

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
TERRITORIALE



LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

MISURE DI FLUSSI DI CARBONIO IN COLTIVAZIONI
IRRIGUE PER IL CALCOLO
DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE E DELLE CONDIZIONE
DI STRESS IDRICO

LORENZO CALINI

RELATORE:

Prof. MARCO MANCINI

CORELATORE:

Prof.sa CHIARA CORBARI

ANNO ACCADEMICO: 2022/2023

Indice

Introduzione	ix
0.1 Flussi di Carbonio ed acqua in un agro-ecosistema	ix
0.2 Processi di fotosintesi e respirazione della pianta	xi
1 Stato dell'arte	1
2 Tecnica Eddy Covariance	5
2.1 Strumenti di misura	9
2.1.1 La stazione eddy covariance	9
2.2 Correzione dei dati	13
2.2.1 Correzioni strumentali del dato	14
2.2.2 Correzioni fisiche del dato	15
2.2.3 Temperatura sonica	16
2.2.4 Stabilità dell'atmosfera	16
2.3 Chiusura bilancio energetico	16
2.4 Siti e attività sperimentali	17
2.4.1 Sito sperimentale del Chiese	17
2.4.2 Sito sperimentale di Vignola	18
2.4.3 Sito sperimentale Noceto	18
3 Analisi preliminare	19
3.1 Analisi dei dati con cadenza semioraria	19
3.1.1 Correlazioni dei dati semiorari	22
3.2 Analisi dei dati mediati giornalmente	24
4 Studio della dinamica dei flussi di CO₂	27
4.1 Bilancio dei flussi di carbonio in un agro ecosistema	27
4.2 Analisi dei dati di picco della curva di CO ₂	29
4.3 Dipendenza dal periodo fenologico	31
4.3.1 LAI Leaf area index	31
4.3.2 Analisi dei dati rispetto al LAI	33

4.4	Metodo di analisi della CO ₂ in coltivazioni irrigue	34
4.4.1	Esclusione dei dati di CO ₂ in funzione dell'andamento del LAI	35
4.4.2	Esclusione dei dati di CO ₂ in funzione della radiazione solare	36
4.5	Risultati	37
5	Stima del conduttanza stomatica	45
5.1	Equazione Penman-Monteith	45
5.1.1	Resistenza areodinamica r_a	46
5.1.2	Resistenza superficiale r_s	47
5.2	Misure di CO ₂ per la stima dell'evapotraspirazione	47
5.2.1	Conduttanza superficiale G_s	48
5.2.2	Risultati	48
5.3	Calibrazione	51
5.4	Sensibilità della CO ₂ all'irrigazione	53
5.5	Uso delle misure di CO ₂ per il controllo dell'evapotraspirazione	54
	Bibliografia	58

Elenco delle figure

1	Flussi idrici e volume di acqua immagazzinato nel suolo esplorato dall'apparato radicale.	x
2	Flussi e accumuli di carbonio nel suolo esplorato dall'apparato radicale e nella vegetazione.	x
3	Sezione trasversale di una foglia, che rivela la presenza del tessuto fotosintetico, cioè il mesofillo. La CO_2 entra nella foglia dagli stomi mentre l' H_2O viene portata attraverso i vasi . . .	xii
4	Cellule di una pianta con numerosi cloroplasti al microscopio ottico e schema di un cloroplasto dove i pigmenti necessari per la cattura dell'energia luminosa fanno parte delle membrane tilacoidali mentre gli enzimi responsabili della sintesi dei carboidrati si trovano nello stroma	xiii
5	equazioni generali della fotosintesi e della respirazione cellulare si può considerare dove i reagenti della prima reazione (CO_2 e H_2O) sono i prodotti finali della respirazione cellulare	xiii
1.1	Rappresentazione di un flusso d'aria con vortici al suo interno (eddies). Da G.Burba.	2
2.1	Esempio dell'area di footprint (a sinistra) e del Constant flux Layer (a destra). Da Licor Webinar. www.licor.com	6
2.2	Stazione eddy covariance di Vignola	9
2.3	Anemometro sonico	10
2.4	Gas-analyser	11
2.5	(a) Radiometro a quattro componenti; (b); (c) Termo igrometro posizionato in schermo solare;	12
2.6	sonde TDR per la misura dell'umidità del suolo	13
2.7	datalogger utilizzato nella campagna di monitoraggio di Vignola	14
2.8	Chiusura bilancio energetico dei dati misurati nella stazione per le campagne di Vignola e del Chiese	17

