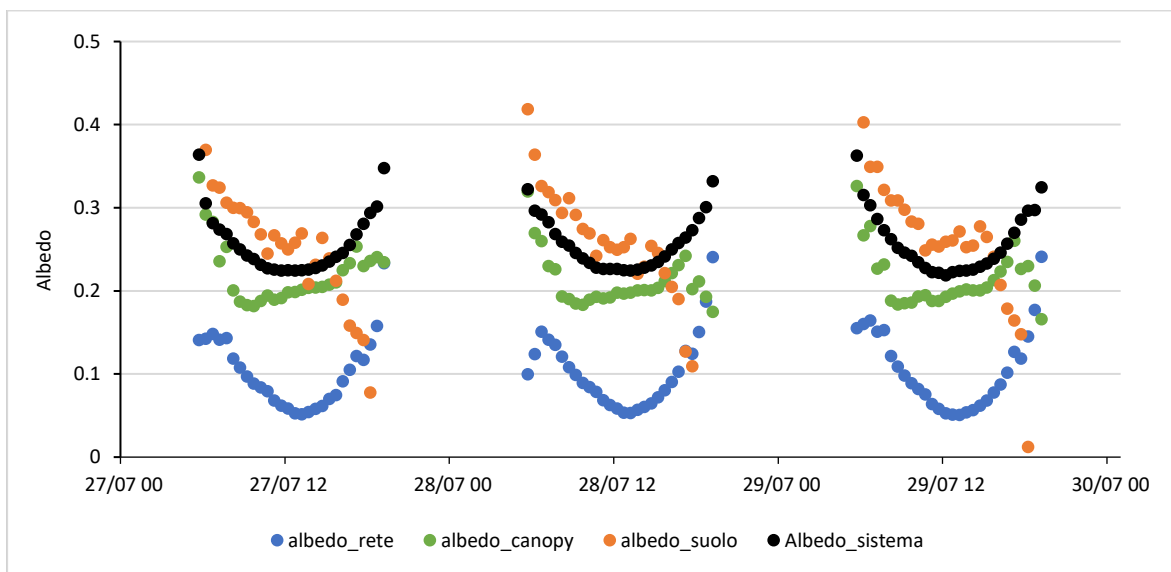


Figura 11. Rappresentazione, in funzione del tempo, dei rispettivi valori di albedo calcolati per la rete (albedo\_rete), per la canopy (albedo\_canopy), per il suolo (albedo\_suolo) e per l'ecosistema nel suo insieme (Albedo\_sistema).

La velocità del vento varia molto tra un livello e l'altro, specialmente durante le ore diurne, e i picchi massimi si hanno nel pomeriggio (tra le ore 14:00 e 16:00) per tutte le giornate analizzate (Figura 12). Le velocità più elevate sono state registrate al livello 3, ossia al di sopra della rete; qui, i valori – mediati sulle mezzore – si sono avvicinati ai  $2.5 \text{ ms}^{-1}$  per il primo ed ultimo giorno, mentre c'è stato il superamento di tale valore per il

picco della giornata centrale. Rimanendo sempre all'esterno della rete, le velocità medie più basse si riscontrano generalmente alla mattina (intorno alle ore 10:00) e al tramonto (ore 19:00 circa), momenti in cui avveniva un cambio della direzione media del vento in tutti e tre i giorni: si è visto infatti che il vento aveva direzione NO-SE durante il dì (tra le ore 10:00 e le ore 19:00), mentre aveva direzione opposta (ossia SE-NO) durante il resto del giorno e della notte. A differenza della radiazione, in quanto influenzato da moltissimi fattori, il vento è per propria natura irregolare e poco prevedibile. Per queste ragioni, l'effetto della presenza della rete e delle chiome sull'andamento e sui valori di velocità del vento è di più difficile caratterizzazione. Ciononostante, la Figura 12 mostra come vi siano delle differenze rilevanti tra le rispettive velocità del vento misurate ai diversi livelli. Va notato che, mentre al livello 1 la velocità del vento – seppure molto altalenante – si mantiene sempre molto bassa (sempre inferiore ai  $0.4 \text{ ms}^{-1}$ ) indipendentemente da quella misurata all'esterno della rete, al livello 2 il vento segue un andamento in linea con quello registrato esternamente. Pur assistendo ad una notevolmente diminuzione della velocità del vento (i picchi registrati al livello 2 difficilmente superano il valore di  $1 \text{ ms}^{-1}$  e qui la velocità del vento è spesso simile a quella riportata per il livello 1), quanto appena detto evidenzia che il volume d'aria compreso tra la rete e le chiome è fortemente accoppiato alle caratteristiche dinamiche esistenti al di sopra della rete, mentre ciò non è altrettanto vero per l'aria che si trova al livello 1.

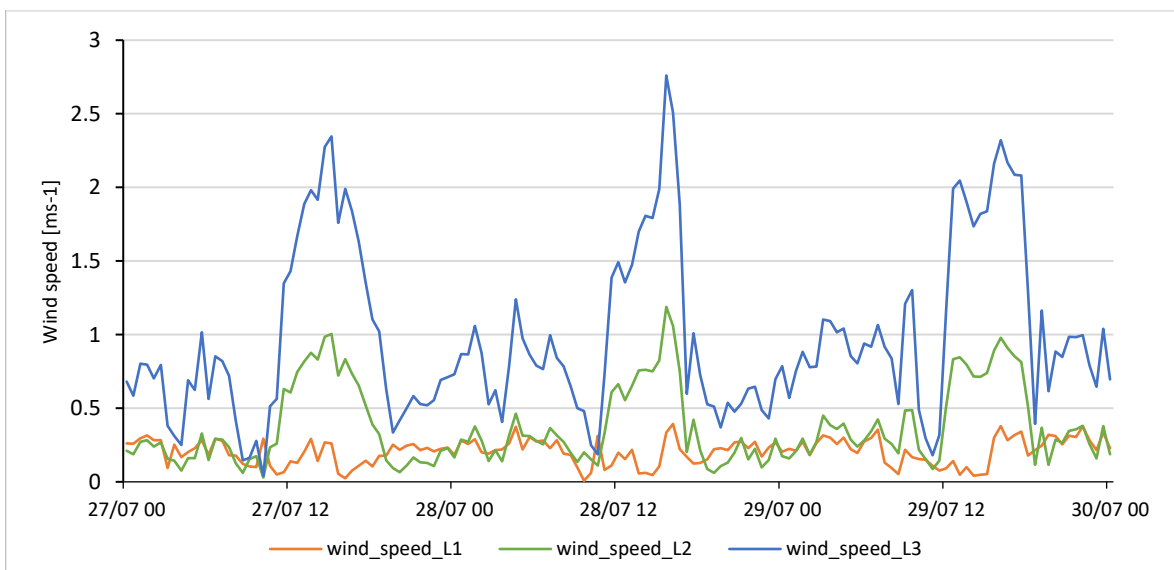


Figura 12. Confronto tra gli andamenti delle velocità orizzontali medie del vento misurate ai tre differenti livelli (L1, L2 e L3) nelle tre giornate in oggetto.

Per meglio visualizzare la continuità o la discontinuità (ossia l'accoppiamento o il disaccoppiamento) tra le caratteristiche dinamiche dell'aria ai tre differenti livelli si sono voluti riportare anche gli andamenti delle varianze – mediate su intervalli temporali di 30 minuti – relative alla componente verticale della velocità del vento (Figura 13). Anche qui si può apprezzare come ai due livelli superiori vi sia armonia tra i due andamenti dei rispettivi valori di varianza; mentre per il livello 1 tale parametro del vento è poco in sintonia – se non spesso per nulla – con quanto osservato ai livelli superiori. In definitiva, le chiome rappresentano una barriera importante anche per quanto riguarda la continuità delle caratteristiche dinamiche della bassa atmosfera. Lo stesso vale per la rete, anche se il suo effetto sul vento è molto minore di quello dovuto alla presenza delle chiome.

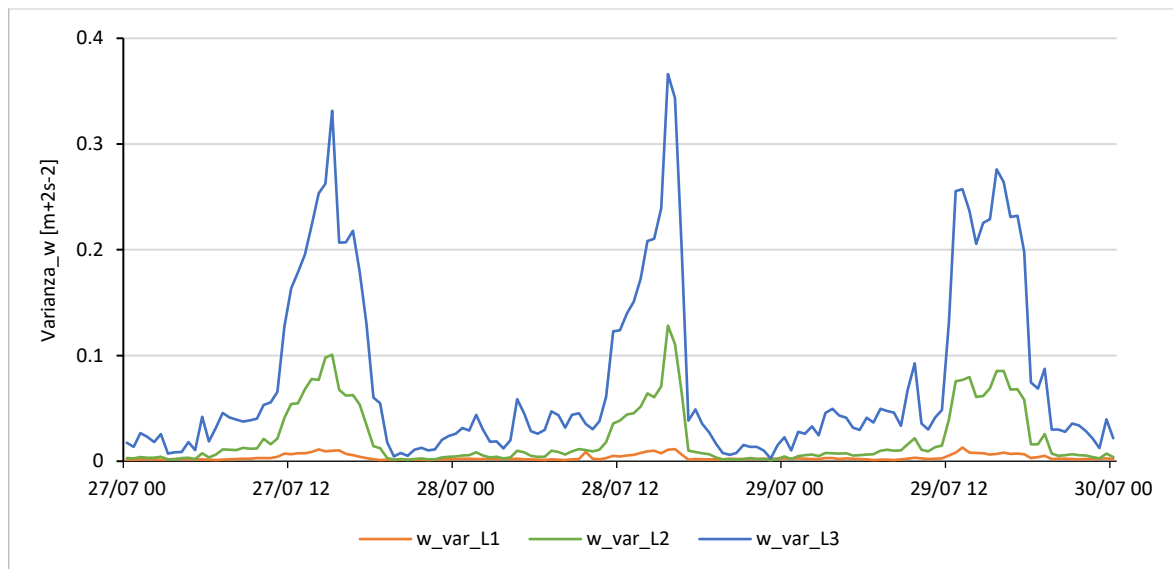


Figura 13. Confronto tra gli andamenti, riscontrati per le tre giornate, delle varianze medie della velocità verticale del vento ( $w\_var$ ) calcolate ai tre differenti livelli.

Partendo dai flussi di radiazione ad onda lunga e operando un'inversione della legge di Stefan-Boltzmann – la quale stabilisce che l'emittanza di un corpo nero è uguale al prodotto tra  $\sigma$  (ovvero la costante di Stefan-Boltzmann, corrispondente a  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) e la sua temperatura superficiale assoluta elevata alla quarta potenza – sono state ricavate le temperature apparenti degli elementi costituenti il sistema frutteto, oltre che dell'atmosfera. Le temperature apparenti così calcolate delle superfici inferiori e superiori dei suddetti elementi vengono riportate in Figura 14. Poiché le temperature apparenti



sono proporzionali all'energia irraggiata dai corpi, non c'è da stupirsi che gli andamenti riportati in figura siano perfettamente sovrapponibili con quelli dei flussi di radiazione infrarossa riportati in Figura 14c e 14d. Dalla Figura 14a si evince che i valori di temperatura apparente più elevati si registrano per la superficie inferiore delle chiome, con un massimo nel primo pomeriggio che raggiunge (e talvolta supera) il valore di 35°C. La superficie inferiore della rete mostra invece una temperatura apparente molto più bassa, oltre che molto simile a quella dell'atmosfera. Questi ultimi due elementi evidenziano inoltre andamenti di temperatura apparente meno regolari rispetto al caso delle chiome. I minimi si hanno al mattino, appena prima dell'alba, momento in cui la temperatura apparente della superficie inferiore della rete arriva ad avere valori di poco superiori ai 10°C. Per contro, nella Figura 14b si osserva come i valori di temperatura apparente di tutte e tre le superfici superiori (di suolo, canopy e rete) siano più simili tra loro nel corso delle giornate. Le superfici superiori di rete e chiome superano abbondantemente i 35°C, con un picco nell'ultima giornata che rasenta i 40°C. Anche in questo caso i minimi si trovano in prossimità dell'alba, con valori prossimi ai 20°C. Infine, è interessante notare come durante la notte la temperatura apparente della superficie superiore delle chiome risulti non di poco la più bassa (più di 2°C inferiore di suolo e rete).