3.1	Andamenti temporali della CO ₂ e dell'umidità del suolo misurata a 20 cm con la sonda TDR	19
3.2	Andamenti temporali della CO ₂ e della temperatura ambiente	20
3.3	Andamenti temporali della CO ₂ e della radiazione entrante ad onde corte	20
3.4	Andamenti temporali della CO ₂ e dell'umidità relativa	21
3.5	Andamenti temporali della CO ₂ e del calore latente (evapotraspirazione)	21
3.6	Andamenti temporali della CO ₂ e della velocità del vento misurata dall'anemometro sonico	22
3.7	Correlazione del dato di CO ₂ con cadenza semioraria rispetto a tutte le variabili	23
3.8	Correlazione del dato di CO ₂ mediato giornalmente	24
4.1	Andamenti temporali del NEE dal 15/05/2008 (semina) al 23/08/2008 (raccolto) con i dati presi da FLUXNET	28
4.2	Trend diurni dei flussi di CO ₂ dell'ecosistema in diverse epoche temporali della stagione di crescita del mais. NEE, Net Ecosystem CO ₂ Exchange; GPP, primario lordo Produzione; Reco, Respirazione dell'ecosistema.	29
4.3	Confronto degli andamenti dei picchi di CO ₂ rispetto all'umidità del suolo	30
4.4	Correlazione Minimi di NEE con i corrispettivi valori: RH(umidità relativa), LE (calore latente di vaporizzazione), TA (temperatura ambiente), WS (velocità del vento),SW-IN (radiazione entrante ad onde corte), SM (umidità del suolo)	31
4.5	Trend del valore di LAI per le campagne di monitoraggio osservate	32
4.6	Correlazione NEE/LAI con: RH(umidità relativa), LE (calore latente di vaporizzazione), TA (temperatura ambiente), WS (velocità del vento),SW-IN (radiazione entrante ad onde corte), SM (umidità del suolo)	34
4.7	Identificazione del periodo in cui il LAI rimanga costante e massimo per la campagna del 2018	35
4.8	Esempio dell'individuazione delle giornate da escludere in funzione del dato di radiazione entrante ad onde corte (SW-IN)	36
4.9	Mais 2016: Andamenti semiorari dell'NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili.Trend della temperatura ambiente e della CO ₂	38

4.10	Mais 2018 :Andamenti semiorari dell NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili.Trend della temperatura ambiente e della CO ₂ . . .	39
4.11	Noci 2020 :Andamenti orari dell NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili.Trend della temperatura ambiente e della CO ₂	40
4.12	Noci 2021 :Andamenti orari dell NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili.Trend della temperatura ambiente e della CO ₂	41
4.13	Pere 2022 :Andamenti orari dell NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili.Trend della temperatura ambiente e della CO ₂	43
5.1	Rappresentazione semplificata della resistenza superficiale ed aerodinamica nel flusso di vapore acqueo (FAO 56 [1])	45
5.2	Andamenti temporali e cumulate dell 'evaporazione espressa in mm di acqua per la campagna del mais nel 2018	49
5.3	Andamenti temporali e cumulate dell 'evaporazione espressa in mm di acqua per la campagna del pereto nel 2022	50
5.4	Cumulate con il valore di conduttanza stomatica G_s calibrato	51
5.5	Resistenza superficiale calcolata con il modello Allen et al. (FAO 56) [1] e con il modello Shen Tan et al. [2] pre e post calibrazione	54

Introduzione

0.1 Flussi di Carbonio ed acqua in un agro-ecosistema

Il lavoro analizza le misure dei flussi di carbonio in agro-ecosistemi di diversa tipologia al fine di:

- comprendere e definire il valore di contenuto idrico del suolo minimo in cui la coltura inizia a presentare condizioni di stress. Questo valore risulta inoltre il minimo valore di umidità del suolo necessario per programmare una corretta applicazione di irrigazione di precisione con il fine ultimo di risparmiare acqua.
- Stimare la resistenza stomatica ai fini del calcolo dell'evapotraspirazione effettiva per le colture erbacee e arboree analizzate.

Le misure di flusso CO_2 , ottenute tramite tecnica eddy covariance sono quindi analizzate nel seguito come possibile indicatore dello stato stress della pianta rispetto al contenuto idrico del suolo, cercando di approfondire le conoscenze di letteratura (Allen, paper no. 56. crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements [1]) che definiscono, in funzione del tipo di suolo e di coltura, il contenuto idrico minimo del suolo oltre il quale si ha stress della coltura e quindi riduzione della produzione e delle caratteristiche commerciali. Successivamente si è investigato la potenzialità delle misure di flusso di CO_2 per la stima della resistenza stomatica della vegetazione attraverso il modello di Shen Tan et al. [2] al fine di migliorare la stima del flusso di evapotraspirazione effettiva. Le misure dei flussi di carbonio negli agro-ecosistemi sono tutt'altro che semplici, a causa sia delle difficoltà pratiche nello svolgimento delle misure, sia della variabilità temporale delle caratteristiche degli agro-ecosistemi. Per poter andare ad analizzare questo tipo di fenomeno, risulta dunque propedeutico partire riassumendo i flussi e gli accumuli di carbonio e di acqua che interessano gli agro-ecosistemi schematizzati nelle Figure 1 e 2.

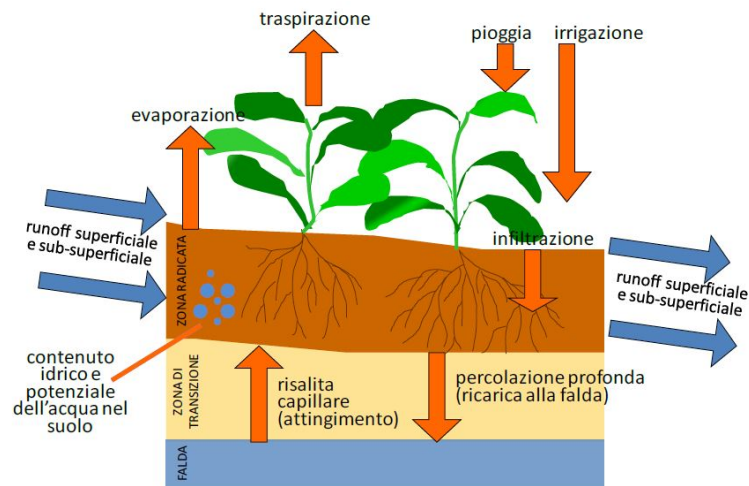


Figura 1: Flussi idrici e volume di acqua immagazzinato nel suolo esplorato dall'apparato radicale.

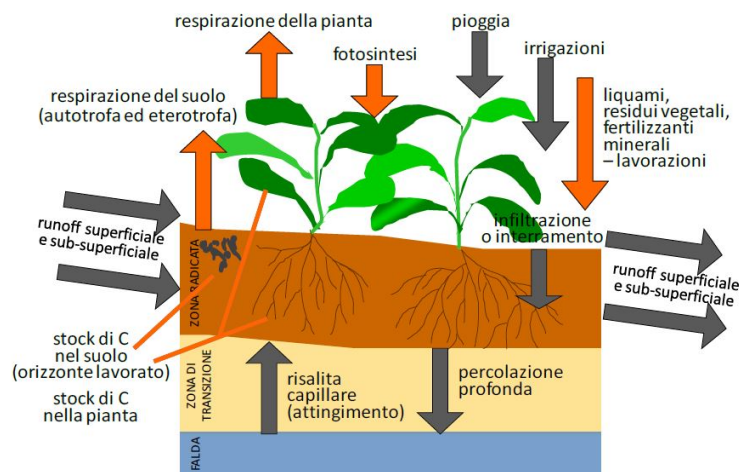


Figura 2: Flussi e accumuli di carbonio nel suolo esplorato dall'apparato radicale e nella vegetazione.

I flussi sopra rappresentati sono stati misurati grazie a dati provenienti da stazioni eddy-covariance installate durante diverse campagne di monitoraggio in campi irrigati di diversa natura. Nel caso di studio, vengono osservati i dati relativi alle campagne svolte in coltivazioni di mais, pere e noci nei siti di interesse meglio descritti nei capitoli successivi. Nelle figure 1 e 2 in rosso sono riportati i principali processi sui quali si sono concentrate le attività di monitoraggio e modellazione dei dati, gli stessi sono stati successivamente

0.2. PROCESSI DI FOTOSINTESI E RESPIRAZIONE DELLA PIANTAxi

utilizzati in questo elaborato.