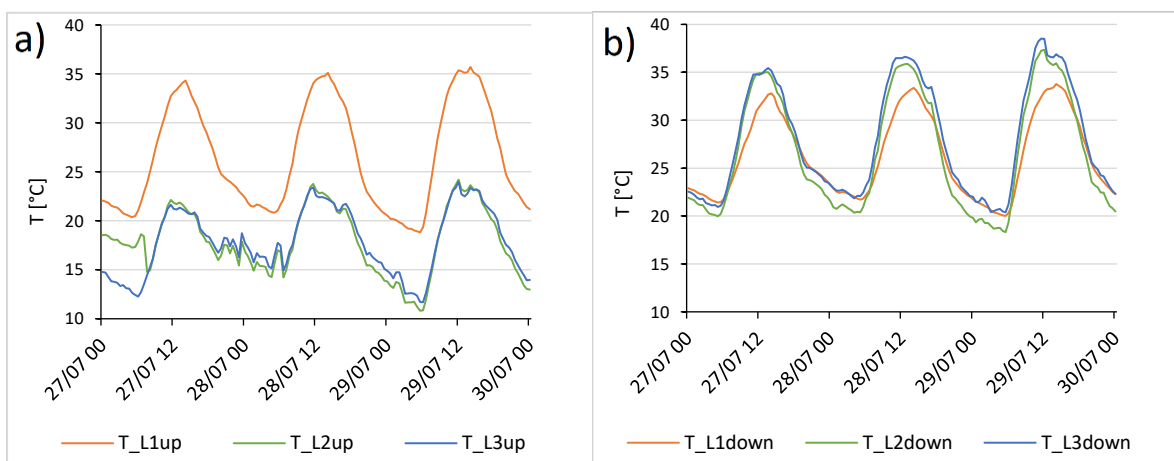


Figura 14. Confronto tra le temperature apparenti calcolate ai tre differenti livelli: (a) riporta gli andamenti delle temperature apparenti della superficie inferiore delle chiome (T\_L1up), di quella della rete (T\_L2up) e dell'atmosfera sovrastante il livello 3 (T\_L3up); (b) riporta invece gli andamenti delle temperature apparenti della superficie del suolo (T\_L1down), della superficie superiore delle chiome (T\_L2down) e quella della rete (T\_L3down).

La Figura 15 riporta gli andamenti delle temperature dell'aria misurate ai tre livelli (linee continue) e gli andamenti delle temperature apparenti della superficie superiore ed inferiore della canopy. Anche per quanto riguarda le temperature dell'aria si osserva un andamento generale giornaliero simile a quello riportato per la radiazione: a tutti i livelli, le temperature dell'aria aumentano fino alle prime ore del pomeriggio per poi diminuire progressivamente fino all'alba del giorno dopo, momento in cui cominciano ad aumentare nuovamente grazie all'apporto di energia associato alla radiazione solare. L'ambiente compreso tra il suolo e le chiome è quello che si mantiene più fresco durante tutto il corso del giorno e della notte. Leggermente più elevate sono invece le temperature dell'aria compresa tra le chiome e di quella esterna all'impianto. Tra queste ultime due non vi è un'elevata differenza; tuttavia si assiste ad un'inversione del gradiente di temperatura in corrispondenza delle ore 9:00 circa ed in corrispondenza della metà del pomeriggio (ore 16:00): infatti, all'interno di questo intervallo, la temperatura dell'aria misurata tra le chiome e la rete ha una temperatura leggermente più elevata di quella dell'aria al livello 3 (circa 1°C di differenza), mentre durante la restante parte della giornata la temperatura dell'aria al livello 2 è minore di quella riscontrata esternamente. Inoltre, dalla Figura 15 si vede come i picchi di temperatura abbiano una tendenza crescente nel periodo analizzato. Un altro aspetto meritevole di attenzione è l'elevata discrepanza tra le rispettive temperature dell'aria ai tre livelli a cui si assiste durante le ore notturne. In accordo con i principi fisici e termodinamici, durante la notte – venendo meno l'apporto di energia proveniente dal sole – le superfici tendono a raffreddarsi e, di conseguenza, esse raffreddano l'aria a loro adiacente, così che si assiste ad una stratificazione dell'atmosfera, dove l'aria più fredda si trova in prossimità della superficie terrestre la sua temperatura cresce con l'altezza. Infine, confrontando gli andamenti delle temperature dell'aria e le temperature apparenti della superficie inferiore e superiore delle chiome si vede come vi sia una discrepanza tra le prime e le seconde: sembrerebbe che, specialmente durante la notte, le chiome abbiano una temperatura (seppur apparente) più bassa di quella dell'aria ad esse circostante.

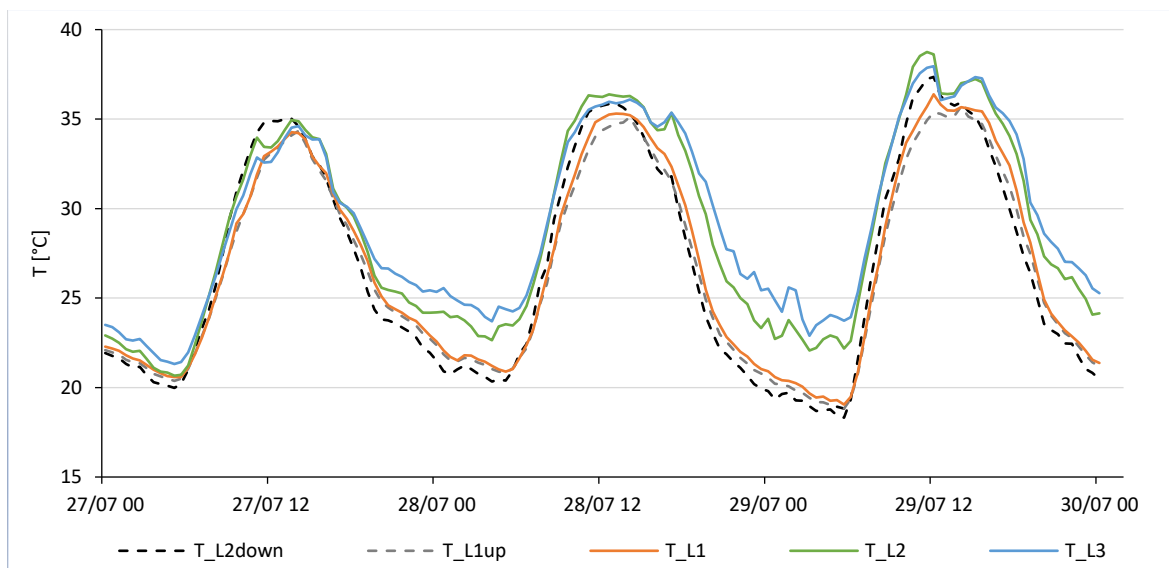


Figura 15. Andamenti delle temperature dell'aria misurate ai tre distinti livelli (linee continue) e loro confronto con i valori simultanei delle temperature apparenti della superficie superiore e inferiore delle chiome.

Passando al confronto dei valori di umidità relativa dell'aria, misurati ai tre differenti livelli nel corso delle giornate esaminate, si propone la Figura 16. In generale, l'andamento dell'umidità relativa dell'aria è pressoché opposto a quello della radiazione o della temperatura. Per questo parametro, infatti, i valori più elevati si registrano di notte mentre quelli bassi si hanno di giorno. Inoltre, al contrario di quanto visto per la temperatura dell'aria, si può apprezzare come gli andamenti medi dell'umidità relativa dell'aria abbiano pendenze negative se si considera tutto il periodo analizzato. La situazione di partenza (dalle ore 0:00 del 27/07/2021 fino alle ore 5:00 del mattino dello stesso giorno) mostra come l'atmosfera fosse pressoché satura di umidità a tutti e tre i livelli; mentre successivamente c'è sempre stata una distinzione più o meno marcata tra i valori misurati simultaneamente alle differenti altezze. I minimi si sono registrati nel primo pomeriggio dell'ultimo giorno analizzato, che evidenzia valori di umidità relativa di poco superiori al 20% per il livello 3, prossimi al 25% per il livello 2 e vicini al 35% per l'ambiente sotto-chioma. Confrontando i diversi livelli nell'insieme, quello adiacente al suolo è il livello che ha sempre avuto valori di umidità relativa più alti, segue il livello intermedio (ossia quello compreso tra le chiome e la rete) e, infine, i valori più bassi si riscontrano all'esterno della rete. Sebbene non sempre ben accentuata, è comunque possibile apprezzare una discreta differenza (che, ad ogni modo, non supera il 10%) tra

l'umidità relativa dell'aria sottostante la rete rispetto a quella dell'aria presente al suo esterno. Infine, si osserva come durante la maggior parte del tempo vi sia armonia tra le fluttuazioni di umidità relativa misurate ai differenti livelli.

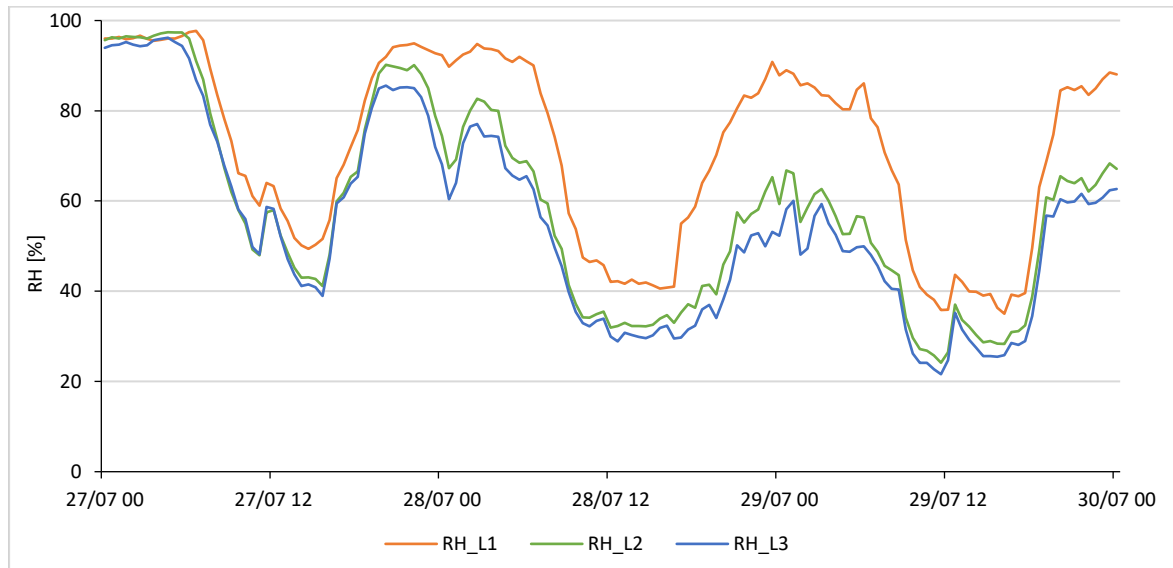


Figura 16. Rappresentazione in funzione del tempo dei valori di umidità relativa dell'aria misurati simultaneamente ai tre distinti livelli.

A partire dalle misure di temperatura e di umidità è stato possibile calcolare sia i valori di pressione di vapore acqueo dell'aria presente ai tre livelli, che i valori di VDP (ossia del deficit di pressione di vapore acqueo). La Figura 17 riporta gli andamenti nel tempo delle pressioni di vapore d'acqua ( $e$ , espresso in KPa) ottenute per l'aria ai tre distinti livelli, mentre la Figura 18 mostra quelli relativi al VDP (anch'essi in KPa). In quanto determinati univocamente dalla temperatura dell'aria e dal suo contenuto idrico (se si assume una pressione atmosferica costante), i valori di pressione di vapore e di VDP variano durante il periodo analizzato in funzione degli andamenti dei parametri da cui dipendono. Per quanto riguarda la pressione di vapore (Figura 17), l'andamento medio nel periodo analizzato ha una tendenza negativa, indicando una diminuzione della concentrazione atmosferica di vapore d'acqua. Confrontando i tre andamenti, si vede come il livello 1 sia quello che presenta i valori più alti; seguono, rispettivamente, il livello 2 e il livello 3. Tuttavia, seppure esistano delle differenze apprezzabili di pressione di vapore tra questi ultimi due, esse non sempre sono così accentuate. All'inizio e alla fine del pomeriggio del

primo giorno si sono registrati due picchi di pressione di vapore che si sono attestati intorno ai 3 KPa per tutti e tre i livelli; mentre i valori minimi si osservano in prossimità dell'alba dell'ultimo giorno momento in cui le pressioni di vapore dei livelli 2 e 3 rasentano 1.5 KPa. Infatti, a partire dalla notte del primo giorno e fino all'alba dell'ultimo giorno si ha un'atmosfera sempre più secca, in particolar modo per quanto riguarda i due livelli superiori. Dalla metà del secondo giorno i valori di pressione di vapore tornano ad avere una tendenza complessivamente crescente. Infine, le ampie e irregolari fluttuazioni registrate a tutti i livelli sono dovute al fatto che le caratteristiche dell'atmosfera sono in continua evoluzione e il rimescolamento dell'aria promosso dal vento non avviene con linearità.

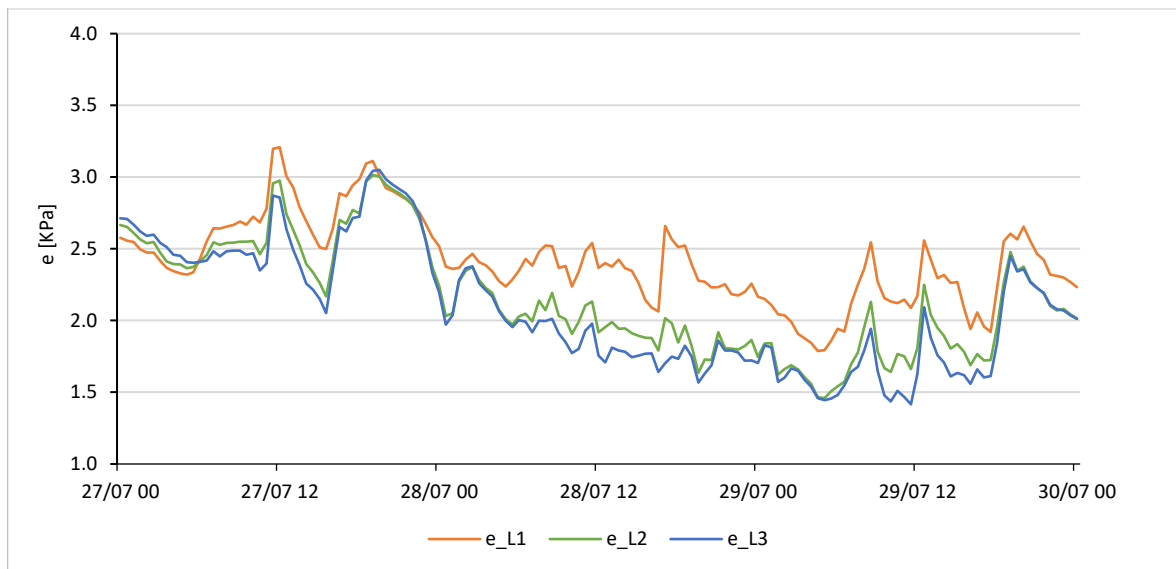


Figura 17. Confronto tra gli andamenti dei rispettivi valori di contenuto idrico dell'aria misurati simultaneamente ai tre distinti livelli. Il contenuto idrico dell'aria è espresso in pressione di vapore (e), in unità di KPa.

Riprendendo la Figura 18 si può notare come gli andamenti giornalieri dei valori di VDP, calcolati rispettivamente ai tre livelli, combacino con gli andamenti delle temperature dell'aria, mentre sono pressoché inversi a quelli dell'umidità relativa. I picchi massimi giornalieri di VDP coincidono con le prime ore del pomeriggio per tutti e tre i giorni analizzati, oltre che per tutti e tre i livelli. Ai due livelli superiori, i valori più elevati di VDP superano i 3 KPa il primo giorno, i 4 KPa il secondo giorno e i 5 KPa il terzo giorno. Ciò è in

linea con quanto già visto per gli andamenti delle temperature e di quelli di umidità relativa dell'aria: nell'arco dell'intero periodo, si assiste infatti ad un progressivo riscaldamento dell'aria non corrisposto da un altrettanto cospicuo aumento del suo contenuto idrico. I valori minimi per tutti e tre i livelli si registrano durante le ore notturne, momento in cui il VDP per il livello 1 si avvicina molto a 0 KPa, mentre ai due livelli superiori i suoi valori oscillano tra 1.5 e 0.5 KPa a seconda del giorno considerato. Confrontando i tre andamenti si evince che, mentre le differenze tra i valori di VDP del livello 1 e 2 sono importanti, quelle esistenti tra il livello 2 e 3 sono molto più basse e talvolta inesistenti. Perciò anche per quanto riguarda questo parametro, la Figura 18 evidenzia come le chiome costituiscano una barriera molto più significativa di quanto non lo sia la rete.

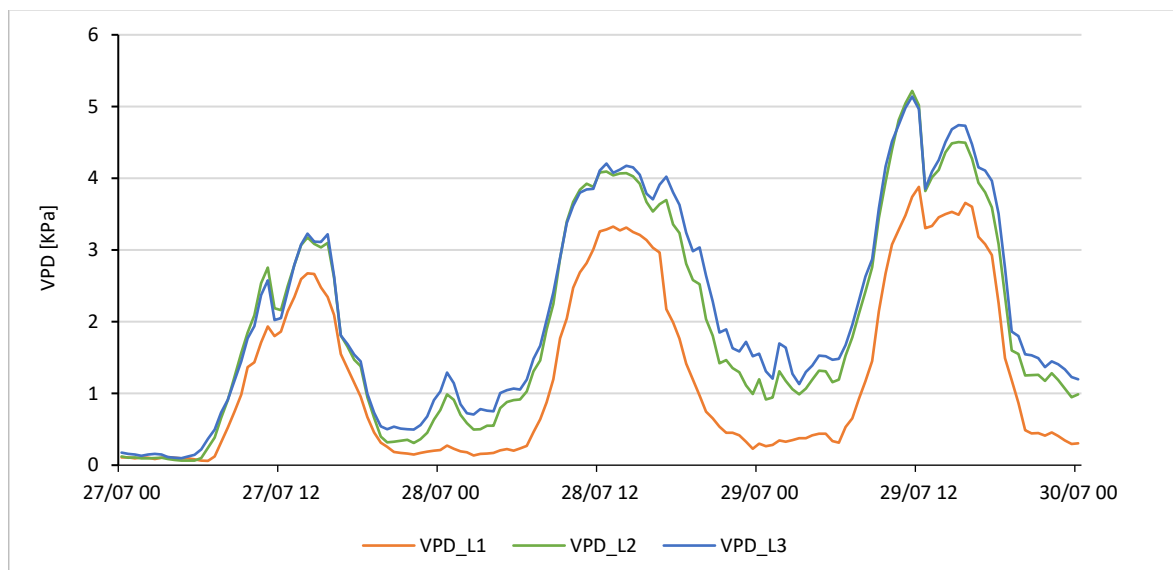


Figura 18. Confronto tra gli andamenti dei rispettivi valori di deficit di pressione di vapore acqueo (VDP) misurati simultaneamente ai tre distinti livelli. Come la pressione di vapore, anche il VDP viene riportato in unità di KPa.

Al fine di visualizzare contemporaneamente gli andamenti delle differenze, sia di temperatura dell'aria che del suo contenuto idrico, riscontrate tra un livello e quello ad esso adiacente, si riporta la Figura 19. Le differenze osservate per la pressione di vapore ( $e_{L1}-e_{L2}$ ,  $e_{L2}-e_{L3}$ , linee continue) evidenziano chiaramente come il contenuto idrico dell'aria diminuisca a mano a mano che ci si allontana dal suolo. Opposto è invece il discorso per le differenze di temperatura ( $T_{L1}-T_{L2}$ ,  $T_{L2}-T_{L3}$ , linee tratteggiate), le

quali indicano che le temperature dell'aria presente nel sistema frutteto tendono ad avere un gradiente positivamente relazionato con la distanza dal suolo (ossia le temperature crescono con l'altezza). Tuttavia, per alcune ore centrali del giorno (collocate a ridosso delle ore 12:00), si vede come la temperatura dell'aria fuori rete sia più fredda dell'aria presente tra le chiome e la rete. Le differenze più accentuate di temperatura si osservano tra il livello 1 e 2, con  $\Delta T$  anche minori di  $-4^{\circ}\text{C}$ . Trovare un confronto logico tra gli andamenti delle differenze di pressione di vapore e quelle di temperatura non è facile e, sebbene i due parametri siano strettamente legati da un punto di vista fisico e termodinamico, è evidente che anche altri fattori concorrano ad influenzare quanto osservato ai differenti livelli.

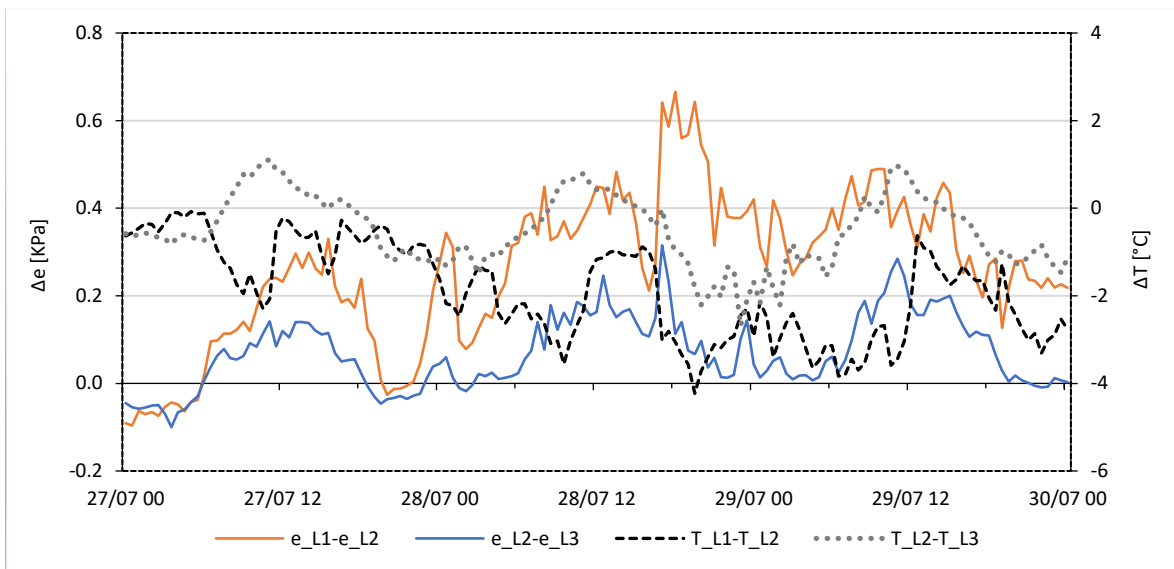


Figura 19. Confronto delle differenze di pressione di vapore acqueo e delle differenze di temperatura dell'aria, calcolate come differenza tra i valori misurati a due distinti livelli attigui.

Grazie all'applicazione del metodo dell'eddy covariance è stato possibile ottenere i valori dei flussi verticali turbolenti di calore sensibile e di calore latente. Distinti per ognuno dei tre livelli a cui sono stati indipendentemente misurati, gli andamenti di tali flussi vengono rappresentati in Figura 20, dove, inoltre, vengono riportati anche i valori di radiazione netta calcolati per il rispettivo livello. Partendo dalla Figura 20a, la quale si riferisce a quanto avviene al livello 1, si vede come i flussi di calore sensibile e latente non seguano affatto un andamento giornaliero preciso nonostante il flusso di radiazione netta – il

quale rappresenta l'energia disponibile perché avvengano dei flussi di calore – abbia un andamento giornaliero ben definito. Specialmente i flussi di calore latente, ma anche quelli di calore sensibile, sono caratterizzati da fluttuazioni molto ampie e, inoltre, fatta eccezione per i picchi positivi e negativi più intensi, entrambi i flussi mostrano valori tendenzialmente vicini allo zero.

Passando al livello intermedio (Figura 20b) si nota subito come la situazione cambi drasticamente. Innanzitutto, il flusso di radiazione netta mostra valori che, durante il picco di mezzogiorno giorno, sono quasi 12 volte superiori a quanto visto per il livello 1. A questa altezza, all'andamento del flusso di radiazione netta corrisponde un andamento analogo del flusso di calore latente. Quest'ultimo, mentre durante le ore di luce è intenso (con massimi di circa  $600 \text{ Wm}^{-2}$ ) ma ancora abbastanza discontinuo, durante la notte ha valori stabili e pressoché nulli. Anche la curva relativa al flusso di calore sensibile risulta più pulita (ossia con fluttuazioni meno ampie di quanto visto per il livello 1); tuttavia i valori di flusso di calore sensibile rimangono vicini allo zero, con l'eccezione di un breve periodo ricorrente in tutti e tre i giorni: durante il primo giorno tale flusso è positivo dalla mattina inoltrata e fino al primo pomeriggio (sfiorando per un istante i  $100 \text{ Wm}^{-2}$ ), il secondo ed il terzo giorno invece, nella seconda metà del pomeriggio si registra una situazione analoga, ma dove i valori di flusso hanno segno opposto.

Infine, al livello 3 (Figura 20c) si ha una situazione molto simile a quanto appena visto per il livello intermedio, e pure i valori massimi e minimi dei differenti flussi sono pressoché identici. Le differenze più significative con il livello ad esso sottostante riguardano principalmente il flusso di calore sensibile, il quale, all'esterno della rete, ha un andamento più marcatamente in sintonia con quello del flusso di radiazione netta: infatti, mentre durante la notte esso tende ad essere negativo (ossia il calore è trasferito dall'atmosfera verso la superficie terrestre), durante le ore di luce esso è positivo (questa volta il trasferimento di calore avviene dalla superficie verso l'atmosfera). Una considerazione degna di nota è legata al leggero ritardo che mostrano i flussi di calore rispetto al flusso di radiazione netta: ciò è tuttavia apprezzabile solamente per i livelli 2 e 3.