Per quanto riguarda l'acqua, i principali flussi in aree agricole di pianura caratterizzate da una superficie di falda vicina al piano campagna, sono: la pioggia, l'irrigazione e l'eventuale risalita capillare come contributi entranti; L'evaporazione dal suolo, la traspirazione dalla coltura e la percolazione al di sotto della zona radicata come uscenti. Il contenuto idrico ed il potenziale matriciale dell'acqua nel suolo, legati l'uno all'altro dalla curva di ritenzione (caratteristica del tipo di suolo e dunque variabile per i diversi orizzonti pedologici), sono le variabili principali che caratterizzano lo stato dell'acqua nel terreno.

Focus principale del presente studio, sul quale è stata riposta la maggior attenzione, sono i flussi di carbonio. Come illustrato dalla figura 2 questi flussi possono essere assunti come "fonti" o "serbatoi" per i suoli e la vegetazione. I principali processi in gioco sono: la fotosintesi che permette la fissazione della CO₂ nei tessuti vegetali e la respirazione della coltura che, viceversa, porta ad una perdita di carbonio facendolo tornare in atmosfera sotto forma dello stesso gas serra. Un ritorno della CO₂ in atmosfera a discapito del carbonio stoccato nel suolo si verifica anche in seguito alla respirazione del suolo stesso, che può essere sia radicale che eterotrofa (ad opera di batteri). L'apporto di liquami e residui vegetali costituisce il principale input di carbonio per i suoli. Potenziali serbatoi di accumulo per il carbonio sono il suolo stesso, in particolare l'orizzonte agrario (0-40 cm) e la coltura.

0.2 Processi di fotosintesi e respirazione della pianta

La fotosintesi è il processo che converte biologicamente l'energia luminosa in energia chimica, a partire da sostanze inorganiche produce sostanze organiche e ossigeno.

Le piante sono organismi autotrofi, dunque tutti i tessuti delle piante verdi possono potenzialmente fotosintetizzare; Nonostante ciò, nella maggior parte delle piante la fotosintesi avviene nelle foglie. Nello specifico, le cellule in uno strato intermedio di tessuto fogliare chiamato mesofillo sono il sito principale della fotosintesi. Piccoli pori, chiamati stomi, che si trovano sulla superficie delle foglie nella maggior parte delle piante e lasciano che l'anidride carbonica e l'ossigeno si diffonda, partendo dall'atmosfera, nello strato del mesofillo. Ogni cellula del mesofillo contiene organelli chiamati cloroplasti, che sono specializzati per svolgere le reazioni di fotosintesi.

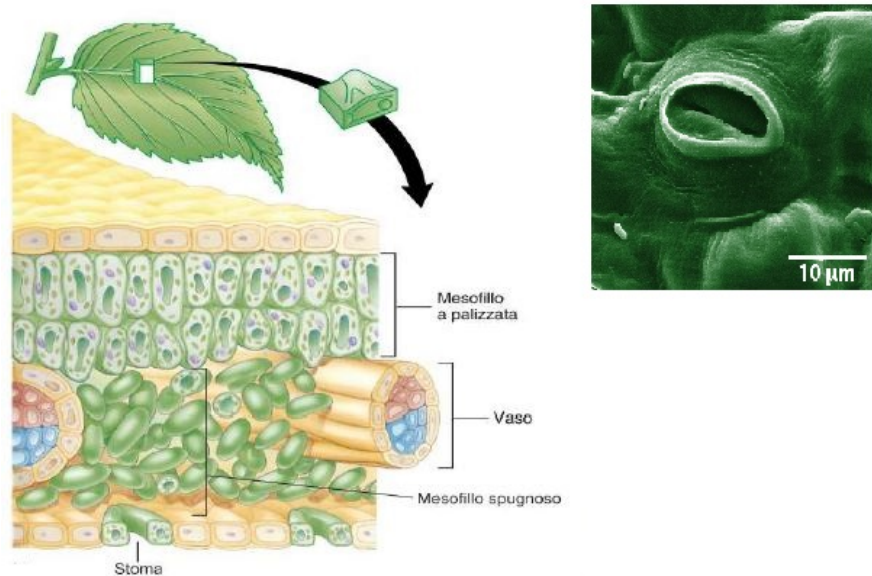


Figura 3: Sezione trasversale di una foglia, che rivela la presenza del tessuto fotosintetico, cioè il mesofillo. La CO_2 entra nella foglia dagli stomi mentre l' H_2O viene portata attraverso i vasi