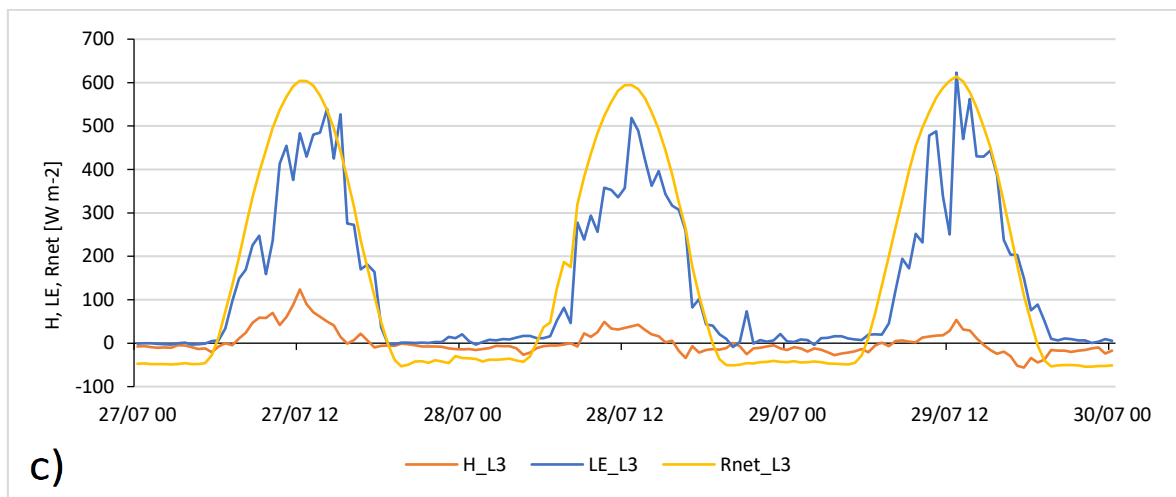
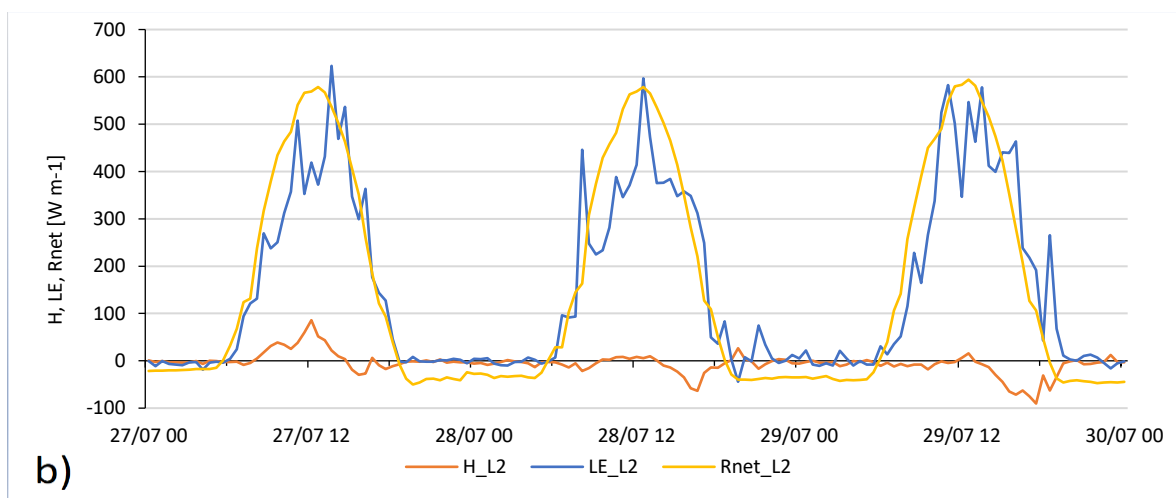
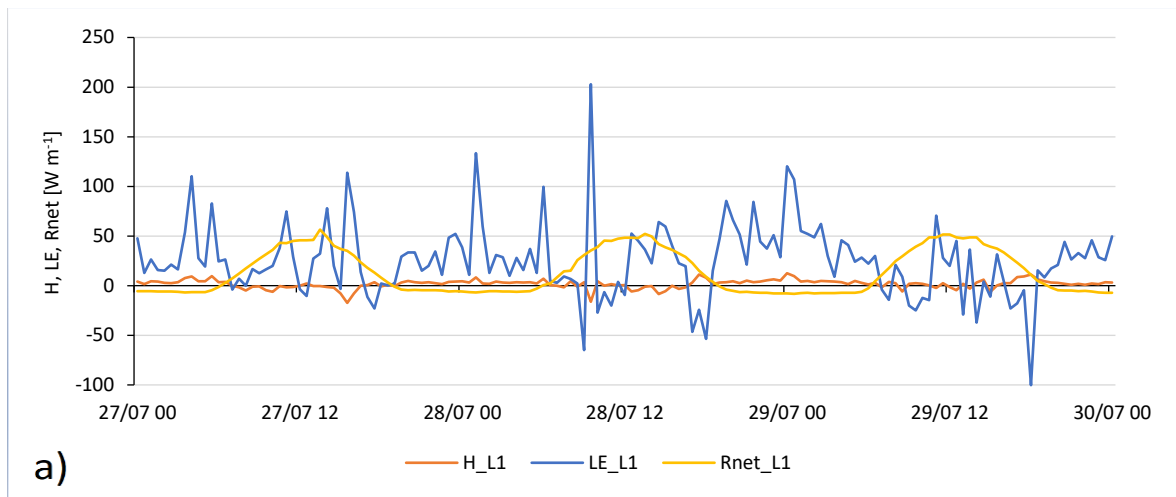


Figura 20. Andamenti dei flussi di calore sensibile (H), di calore latente (LE) e di radiazione netta (Rnet) ottenuti ai tre distinti livelli: (a) riguarda quanto osservato al livello 1; (b) si riferisce all'ambiente del livello 2; mentre (c) riporta i flussi misurati all'esterno della rete.

Dai valori dei due flussi di calore, registrati separatamente per il livello 2 e per il livello 3, sono stati calcolati gli andamenti della Bowen Ratio alle due altezze (Figura 21). La Bowen

Ratio – che non è altro che il rapporto tra il flusso di calore sensibile e il flusso di calore latente misurati simultaneamente alla stessa quota – è un indice che descrive la ripartizione tra i due flussi di calore quando una superficie umida scambia calore con l’atmosfera. Perciò, come nel caso riscontrato nel presente studio, valori di Bowen Ratio prossimi allo zero indicano la preponderanza del flusso di calore latente rispetto a quello di calore sensibile. Nella Figura 21 si vede come la ripartizione tra i due flussi di calore abbia un andamento giornaliero abbastanza definito (a forma di U invertita), specialmente nella giornata centrale. Sebbene anche durante la notte si hanno flussi verticali di calore diversi da zero, per rendere più chiara la Figura 21 si è scelto di filtrare i valori, selezionando solo quelli corrispondenti al periodo del giorno in cui il flusso di radiazione netta era superiore a  $50 \text{ Wm}^{-2}$ . Confrontando i valori di Bowen Ratio calcolati ai due distinti livelli si osserva una definita ed apprezzabile differenza degli indici di ripartizione tra i due flussi alle diverse quote. Nonostante in entrambi i casi lo scambio di calore avviene principalmente sotto forma di calore latente, al livello 2 l’importanza relativa di quest’ultimo flusso è maggiore rispetto a quanto osservato al di sopra della rete. Concentrandosi sulla porzione centrale del giorno (ossia quando i rapporti di Bowen sono positivi), al livello 3 si ha dunque una ripartizione leggermente più equa tra i due flussi di calore rispetto a quanto osservato per il livello 2.

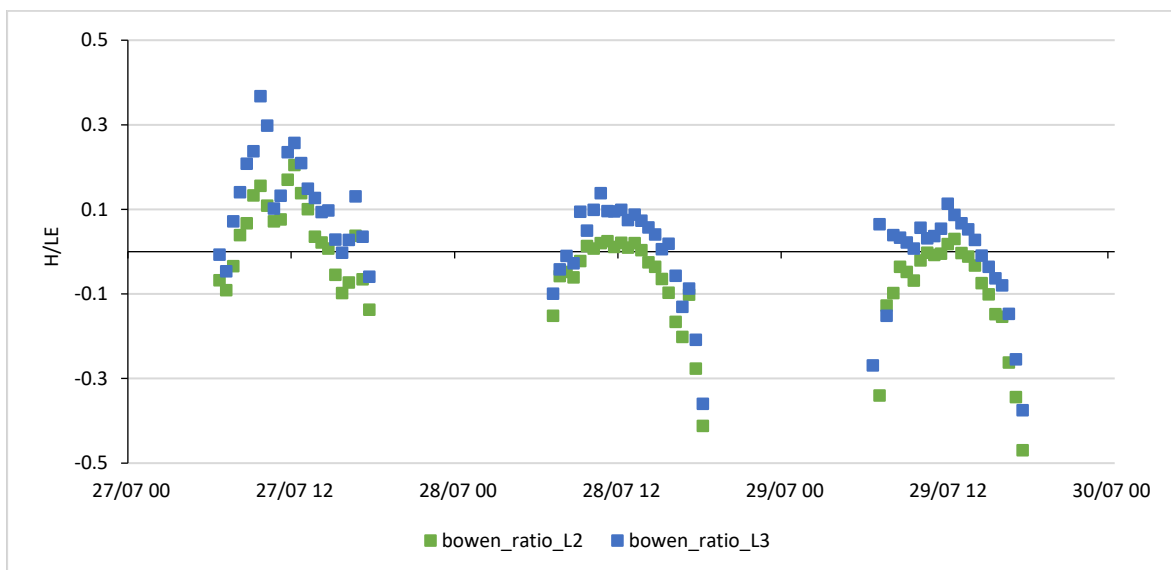


Figura 21. Andamenti dei rapporti di Bowen calcolati separatamente ai due livelli superiori quando la radiazione netta presentava valori superiore a  $50 \text{ Wm}^{-2}$ .

Un metodo indipendente per valutare la qualità e l'affidabilità dei flussi stimati attraverso la tecnica dell'eddy covariance consiste nell'analisi della chiusura del bilancio energetico. Nel rispetto della prima legge della termodinamica, infatti, la somma dei flussi di calore sensibile e latente stimati dovrebbe essere uguale all'energia effettivamente disponibile (ossia all'energia netta risultante dai contributi di pozzi e di sorgenti di energia). Poiché l'energia disponibile coincide quasi univocamente con il flusso di radiazione netta ( $R_{net}$ ), il rapporto tra la somma dei due flussi di calore ( $H+LE$ ) e  $R_{net}$  dovrebbe avvicinarsi all'unità.

Pertanto, di seguito vengono riportate le analisi delle chiusure del bilancio energetico condotte per livello 2 e per il livello 3 (rispettivamente Figura 22a e Figura 22b). Relativamente alla quota compresa tra le chiome e la rete, l'analisi della chiusura del bilancio energetico ha prodotto una retta avente una pendenza di 0.78 e una intercetta pari a  $23.65 \text{ Wm}^{-2}$ , con un coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) uguale a 0.90. Quest'ultimo parametro statistico indica l'esistenza una forte dipendenza tra il flusso di energia disponibile e la somma dei due flussi di calore stimati a questo livello. Per il Livello 3, invece, l'analisi della chiusura del bilancio energetico ha prodotto una retta avente pendenza di 0.76 e una intercetta pari a  $16.50 \text{ Wm}^{-2}$ , con un coefficiente di determinazione recante il valore di 0.92. Sebbene la pendenza della retta calcolata a questo livello sia leggermente più bassa di quella ottenuta per il livello inferiore, sia l'intercetta che il coefficiente di determinazione hanno valori più prossimi ad una chiusura ideale del bilancio energetico.

Infine, rispetto a quanto prodotto dalle analisi appena descritte, le quali sono state effettuate sui dati medi relativi alle mezzore, se si considera la quantità totale di energia disponibile e la quantità totale di calore scambiata nell'arco complessivo dei tre giorni (vedi Tabella 1) si ha una migliore chiusura del bilancio energetico: quest'ultima è infatti pari a 94% per il livello 2 e pari a 86% per il livello esterno alla rete.

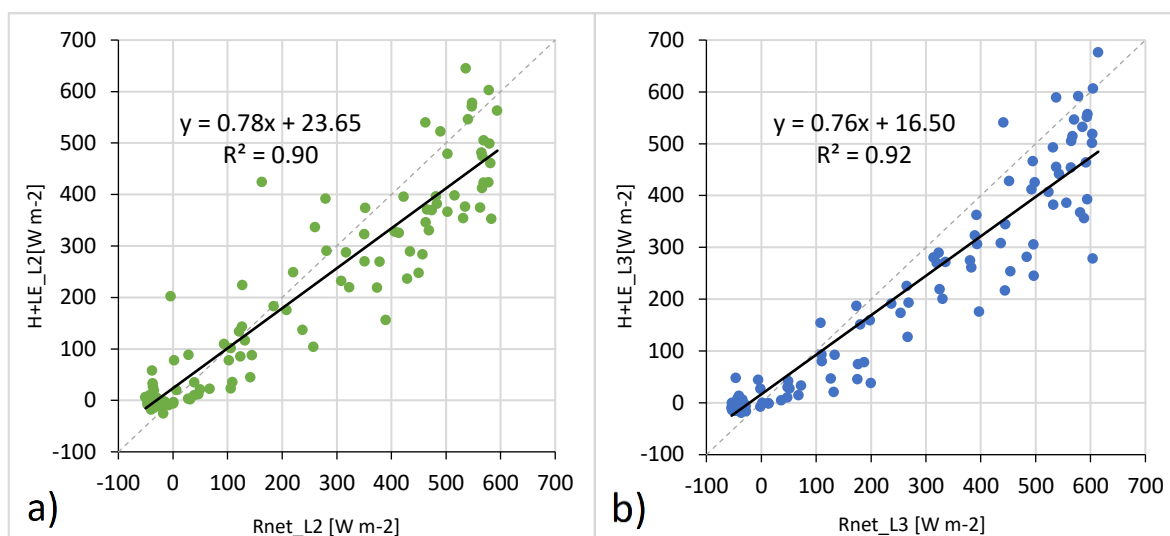


Figura 22. Analisi delle rispettive chiusure del bilancio energetico operate per il livello 2 (a) e per il livello 3 (b). La linea tratteggiata indica la condizione ideale di perfetta chiusura del bilancio energetico, mentre la linea piena indica la retta di tendenza riscontrata per i valori effettivamente misurati.

Di seguito si riporta anche la Tabella 1 relativa alle quantità nette giornaliere di energia disponibile (Rnet), di quella accumulata dal suolo (G) e di quella consumata (o guadagnata) grazie ai flussi di calore sensibile (H) e latente (LE). Tali quantità nette di energia sono riportate in  $\text{MJm}^{-2}$  e sono state calcolate – separatamente per ciascun livello – integrando nel tempo i valori dei rispettivi flussi di energia misurati. Dalla Tabella 1 si evince che il livello 1 è quello che riceve e scambia le quantità più basse di energia. A questo livello viene presentata anche la quantità totale di energia immagazzinata quotidianamente dal suolo: durante l'estate, infatti, il suolo tende a scaldarsi e a trasferire energia per conduzione di calore agli strati più profondi (mentre, durante la stagione fredda, tale flusso risulterebbe invertito di segno). Salendo al di sopra delle chiome, la situazione energetica osservata al livello 2 e 3 cambia drasticamente e si apprezza inoltre come le rispettive quantità, se confrontate, non sono molto differenti. Mentre le quantità nette di energia disponibile e di energia scambiata dal flusso di calore latente sono molto simili nei tre giorni analizzati, ciò non è altrettanto vero per le quantità nette di energia scambiate come calore sensibile. Esso, infatti, presenta una variabilità molto più elevata e, comunque, valori netti giornalieri molto più esigui. Questi ultimi sono positivi ad entrambi i livelli relativamente al primo giorno, mentre risultano

negativi – sempre ad entrambi i livelli – per il secondo e terzo giorno, indicando un trasferimento netto di energia sotto forma di calore sensibile che avviene dal cielo verso la superficie.

Tabella 1. Quantità nette di energia disponibile (Rnet), di energia accumulata dal suolo (G) e di energia consumata o guadagnata grazie ai flussi di calore sensibile (H) e latente (LE). Queste quantità sono state calcolate integrando nel tempo i valori dei rispettivi flussi di energia misurati indipendentemente a ciascun livello e vengono qui riportate in MJm<sup>-2</sup>.

	L1				L2			L3		
	Rnet	H	LE	G	Rnet	H	LE	Rnet	H	LE
	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2	MJ m-2
27-lug	1.12	0.07	2.34	0.44	14.12	0.53	12.52	14.72	1.30	12.70
28-lug	1.18	0.15	2.50	0.31	13.81	-0.60	13.15	14.61	-0.06	11.90
29-lug	1.24	0.24	1.76	0.24	13.89	-1.30	14.35	14.68	-0.88	12.89

Oltre ai flussi già presentati, si sono infine investigati anche i flussi verticali di anidride carbonica. Gli andamenti di questi ultimi – sempre distinti per le tre quote a cui sono state effettuate le misurazioni – vengono presentati in Figura 23. I valori dei flussi di CO<sub>2</sub> stimati attraverso il metodo dell’eddy covariance evidenziano un andamento giornaliero che, seppur differente tra il livello inferiore e i due superiori, ha delle caratteristiche di regolarità e ricorrenza nelle tre giornate. Al di sotto delle chiome, i flussi di CO<sub>2</sub> si mantengono positivi (ossia ascendenti) durante la quasi totalità delle 72 ore e, in generale, sono più elevati durante la notte e più esigui durante il giorno. Invece, ai livelli 2 e 3 la situazione è opposta: infatti, i flussi di CO<sub>2</sub> sono leggermente positivi solo durante le ore della notte (circa 5  $\mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$ ), mentre sono negativi durante le ore di luce, con valori di picco inferiori a -20  $\mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$ . Quanto osservato non deve stupire considerando che durante il giorno le chiome del frutteto hanno un elevato tasso fotosintetico e, sottraendo parecchia CO<sub>2</sub> all’aria ad esse limitrofa, promuovono l’instaurarsi di un gradiente favorevole all’afflusso verso di loro di aria più ricca in tale gas (sia dal volume d’aria inferiore che da quello superiore). La presenza della rete non sembra alterare significativamente l’andamento del flusso di CO<sub>2</sub>, in quanto non vi sono delle differenze marcate tra i flussi misurati al livello 2 e 3. L’elemento canopy, invece, costituisce una

barriera – oltre che importante dal punto di vista fisico – attivamente coinvolta nel determinare sia l'intensità che la direzionalità dei flussi di CO<sub>2</sub> e, per queste ragioni, influenza notevolmente quanto avviene sia al di sotto che al di sopra di essa, disaccoppiando i due ambienti specialmente per quanto riguarda i flussi ed i gradienti di CO<sub>2</sub>.

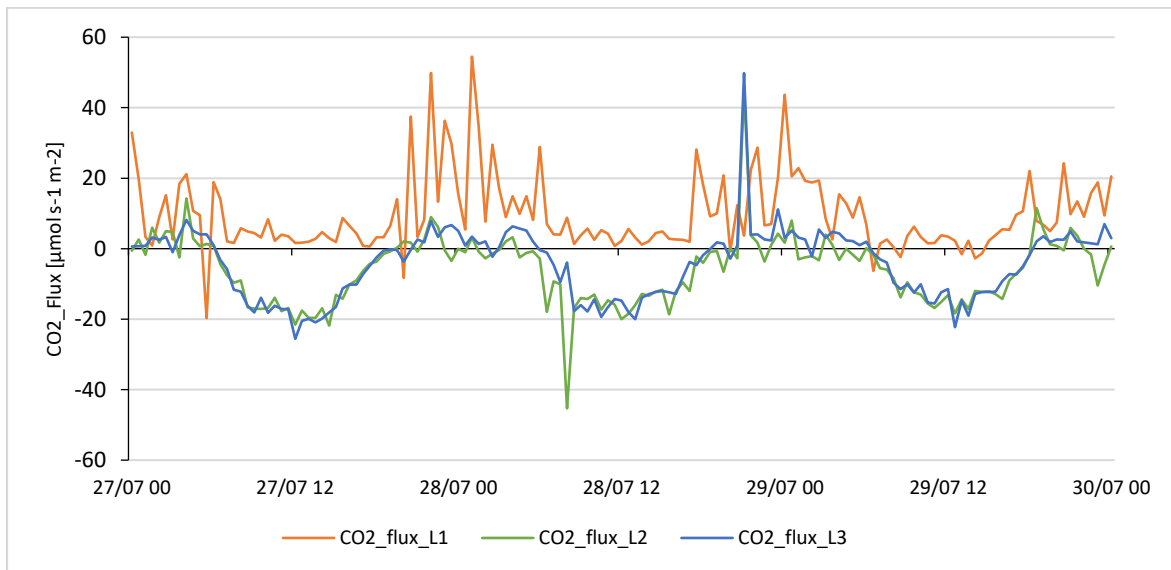


Figura 23. Andamenti dei flussi di CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>\_flux) calcolati ai tre differenti livelli attraverso l'applicazione della tecnica dell'eddy covariance.

Per comprendere al meglio le implicazioni della peculiare struttura stratificata del sistema frutteto sulle dinamiche della CO<sub>2</sub> si riporta anche la Figura 24, la quale mette a confronto gli andamenti delle concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> misurate continuamente e simultaneamente ai tre distinti livelli. Gli andamenti delle concentrazioni di tale gas mostrano andamenti giornalieri concordi a tutti e tre i livelli. Tuttavia, il livello 1 è quello che evidenzia variazioni giornaliere di [CO<sub>2</sub>] più estreme: durante la notte, infatti, i picchi massimi superano il valore di 550 ppm, mentre durante il giorno i valori riscontrati per l'aria sottostante le chiome sono stabili e poco superiori ai 400 ppm. Anche le concentrazioni di CO<sub>2</sub> misurate per il livello 2 e 3 sono massime durante la notte (circa 480 ppm, ad entrambe le quote) e minime durante il giorno (circa 400 ppm per l'ambiente delimitato da rete e chiome e circa 420 ppm per l'aria esterna alla rete). Proprio durante le ore di luce, per tutti e tre i giorni analizzati, si registra una discrepanza non indifferente

tra le concentrazioni di CO<sub>2</sub> osservate tra il livello 2 e 3. Durante questa fascia oraria, mentre l'aria esterna alla rete è in equilibrio con il valore medio di [CO<sub>2</sub>] atmosferica globale, all'interno della rete (ossia al livello 2) l'aria presenta concentrazioni di CO<sub>2</sub> discretamente inferiori (quasi 20ppm in meno).

Quanto appena affermato è meglio visualizzabile nella Figura 25, la quale approfondisce proprio gli andamenti delle differenze di concentrazione di CO<sub>2</sub> calcolate tra un livello e quello ad esso adiacente. Le differenze più elevate tra i valori del livello 1 e 2 si riscontrano durante la notte (con  $\Delta\text{CO}_2$  anche maggiori di 70 ppm), suggerendo un accumulo notturno di CO<sub>2</sub> nel volume d'aria compreso tra suolo e chiome, dovuto sia ad un elevato tasso di respirazione del sistema suolo-chiome che ad una elevata stabilità dell'aria che non ne favorisce il rimescolamento. Durante il giorno invece, le differenze di concentrazione di CO<sub>2</sub> tra il livello 1 e 2 sono pressoché nulle. Quanto invece osservato per le differenze tra il livello 2 e 3 è diverso. Innanzitutto, tali differenze non sono tanto marcate quanto quelle risultanti dal precedente confronto. Inoltre, le concentrazioni di CO<sub>2</sub> tra queste due quote sono tendenzialmente negative nell'intero arco dei 3 giorni: ciò significa che l'aria del livello 3 è solitamente più ricca in CO<sub>2</sub> rispetto a quella del livello 2. Infine, mentre durante la notte tali differenze tra i due livelli superiori, oltre che pressoché nulle, risultano anche molto variabili, durante il giorno si ha una differenza stabile circa uguale a -18 ppm.

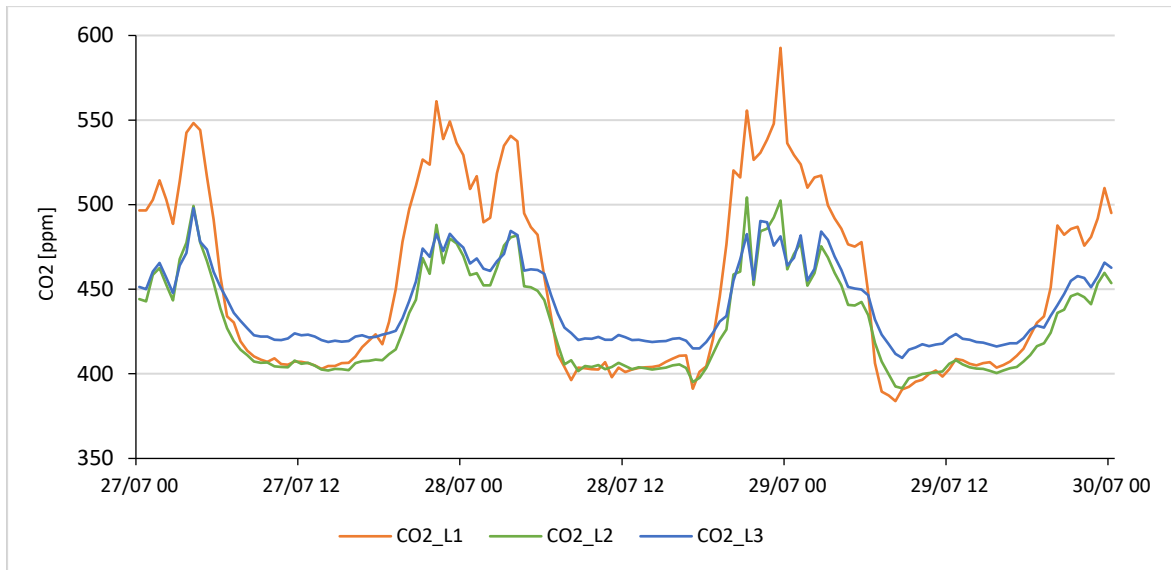


Figura 24. Andamenti giornalieri delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> (in ppm) misurate per l'aria ai tre differenti livelli.