All'interno di ogni cloroplasto, come visibile in Figura 4, strutture a forma di disco chiamate tilacoidi sono disposte in pile come pile di frittelle conosciute come grana. La membrana di ciascun tilacoide contiene pigmenti di colore verde chiamati clorofille che assorbono la luce. Lo spazio pieno di liquido attorno è chiamato stroma e lo spazio all'interno dei dischi tilacoidi è noto come spazio tilacoide. Diverse reazioni chimiche si verificano nelle diverse parti del cloroplasto.

0.2. PROCESSI DI FOTOSINTESI E RESPIRAZIONE DELLA PIANTA^{xiii}

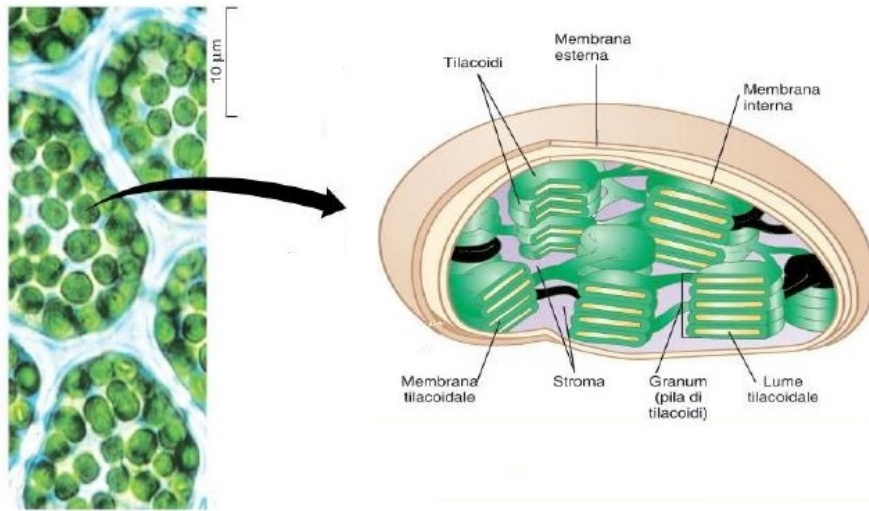


Figura 4: Cellule di una pianta con numerosi cloroplasti al microscopio ottico e schema di un cloroplasto dove i pigmenti necessari per la cattura dell'energia luminosa fanno parte delle membrane tilacoidali mentre gli enzimi responsabili della sintesi dei carboidrati si trovano nello stroma

Ma la fotosintesi non è l'unico processo che fa in modo che venga generato un flusso di carbonio, infatti questo viene riportato in atmosfera sotto forma di anidride carbonica tramite i processi di respirazione delle piante.

Osservando la reazione di fotosintesi e respirazione delle piante, rappresentata in modo molto semplificato, visibile in figura 5 possiamo notare quali sono i materiali iniziali e finali dei processi. Nella fotosintesi, CO_2 e H_2O danno luogo alla formazione di carboidrati e di ossigeno molecolare. Nella respirazione, carboidrati e ossigeno riformano CO_2 e H_2O

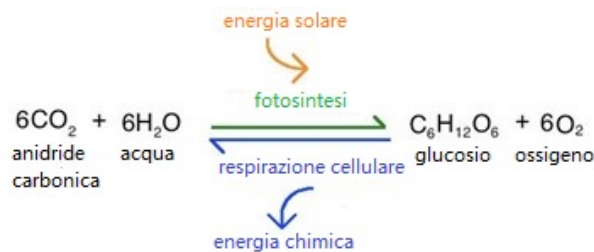


Figura 5: equazioni generali della fotosintesi e della respirazione cellulare si può considerare dove i reagenti della prima reazione (CO_2 e H_2O) sono i prodotti finali della respirazione cellulare

Capitolo 1

Stato dell'arte

Il seguente lavoro di tesi si basa sullo studio e la comprensione, tramite la tecnica dell'eddy covariance, dei flussi netti di CO₂ misurati dalle stazioni montate in diversi campi irrigati con coltivazioni arboree orticole ed erbacee. Durante le campagne di monitoraggio svolte dal Politecnico di Milano per il progetto SIM [3] sono stati misurati i dati per coltivazioni erbacee di mais nel Consorzio irriguo del chiese (www.consorziodibonificachiese.it) e per coltivazioni arboree di pere e noci nel consorzio della bonifica burana (www.consorzioburana.it).