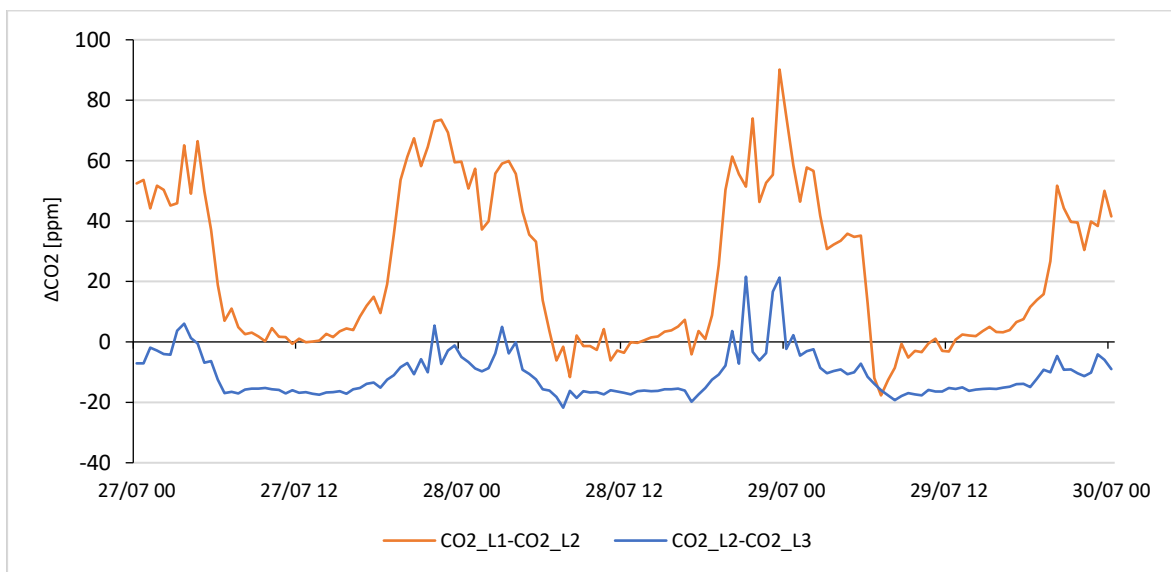


Figura 25. Andamenti giornalieri delle differenze delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> (in ppm) riscontrate per l'aria tra un livello e quello ad esso adiacente.



## Discussione

Per tutte e tre le giornate analizzate, i valori di flusso di radiazione solare incidente misurati all'esterno della rete hanno evidenziato delle intensità e degli andamenti giornalieri tipici delle giornate estive e serene del sud Italia. Anche i quantitativi giornalieri netti di energia disponibile si sono rivelati in linea (anche se leggermente minori perché i giorni in esame sono più lontani dal solstizio d'estate) con il valore medio giornaliero estrapolato per il mese di luglio da uno studio agrometeorologico condotto dal C.R.A.-Istituto Sperimentale Agronomico di Bari, il quale ha elaborato i dati rilevati tra il 1981 ed il 2006 da una stazione meteorologica situata proprio a Metaponto.

Come atteso, la rete riduce il carico di radiazione solare incidente in quanto la sua trasmittanza media – quest'ultima calcolata sui flussi di radiazione ad onda corta – risulta poco inferiore a 0.85. Avvalorato dal fatto che la rete ha una maglia abbastanza larga (0.5x3 mm) e che le fibre che la compongono sono sottili e trasparenti, questo valore di trasmittanza indica che la tipologia di rete in esame ha una bassa capacità ombreggiante, pari a circa il 15%. Tuttavia, considerando separatamente le diverse fasce orarie delle tre giornate si è riscontrato come i valori di trasmittanza variassero in funzione dell'angolo di elevazione del sole rispetto all'orizzonte: infatti, quanto più il sole si colloca perpendicolare alla rete, maggiore è il valore di trasmittanza di quest'ultima. Andamenti analoghi di trasmittanza sono stati riscontrati anche in numerosi altri studi analoghi (per es. Möller *et al.*, 2003, 2010; Möller & Assouline 2007). Per contro, la canopy costituisce un elemento in grado di alterare in misura molto maggiore i flussi di radiazione. La trasmittanza di quest'ultima si attesta a valori medi di circa 0.06 e, di conseguenza, al di sotto delle chiome le componenti di radiazione ad onda corta – ma anche quelle ad onda lunga – risultano molto differenti rispetto a quanto riscontrato ai due livelli superiori.

I valori di albedo misurati separatamente per la rete, per le chiome, per il suolo e per il sistema frutteto nel suo complesso, evidenziano invece andamenti giornalieri opposti a quelli della trasmittanza: essi sono maggiori in prossimità dell'alba e del tramonto mentre sono più bassi a mezzogiorno. Pure in questo caso, quanto appena detto indica che l'albedo di una superficie varia anch'esso in funzione dell'angolo di incidenza del flusso radiativo. La rete ha un'albedo medio pari a circa 0.1, mentre le chiome pari a circa 0.21;

il sistema frutteto, considerato nel suo insieme, riporta invece un valore medio di 0.26, mentre quanto osservato per il suolo non è molto logico a meno che non si ammetta la discontinuità della copertura delle foglie e del manto erboso, la quale, evidentemente, compromette molto l'attendibilità dell'albedo misurato per il suolo inerbito.

Così come la rete e le chiome hanno la capacità di alterare i flussi di radiazione ad onda corta, questi elementi modificano – nello spazio e nel tempo – anche i flussi ad onda lunga. Per quanto riguarda i due livelli superiori – sebbene si sia riscontrato che la presenza della rete promuova un leggero aumento dei valori del bilancio radiativo ad onda lunga misurato al livello 2 rispetto a quanto osservato al livello 3 – le differenze tra i rispettivi bilanci sono minime: infatti, perché la rete abbia un effetto significativo su tale bilancio, quest'ultima dovrebbe avere un'elevata capacità riflettente, una bassa trasmittanza e un'elevata emissività (Teitel & Segal, 1995). Il bilancio radiativo ad onda lunga riscontrato per il livello 1 è invece molto differente da quanto osservato al di sopra delle chiome e, a maggior ragione, al di sopra della rete. Le chiome, infatti, specialmente se dense e disposte uniformemente come in questo caso, hanno tutte le caratteristiche ideali (e cioè un'elevata capacità riflettente, una bassa trasmittanza e un'elevata emissività) per garantire il mantenimento nell'ambiente sottostante di un bilancio della radiazione ad onda lunga pressoché nullo, oltre che poco variabile, nel corso delle 24 ore.

Come già accennato, la velocità del vento, misurata simultaneamente alle tre altezze, decresce a mano a mano che ci si avvicina al suolo. Dal confronto tra i valori medi calcolati per ciascuna mezzora per il livello 2 e per il livello 3, è emerso che la velocità del vento al di sotto della rete è inferiore alla metà di quella misurata simultaneamente al suo esterno: la forte relazione individuata tra i due livelli (recante un coefficiente di determinazione  $R^2$  paria a 0.96) è infatti descritta dalla retta  $y=0.45x-0.07$  (dove  $y$  è la velocità del vento riscontrata al livello 2 e  $x$  è la velocità del vento misurata esternamente alla rete). Tuttavia, tale diminuzione della velocità media del vento non è imputabile solamente alla presenza della rete: infatti, rimanendo all'interno dello spessore dello strato superficiale, ciò che normalmente si osserva è un progressivo – oltre che sempre più accentuato – rallentamento del vento a mano a mano che ci si avvicina al suolo, così che il profilo verticale della velocità del vento è tipicamente di forma logaritmica. Analizzando gli andamenti del vento ai tre livelli nel corso delle tre giornate di misura, si è

osservato come ci sia un buon accoppiamento tra le caratteristiche dinamiche dell'aria esterna (livello 2) e interna alla rete (livello 2); mentre, rispetto a quanto visto al di sotto delle chiome (livello 1), non sembra sussistere una particolare dipendenza tra il vento di questo livello e quello che si manifesta esternamente. I due livelli superiori hanno infatti andamenti che – seppur differenti nei loro valori – sono concordi e presentano un elevato grado di similarità; mentre al di sotto delle chiome il vento presenta velocità molto basse, oltre che un andamento molto discontinuo e per nulla allineato con quello dei due livelli superiori. L'accoppiamento – ossia la concordanza – tra le rispettive caratteristiche del vento presente al di sotto e al di sopra di una rete disposta orizzontalmente a copertura di una coltura agraria è già stato riscontrato in numerosi altri studi analoghi, specialmente quando la rete investigata ha una maglia larga ed una bassa porosità (per esempio Tanny *et al.*, 2006, 2010). D'altra parte, quanto più è elevata è la resistenza aerodinamica della rete al passaggio dell'aria, tanto più probabile è che le caratteristiche del vento intero ed esterno siano differenti e disaccoppiate (per es. Möller *et al.*, 2003, Teitel *et al.*, 2015 e 2020). Perciò, poiché la rete in questione ha una maglia abbastanza larga e le fibre che la costituiscono sono molto sottili, non sorprende che il vento ai due livelli avesse caratteristiche simili. Al di là delle proprietà meramente fisiche della rete, quanto osservato tra questi due livelli potrebbe essere in parte dovuto al fatto che la rete si trovava ad una distanza significativa dalle chiome, lasciando uno spazio libero tra questi due strati sufficientemente ampio affinché l'aria in movimento potesse passare attraverso la rete senza necessariamente alterare eccessivamente le proprie caratteristiche dinamiche e mantenendo buoni livelli di quantità di moto.

Poiché è proprio il vento che garantisce il rimescolamento dell'aria e, di conseguenza, la dislocazione di calore (sensibile e latente) e di materia nell'atmosfera, si è osservato che le sue caratteristiche ai tre differenti livelli si sono ripercosse sui gradienti verticali di umidità, di temperatura e di concentrazione di CO<sub>2</sub> misurati nel frutteto. Inoltre, poiché l'applicazione della tecnica dell'eddy covariance per quantificare i flussi di energia e di materia è fondamentalmente basata sull'analisi delle componenti medie e turbolente del vento, è stato riscontrato come le diverse caratteristiche dinamiche dell'aria ai tre differenti livelli abbiano influenzato anche queste stime.

Per quanto riguarda gli andamenti giornalieri di temperatura, di umidità e di concentrazione di CO<sub>2</sub> si è visto che essi sono maggiormente influenzati dall'andamento della radiazione piuttosto che da quello della velocità del vento. Tuttavia, se si considerano i gradienti verticali di questi parametri, si può apprezzare come essi siano strettamente legati anche alle caratteristiche dinamiche dell'aria riscontrate ai differenti livelli. Infatti, la particolare struttura stratificata del sistema frutteto, modificando i flussi radiativi e accentuando le differenze dinamiche del vento presente alle tre altezze, amplifica anche le differenze fisiche e composizionali dell'aria presente ai tre livelli differenti.

Rispetto alla temperatura dell'aria, come riportato da altri studi (per es. Tanny et al. 2003 e 2010), si è visto che essa tende a mantenere un gradiente verticale positivo durante la maggior parte delle 24 ore: infatti, mentre al livello 1 l'aria è costantemente più fredda di circa 2°C rispetto a quella del livello 2, quanto osservato tra i due livelli superiori è differente. Tra questi ultimi due, a partire da metà mattina e fino a circa metà del pomeriggio, si ha un gradiente di temperatura leggermente negativo (meno di 1° C di differenza). Ciò è logico se si considera che la maggior parte dell'assorbimento di radiazione solare avviene da parte delle chiome, le quali si scaldano e trasferiscono tale calore all'aria ad esse circostante; la rete invece, assorbendo solamente una piccola frazione della radiazione solare incidente ( $\approx 5\%$ ), ha una bassa capacità di scaldare l'aria ad essa adiacente. I gradienti di temperatura riscontrati durante la notte sono molto più accentuati rispetto a quanto avviene di giorno: comunemente infatti, durante la notte, si assiste ad una stabilizzazione e ad una stratificazione della bassa atmosfera, dove l'aria più fredda si trova in prossimità della superficie terrestre per via della sua maggiore densità. Tuttavia, confrontando le temperature dell'aria ai tre differenti livelli con le temperature apparenti della superficie superiore e inferiore delle chiome non si sa spiegare con certezza la ragione per cui, durante la notte, queste ultime risultino così basse rispetto a quelle dell'aria circostante. Una possibile spiegazione potrebbe essere che, poiché l'irrigazione era molto spinta (il contenuto idrico del suolo era costantemente mantenuto prossimo alla capacità di campo), le chiome continuassero anche durante la notte a traspirare una buona quantità di acqua e, facendo ciò, la loro temperatura sarebbe potuta risultare inferiore a quella dell'aria circostante.

L'umidità relativa, come ci si aspettava, ha mostrato andamenti giornalieri inversi rispetto a quanto riscontrato per la radiazione, per la temperatura e, in parte, per la velocità del vento. Essa, infatti, ha valori massimi durante la notte, e valori minimi durante il giorno; tali variazioni giornaliere sono strettamente legate innanzitutto all'andamento delle temperature dell'aria (a parità di contenuto idrico, un'aria più calda riporta un valore di umidità relativa più basso rispetto a dell'aria più fredda), ma anche all'intensità della turbolenza, che, come riscontrato nel presente studio, è solitamente più elevata quando i flussi di calore sono massimi. Inoltre, si è riscontrata un'apprezzabile differenza tra l'umidità relativa misurata ai distinti livelli, specialmente tra il livello 1 ed i due livelli superiori, i quali non presentano marcate differenze tra i loro rispettivi valori. Ciò evidenzia che la rete non oppone un'elevata resistenza al passaggio dell'aria, garantendo così un alto tasso di ricambio dell'aria sottostante alla rete. Mentre le chiome disposte a tendone, costituendo un corpo difficilmente attraversabile dall'aria, garantiscono una grande differenziazione tra gli ambienti aerei, superiore e inferiore, adiacenti ad esse. Quanto appena detto è stato confermato anche dall'analisi degli andamenti, relativi a ciascun livello, della pressione di vapore acqueo dell'aria e del suo deficit di pressione di vapore. Grazie al calcolo di questi due parametri, è stato possibile evidenziare che, nei tre giorni analizzati, l'aumento delle temperature medie dell'aria e la diminuzione del suo contenuto idrico, hanno comportato valori giornalieri di VDP crescenti. Tuttavia, analizzando tali tendenze ad ogni livello e per ciascun parametro, è emerso che i livelli 2 e 1 sono più resilienti rispetto al livello superiore: ciò significa che, relativamente a ciascun parametro, il suo tasso di variazione tra un giorno e l'altro è più accentuato per l'ambiente al di sopra della rete, intermedio per quello tra la rete e le chiome e minimo per il livello inferiore alle canopy. Questa evidenza suggerisce che l'organizzazione stratificata dell'ecosistema frutteto, unitamente alla cospicua e costante disponibilità idrica per la coltura, favorisce il mantenimento di un microclima interno più stabile e resiliente.

Molte delle considerazioni già fatte spiegano, almeno in parte e con le dovute premesse, anche agli andamenti giornalieri riscontrati ai tre differenti livelli relativi alle concentrazioni di CO<sub>2</sub>. L'anidride carbonica è un gas presente in atmosfera a concentrazioni relativamente basse e, soprattutto, la distribuzione delle sue sorgenti e dei

suoi pozzi varia drasticamente sia a livello spaziale che temporale, in relazione a quando e dove avvengono i processi di fotosintesi e di respirazione. Gli andamenti della concentrazione di CO<sub>2</sub> riscontrati ai tre livelli si intersecano frequentemente durante l'arco delle 24 ore. Non sorprende che il livello inferiore (ossia il volume d'aria compreso tra il suolo inerbito e le chiome) sia quello che subisce le variazioni giornaliere più drastiche: qui, infatti, l'elevato tasso di respirazione del suolo – il quale, peraltro, è parecchio arricchito di sostanza organica in corrispondenza delle file di piante – e l'alternanza tra la respirazione notturna e la cospicua fotosintesi della vegetazione durante le ore di luce hanno comportato variazioni giornaliere di CO<sub>2</sub> superiori ai 150 ppm. Durante le ore di luce, i valori di concentrazione di CO<sub>2</sub> dei due livelli interni alla rete sono costanti e pressoché identici tra loro (poco maggiori di 400 ppm), mentre all'esterno della rete si registrano valori maggiori, molto vicini al noto valore di 420 ppm. Durante la notte invece, le concentrazioni di CO<sub>2</sub> misurate sono molto più elevate per tutti e tre i livelli; tuttavia, a differenza di quanto ci si potesse aspettare, non è stata riscontrata una grande differenza tra l'ambiente del livello 2 e quello del livello 3. Rispetto alla CO<sub>2</sub>, sembra dunque che la rete abbia un effetto più marcato durante il giorno piuttosto che durante la notte: infatti, l'afflusso di CO<sub>2</sub> dal cielo verso le chiome durante le ore di fotosintesi è più ostacolato dalla rete rispetto a quanto non lo sia il suo deflusso (dal suolo verso il cielo) che si ha durante le ore di buio. Considerando che la turbolenza è più sviluppata durante il giorno che durante la notte, ci si aspetterebbe che le differenze concentrazioni di CO<sub>2</sub> tra i due livelli separati dalla rete sia più marcata quanto meno sviluppata è la turbolenza. Il fatto che le concentrazioni di CO<sub>2</sub> dell'aria presente appena al di sotto della rete si siano rivelate leggermente maggiori di quelle riscontrate al di sopra di essa solo per brevi periodi della notte è in disaccordo con quanto osservato da Siqueira *et al.* (2012) nelle loro simulazioni che hanno previsto l'utilizzo di un modello teorico creato ad hoc. Questi ultimi hanno infatti riportato che la presenza di tale struttura favorisce un discreto arricchimento notturno in CO<sub>2</sub> dell'aria interna rispetto al caso in cui non ci sia alcuna rete. Alla luce di queste considerazioni, si conclude che le dinamiche spaziotemporali dei gradienti della CO<sub>2</sub> relative agli ecosistemi naturali o seminaturali sono molto complesse e, di conseguenza, complessa risulta anche la comprensione degli effetti della rete su questo parametro.

Anche relativamente ai flussi di CO<sub>2</sub> si sono riscontrati andamenti differenti in base alle diverse quote a cui sono stati misurati indipendentemente. Mentre ai due livelli superiori i rispettivi sistemi eddy covariance hanno stimato dei flussi di CO<sub>2</sub> aventi valori e andamenti pressoché identici tra loro nell'intero arco del periodo analizzato, quanto riscontrato al livello inferiore è differente. Infatti, contrariamente a quanto osservato ai due livelli superiori, i quali hanno evidenziato un andamento giornaliero che oscilla tra valori di -20  $\mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$  durante il giorno e valori non superiori ai 10  $\mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$  durante la notte, al livello 1 i flussi di CO<sub>2</sub> si sono rivelati quasi sempre positivi, oltre che caratterizzati da un'elevata irregolarità. Al di sotto delle chiome, alla complessità legata all'intricata distribuzione delle sorgenti e dei pozzi della CO<sub>2</sub> atmosferica si è aggiunto anche il fatto che non vi fossero condizioni di turbolenza sufficienti affinché tale tecnica potesse essere performata correttamente. Le velocità del vento riportate per questa quota sono infatti troppo basse per poter misurare correttamente con l'eddy covariance i flussi turbolenti non solo della CO<sub>2</sub>, ma anche del calore sensibile e del calore latente (e di qualsiasi altra quantità). Al di sopra delle chiome e al di sopra della rete, la buona concordanza tra i flussi stimati suggerisce invece che ad entrambi questi livelli sussistono le condizioni turbolente necessarie alla corretta applicazione dell'eddy covariance. Tuttavia, seppur poco affidabili nei loro valori, la direzionalità dei flussi di CO<sub>2</sub> misurati al livello 1 è concorde a quanto ci si potesse aspettare: da una parte, un suolo mantenuto costantemente umido, ricco di sostanza organica e con temperature alte, ha dei tassi di respirazione molto elevati nell'intero arco delle 24, dall'altra, sebbene il suolo sia inerbito, la maggior parte della CO<sub>2</sub> viene sottratta dall'atmosfera da parte delle chiome del frutteto che si trovano al di sopra della quota di misura del livello 1. Perciò, almeno per quanto riguarda la CO<sub>2</sub> gassosa, il suo flusso dal suolo verso l'atmosfera è sempre risultato positivo al di sotto delle chiome. Allo stesso modo, al di sopra delle chiome e al di sopra della rete, l'alternanza tra i flussi ascendenti notturni e i flussi discendenti diurni sono anche in questo caso imputabili all'attività fotosintetica delle chiome, le quali sottraggono CO<sub>2</sub> all'atmosfera durante il giorno e, respirando durante la notte, contribuiscono, insieme al suolo, all'arricchimento in tale gas dell'aria ad esse circostante. Gli scambi di calore sensibile e latente sono stati anch'essi stimati continuamente ai tre differenti livelli grazie ai medesimi sistemi eddy covariance implicati nella misura dei

flussi di anidride carbonica. Al livello 1, a causa della ridotta velocità del vento e dei valori poco consistenti di radiazione netta, i flussi di calore sensibile e di calore latente sono risultati molto irregolari nel tempo, non mostrando alcun tipo di andamento giornaliero coerente. Infatti, come dimostrato da Tanny *et al.* (2018), all'interno delle chiome e, a maggior ragione al di sotto di esse, non sussistono le condizioni idonee alla corretta applicazione dell'eddy covariance, mentre tra le chiome e la rete e soprattutto all'esterno della rete tale tecnica può essere performata correttamente. Questa affermazione si è rivelata veritiera anche nel presente studio, in quanto gli andamenti dei flussi di calore misurati ai due livelli superiori sono in buon accordo con i rispettivi andamenti dei flussi di energia disponibile, mentre al livello inferiore ciò non accade. Ad entrambe le due quote superiori è stato riscontrato come il flusso di calore latente fosse preponderante rispetto al complementare flusso di calore sensibile. Quest'ultimo ha infatti valori molto vicini allo zero per tutto l'arco delle 72 ore analizzate, salvo alcuni picchi riscontrati durante le prime ore del pomeriggio per il livello situato al di sopra della rete. La preponderanza del flusso di calore sensibili rispetto al suo complementare è stata meglio visualizzata grazie agli andamenti della Bowen Ratio, ossia i valori derivanti dal rapporto tra i flussi di calore sensibile e latente riscontrati simultaneamente. Gli indici di Bowen sono risultati prossimi allo zero (o comunque tendenzialmente inferiori a 0.1) per tutti i periodi diurni dei tre giorni considerati, indicando, perciò, la tendenza dell'ecosistema frutteto a dissipare l'energia in eccesso attraverso l'evapotraspirazione di ingenti quantità di acqua. Questa evidenza potrebbe spiegare la resilienza dell'ambiente interno al frutteto: infatti, la ragione per cui all'innalzamento delle temperature medie dell'aria osservate all'esterno della rete non è corrisposto un altrettanto marcato aumento delle temperature medie dell'aria interna è probabilmente dovuta al fatto che il sistema – in quanto mantenuto in condizioni di elevata disponibilità idrica grazie alle frequenti ed abbondanti irrigazioni – si sia termoregolato aumentando il suo tasso di evapotraspirazione e trasferendo energia sotto forma di calore latente piuttosto che aumentando la sua temperatura media. Questa ipotesi è avvalorata dai valori cumulati giornalieri di energia trasferita sotto forma di calore latente, i quali sono aumentati di circa  $1 \text{ MJm}^{-2}$  da un giorno e il suo successivo per il livello 2 (vedi la Tabella 1 riportata nel capitolo precedente). Un'altra osservazione rispetto ai risultati riportati in Tabella 1 riguardano le quantità nette giornaliere di energia scambiata come calore sensibile: al livello 2 e 3, sia il secondo che il terzo giorno, è stato



riscontrato un trasferimento netto di calore sensibile tra l'ecosistema e l'atmosfera recante segno negativo. Ciò indica che in questi due giorni, il sistema frutteto, oltre al carico energetico dovuto al flusso di radiazione netta, ha dovuto gestire anche quello proveniente dall'atmosfera in forma di calore sensibile.

Infine, la valutazione dell'attendibilità dei flussi di calore stimati attraverso l'impiego della tecnica dell'eddy covariance è stata effettuata con il metodo della chiusura del bilancio energetico. Per le ragioni già discusse, l'analisi della chiusura del bilancio energetico non è stata effettuata per il livello sottostante le chiome, ma è stata condotta solamente per i due livelli superiori. Rispetto al livello 2, la retta che relaziona il flusso di energia disponibile con il flusso di energia consumata dai due flussi di calore è descritta dall'equazione  $y = 0.78x + 23.65$  e reca un coefficiente di determinazione pari a 0.90; mentre per il livello 3 tale relazione è descritta da  $y = 0.76x + 16.50$  e riporta un  $R^2$  uguale a 0.92. Poiché  $x$  rappresenta il flusso di energia disponibile e  $y$  quella consumata, il bilancio energetico non si chiude perfettamente in quanto circa il 23% dell'energia disponibile sembra non essere consumata dai due flussi di calore. Ciononostante, l'elevato coefficiente di determinazione riscontrato per entrambi i livelli evidenzia una forte relazione tra i valori di energia disponibile e consumata. Inoltre, sebbene le pendenze delle rette individuate non abbiano il valore ideale di 1, esse ricadono comunque all'interno dell'intervallo dei valori comunemente riportati in letteratura, il quale va 0.55 a 0.99 (Wilson *et al.*, 2002). Rappresentando un elemento di critica che inficia l'affidabilità delle stime dei flussi prodotte dall'eddy covariance, la non chiusura del bilancio energetico è tuttora molto dibattuta dalla comunità scientifica, la quale ha proposto numerose ipotesi riguardo alla apparente sottostima da parte dell'eddy covariance dei flussi di calore sensibile e latente: le limitazioni strumentali, le inadeguate condizioni di turbolenza, l'eterogeneità l'eterogeneità dell'ecosistema e la mancata individuazione e quantificazione di potenziali sorgenti e pozzi di energia sono solo alcuni degli aspetti che avrebbero potrebbero contribuire alla non chiusura del bilancio energetico.

## Conclusioni

Il presente studio propone la caratterizzazione microclimatica di un frutteto di *A. deliciosa* situato in sud Italia e protetto da una rete antigrandine. Dal punto di vista microclimatico, la peculiarità più interessante di questo ecosistema seminaturale è la sua organizzazione in strati paralleli al suolo, uniformi e ben distanziati tra loro. Infatti, le piante sono allevate a tendone e, al di sopra di esse, si trova una rete che copre tutta la superficie dell'impianto. Per queste ragioni, le misurazioni delle variabili micrometeorologiche di interesse sono state condotte continuativamente (per più giorni consecutivi) e simultaneamente a tre distinte quote (ovvero al di sotto delle chiome, tra le chiome e la rete e, infine, al di sopra di quest'ultima). Oltre ai parametri più convenzionali, grazie al corretto utilizzo di strumenti molto performanti che hanno reso possibile l'applicazione della tecnica dell'eddy covariance, sono stati misurati – sempre per ciascuna quota – anche i flussi verticali di calore (sensibile e latente) e di CO<sub>2</sub>.