La eddy covariance è un sistema di monitoraggio dei flussi turbolenti di gas in particolare CO₂ e H₂O, che consente di misurare anche i flussi del momento, del calore sensibile e del calore latente in aree di ampie estensioni (Aubinet et al., [4]). È una tra le tecniche utilizzate per misurare i flussi gassosi in ecosistemi, quantificare le perdite di acqua come vapore acqueo all'interno di campi agricoli o per monitorare i tassi di emissione dei gas in un sito predi- sposto al loro stoccaggio (Burba,[5]). I flussi gassosi possono generarsi dal suolo, dagli specchi d'acqua, dalla copertura vegetale e da aree industriali ed urbane. Questo metodo si basa sulla misurazione diretta e veloce del trasporto dei gas da parte del vento e quindi sulla misurazione del flusso turbolento all'interno del boundary layer (strato limite della quantità di moto), ossia lo strato di atmosfera a diretto contatto con il suolo (Baldocchi, [6]). Pur essendo un metodo che consente una misurazione diretta dei flussi turbolenti di gas, questa tecnica richiede una profonda conoscenza sia della strumentazione che del trattamento dei dati. Sebbene negli ultimi anni siano stati fatti numerosi sforzi per uniformare le metodologie di acquisizione e trattamento dei dati è ancora lungo il percorso a causa del cambio delle metodiche in relazione allo studio che si vuole perseguire (Burba, [5]). In un agro-ecosistema gli scambi di CO₂ che avvengono con l'atmosfera, il flusso sarà dato dal quantitativo di CO₂ che si sposta dalla vegetazione all'atmo-

sfera e viceversa. In particolare, l'eddy covariance consente il monitoraggio continuo dei flussi netti degli ecosistemi. Considerando una coltivazione di mais o piante da frutto, come nei casi studio, la CO_2 entra negli ecosistemi attraverso il processo di fotosintesi ed esce attraverso il processo di respirazione dell'ecosistema. Facendo il bilancio tra la fotosintesi e la respirazione si ottiene quello che viene definito lo scambio netto di CO_2 dell'ecosistema (NEE) e ciò consente di valutare se l'ecosistema rappresenta un pozzo, ossia assorbe CO_2 , o una sorgente di CO_2 , quindi la rilascia. Il flusso di CO_2 che si sposta da e verso la vegetazione è legato al vento. Questo flusso d'aria può essere immaginato come un flusso orizzontale formato da un numero considerevole di eddies, ossia piccoli e grandi vortici di aria idealizzati come strutture approssimativamente circolari, come illustrato in 1.1.

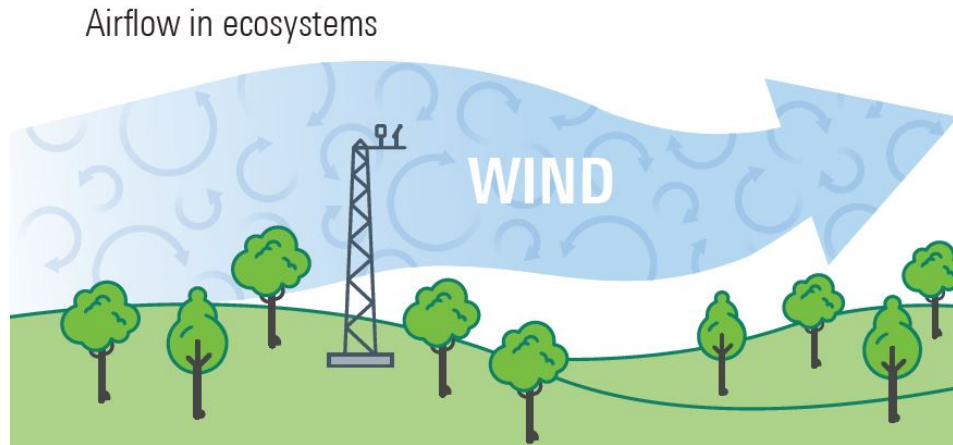


Figura 1.1: Rappresentazione di un flusso d'aria con vortici al suo interno (eddies). Da G.Burba.