In seguito all'elaborazione dei dati grezzi è stato possibile: (i) esaminare, in relazione ai diversi periodi del giorno, quali siano le implicazioni della peculiare struttura stratificata dell'impianto sui gradienti verticali delle principali variabili micrometeorologiche investigate; (ii) quantificare e confrontare l'intensità degli scambi verticali di energia e materia che avvengono alle diverse quote del sistema frutteto; (iii) valutare, attraverso l'analisi della chiusura del bilancio energetico, la correttezza dei flussi di calore calcolati con la tecnica dell'eddy covariance.

In generale, i risultati ottenuti hanno messo in evidenza che la rete in questione ha una moderata – se non minima – capacità di alterare i flussi verticali di energia e materia che hanno luogo tra l'ecosistema e la sovrastante atmosfera. Di conseguenza, le caratteristiche fisiche, dinamiche e composizionali dell'aria compresa tra le chiome e la rete non si sono rivelate molto differenti da quanto riscontrato esternamente a tale struttura. Tuttavia, il microclima interno al frutteto è in parte influenzato dalla presenza della rete e ciò è stato riscontrato per quasi tutti i parametri micrometeorologici analizzati. Tra questi ultimi, l'effetto più significativo è stato osservato sulla velocità media del vento, la quale, al di sotto della rete, aveva valori più che dimezzati rispetto a quella misurata esternamente alla rete.

Le chiome invece, costituendo una barriera estremamente più significativa al passaggio di energia e materia tra i due ambienti aerei da esse separati, promuovono il mantenimento di condizioni microclimatiche interne molto differenti rispetto a quanto riscontrato al di sopra di esse. Un altro aspetto determinante nell'influenzare le caratteristiche microclimatiche del frutteto riguarda la continua e costante disponibilità di acqua per il sistema: infatti, come evidenziato dai valori di Bowen Ratio, l'ecosistema gestisce la maggior parte dell'energia netta disponibile attraverso il processo di evapotraspirazione e, perciò, sia le temperature che i livelli di umidità osservati sono in parte determinati da tale abbondanza d'acqua, che come ben noto, ha un'elevata capacità di termoregolazione dell'ambiente.

Infine, l'analisi della chiusura del bilancio energetico ha dimostrato che, sia nello spazio compreso tra le chiome e la rete che all'esterno di quest'ultima, c'erano le condizioni idonee per la corretta applicazione dell'eddy covariance. Infatti, sia le pendenze che i coefficienti di determinazione ottenuti per le rispettive rette di regressione individuate alle due quote superiori sono in linea con quanto riportato in letteratura. Per contro, al di sotto delle chiome non sussistono condizioni di turbolenza sufficienti affinché tale tecnica possa produrre stime affidabili.

Nonostante l'utilizzo di reti in agricole sia sempre più diffuso a livello globale, la comprensione e la quantificazione analitica di quali siano le complesse implicazioni microclimatiche della loro presenza rimane tuttora poco esplorata. Riportando un caso di studio particolare e complesso, l'auspicio è che il presente studio possa fornire spunti stimolanti per la ricerca futura in quest'ambito.

## Bibliografia

- Allen, L. H. (1975). Shade-cloth microclimate of soybeans. *Agronomy Journal*, 67(2), 175-181.
- Baldocchi, D. (2014). Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global change biology*, 20(12), 3600-3609.
- Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global change biology*, 9(4), 479-492.
- Baldocchi, D. D., Hincks, B. B., & Meyers, T. P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69(5), 1331-1340.
- Brovkin, V. (2002). Climate-vegetation interaction. *Journal de Physique IV (Proceedings)* (Vol. 12, No. 10, pp. 57-72). EDP sciences.
- Demrati, H., Boulard, T., Bekkaoui, A., Bouirden, L., (2001). Natural ventilation and microclimate performance of a large-scale banana greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 80 (3), 261-271.
- Desmarais, G., Ratti, C., & Raghavan, G. S. V. (1999). Heat transfer modelling of screenhouses. *Solar energy*, 65(5), 271-284.
- Dicken, U., Cohen, S., & Tanny, J. (2013). Effect of plant development on turbulent fluxes of a screenhouse banana plantation. *Irrigation Science*, 31(4), 701-713.
- Doorenbos J. (1976). Agro-meteorological field station. Paper n. 27 FAO, Roma.
- Ferguson AR. (1984). Kiwifruit: a botanical review. *Horticultural Reviews* 6: 1-64
- Foken, T., Aubinet, M., & Leuning, R. (2012). The eddy covariance method. In *Eddy covariance* (pp. 1-19). Springer, Dordrecht.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., ... & Zaehle, S. (2019). Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11(4), 1783-1838.
- Gucci, R., Massai, R., Xiloyannis, C., & Flore, J. A. (1996). The Effect of Drought and Vapour Pressure Deficit on Gas Exchange of Young Kiwifruit (*Actinidia deliciosa* var. *deliciosa*) Vines. *Annals of Botany*, 77(6), 605–613.

- Guo, Z., Liu, H., Yuan, H., Yang, G., Zheng, J., & Chen, L. (2015). Insect-proof nets affect paddy field microclimate parameters and grain quality of different japonica rice varieties. *Journal of crop science and biotechnology*, 18(2), 73-81.
- Healey, K. D., Rickert, K. G., Hammer, G. L., & Bange, M. P. (1998). Radiation use efficiency increases when the diffuse component of incident radiation is enhanced under shade. *Australian Journal of Agricultural Research*, 49, 665-672.
- Il Bilancio Idrologico Gis BAsed a scala Nazionale su Griglia regolare – BIGBANG: metodologia e stime. Rapporto sulla disponibilità naturale della risorsa idrica ISPRA. Rapporti, 339/2021.
- Judd M. J., McAneney K. J., Wilson K. S. (1989). Influence of water stress on kiwifruit growth. *Irrigation Science*, 10, 303-311.
- Kittas, C., Katsoulas, N., Rigakis, V., Bartzanas, T., & Kitta, E. (2012). Effects on microclimate, crop production and quality of a tomato crop grown under shade nets. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(1), 7-12.
- Leogrande, R., Lopodota, O., & Losavio, N. (2007). STUDIO AGRO-CLIMATICO DELL'AREA METAPONTINA.
- Link, T. E., Marks, D., & Hardy, J. P. (2004). A deterministic method to characterize canopy radiative transfer properties. *Hydrological processes*, 18(18), 3583-3594.
- Mahmood, A., Hu, Y., Tanny, J., & Asante, E. A. (2018). Effects of shading and insect-proof screens on crop microclimate and production: A review of recent advances. *Scientia Horticulturae*, 241, 241-251.
- Monson, R., & Baldocchi, D. (2014). *Terrestrial Biosphere-Atmosphere Fluxes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (1990). *Principles of Environmental Physics*. (2nd edn.) Edward Arnold.
- Montgomery, R. B. (1948). Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 5(6), 265-274.
- Möller, M., & Assouline, S. (2007). Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements. *Irrigation Science*, 25, 171-181.
- Möller, M., Cohen, S., Pirkner, M., Israeli, Y., & Tanny, J. (2010). Transmission of short-wave radiation by agricultural screens. *Biosystems Engineering*, 107(4), 317-327.

Möller, M., Tanny, J., Cohen, S., & Teitel, M. (2003). Micrometeorological characterization in a greenhouse. *Acta Horticulturae*, 614, 445-451.

Möller, M., Tanny, J., Li, Y., & Cohen, S. (2004). Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127(1-2), 35-51.

Obukhov, A. M. (1951). Charakteristiki mikrostruktury vetra v prizemnom sloje atmosfery (Characteristics of the micro-structure of the wind in the surface layer of the atmosphere). *Izv AN SSSR, Ser Geofiz*, 3, 49-68.

Pirkner, M., Tanny, J., Shapira, O., Teitel, M., Cohen, S., Shahak, Y., & Israeli, Y. (2014). The effect of screen type on crop micro-climate, reference evapotranspiration and yield of a greenhouse banana plantation. *Scientia Horticulturae*, 180, 32-39.

Pitacco, A., Meggio, F., Giulivo, C. (2007a). Bilancio idrico e del carbonio del vigneto misurati con metodi micrometeorologici. *Italus Hortus*, 14: 99-100.

Pitacco, A., Meggio, F., Giulivo, C. (2007b). Measurement of seasonal evapotranspiration and CO<sub>2</sub> fluxes by eddy covariance technique over a spur-pruned cordon vineyard. *Congress on Climate and Viticulture, Zaragoza*, pp. 36-40.

Raupach, M.R., Finnigan, J. J., Brunet, Y., (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy. *Boundary-layer Meteorology*. 78, 351–382.

Reynolds, O. (1895). IV. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Philosophical transactions of the Royal Society of London.(a.)*, (186), 123-164.

Rigakis, N., Katsoulas, N., Teitel, M., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2015). A simple model for ventilation rate determination in greenhouses. *Energy and Buildings*, 87, 293-301.

Siqueira, M., Katul, G., & Tanny, J. (2012). The effect of the screen on the mass, momentum, and energy exchange rates of a uniform crop situated in an extensive greenhouse. *Boundary-layer Meteorology*, 142(3), 339-363.

Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.

Swinbank, W. C. (1951). The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 8(3), 135-145.

Tanny, J. (2013). Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. *Biosystems Engineering*, 114(1), 26-43.

- Tanny, J., & Cohen, S. (2003). The effect of a small shade net on the properties of wind and selected boundary layer parameters above and within a citrus orchard. *Biosystems Engineering*, 84(1), 57-67.
- Tanny, J., Cohen, S., & Teitel, M. (2003). Screenhouse microclimate and ventilation: an experimental study. *Biosystems engineering*, 84(3), 331-341.
- Tanny, J., Cohen, S., Grava, A., Naor, A., & Lukyanov, V. (2008, April). The effect of shading screens on microclimate of apple orchards. In *International Symposium on Strategies Towards Sustainability of Protected Cultivation in Mild Winter Climate 807* (pp. 103-108).
- Tanny, J., Dicken, U., & Cohen, S. (2010). Vertical variation in turbulence statistics and energy balance in a banana screenhouse. *Biosystems engineering*, 106(2), 175-187.
- Tanny, J., Haijun, L., & Cohen, S. (2006). Airflow characteristics, energy balance and eddy covariance measurements in a banana screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139, 105-118.
- Tanny, J., Lukyanov, V., Neiman, M., Cohen, S., Teitel, M., & Seginer, I. (2018). Energy balance and partitioning and vertical profiles of turbulence characteristics during initial growth of a banana plantation in a screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256, 53-60.
- Tanny, J., Möller, M., & Cohen, S. (2009). Aerodynamic properties of boundary layers along screens. *Biosystems Engineering*, 102, 171-179.
- Tanny, J., Teitel, M., Barak, M., Esqira, Y., & Amir, R. (2007, October). The effect of height on screenhouse microclimate. In *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007 801* (pp. 107-114).
- Teitel, M., & Segal, I. (1995). Net thermal radiation under shading screens. *Journal of agricultural engineering research*, 61(1), 19-25.
- Teitel, M., & Wenger, E. (2012). The effect of screenhouse roof shape on the flow patterns-CFD simulations. *Acta Horticulturae*, (927), 603-610.
- Teitel, M., Garcia-Teruel, M., Ibanez, P. F., Tanny, J., Laufer, S., Levi, A., & Antler, A. (2015). Airflow characteristics and patterns in screenhouses covered with fine-mesh screens with either roof or roof and side ventilation. *Biosystems Engineering*, 131, 1-14.
- Teitel, M., Liang, H., Vitoshkin, H., Tanny, J., & Ozer, S. (2020). Airflow patterns and turbulence characteristics above the canopy of a tomato crop in a roof-ventilated insect-proof screenhouse. *Biosystems Engineering*, 190, 184-200.

Teitel, M., Peiper, U. M., & Zvieli, Y. (1996). Shading screens for frost protection. *Agricultural and forest meteorology*, 81(3-4), 273-286.

Waggoner, P., Pack, A., & Reifsnyder, W. (1959). The climate of shade. A tobacco tent and a forest stand compared to open fields. Connecticut Agricultural Experimental Station, Bulletin 626.

Webster, C., Rutter, N., Zahner, F., & Jonas, T. (2016). Measurement of incoming radiation below forest canopies: A comparison of different radiometer configurations. *Journal of Hydrometeorology*, 17(3), 853-864.

Willis, G. E., Deardorf, J. W. (1976). On the use of Taylor's translation hypothesis for diffusion in the mixed layer. *Q. J. Roy. Soc. A164*, 476-490.

Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., ... & Verma, S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4), 223-243.

Woodward, F. I., & Williams, B. G. (1987). Climate and plant distribution at global and local scales. *Vegetatio*, 69(1), 189-197.

Xu, G., Liu, X., Wang, Q., Xiong, R., & Hang, Y. (2017). Effects of greenhouse cultivation and organic materials incorporation on global warming potential in rice fields. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(7), 6581-6591.