Ognuno di questi vortici è formato dalle tre componenti tridimensionali del vento che comprendono il movimento verticale dell'aria. Gli eddies spostandosi verso l'alto e verso il basso trasportano con sé le molecole di gas che si trovano nell'aria, in particolare la CO_2 . Questo movimento è quello che viene misurato direttamente da una torre di eddy covariance. Gli eddies non hanno tutti le stesse dimensioni, ma ci possono essere vortici più grandi, di solito lontani dal suolo, e vortici più piccoli, di solito a distanza ravvicinata dal suolo. Questi vortici si spostano a velocità diverse e trasportano più o meno gas a seconda delle loro dimensioni. In generale, in un flusso d'aria ci sarà sempre il contributo di diversi eddies che ruotano a velocità diverse nell'arco di tempo che va dalle ore al 1/10 di secondo. Rimanendo più vicini al suolo avremo frequenze più alte (vortici più piccoli e veloci), mentre

allontanandoci dal suolo avremo frequenze più basse (vortici più grandi e lenti). In genere, per avere una stima il più affidabile possibile, i flussi vengono registrati con cadenza semi oraria o oraria così da minimizzare le perdite delle basse frequenze. Durante questo periodo le stazioni di eddy covariance registrano i movimenti turbolenti dell'aria e le informazioni relative alla velocità del vento, stimando gli scambi di gas e di energia che avvengono tra l'atmosfera nell'area di interesse. È importante comunque considerare che il flusso misurato riguarda solo il trasporto turbolento che si genera nell'area di interesse; perciò occorre che questo meccanismo sia ben sviluppato così da rendere trascurabili gli altri meccanismi di trasporto come l'avvezione e la diffusione molecolare.

Il metodo di analisi dei flussi di CO₂ emanati dalle piante che viene studiato in questo elaborato ha il principale obiettivo di andare a trovare una correlazione dei dati misurati dalla stazione eddy con quelli del contenuto idrico del terreno svolti durante le campagne di monitoraggio attraverso le sonde di umidità che misurano l'umidità del suolo tramite la tecnica TDR (Time Domain Reflectivity) in modo da caratterizzare il comportamento dei flussi in risposta all'irrigazione. Per poter svolgere questo tipo di analisi sono state prese in considerazione tutte le variabili che si ritiene possano giocare un ruolo fondamentale nei processi di scambio di carbonio che le piante svolgono quali :

- Umidità del suolo SM
- Umidità relativa RH
- Velocità del vento WS
- Temperatura ambiente Ta
- Calore latente di vaporizzazione LE
- Dimensioni della superficie fogliare di scambio (LAI)

Studiando gli andamenti delle seguenti variabili in modo approfondito si è tentato di capire quale possa essere la risposta delle piante nei processi di respirazione e fotosintesi quando queste vengono sottoposte ad un regime irriguo.

Capitolo 2

Tecnica Eddy Covariance

La tecnica eddy covariance è generalmente utilizzata per la stima dei flussi di massa e di energia scambiati nei sistemi SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer). La tecnica eddy covariance si basa su un metodo statistico che utilizza misurazioni ad alta frequenza di componenti scalari (concentrazione di vapore acqueo in atmosfera, temperatura e CO₂) associate alla misura della velocità del vento al fine di stimare i flussi di calore latente, sensibile e di CO₂. L'anemometro sonico tridimensionale e il gas analyzer sono gli strumenti che in coppia permettono la misura delle grandezze necessarie per la stima dei flussi turbolenti. Le misurazioni condotte dalle stazioni micrometeorologiche sono di tipo turbolento; affinché i sensori funzionino correttamente e la stima dei flussi evapotraspirativi sia corretta, le condizioni atmosferiche nell'Atmospheric Boundary Layer (ABL) devono essere instabili o al più neutre (Foken 2008 [7]). L'anemometro sonico ed il gas analyzer devono essere posizionati correttamente all'interno del campo coltivato affinché i flussi misurati siano rappresentativi della vegetazione presa in esame. Il corretto posizionamento passa attraverso lo studio dell'estensione del Constant Flux Layer (CFL) e della dimensione dell'area di footprint che esprime l'area rappresentativa dei flussi evapotraspirativi come mostrato in Figura2.1.

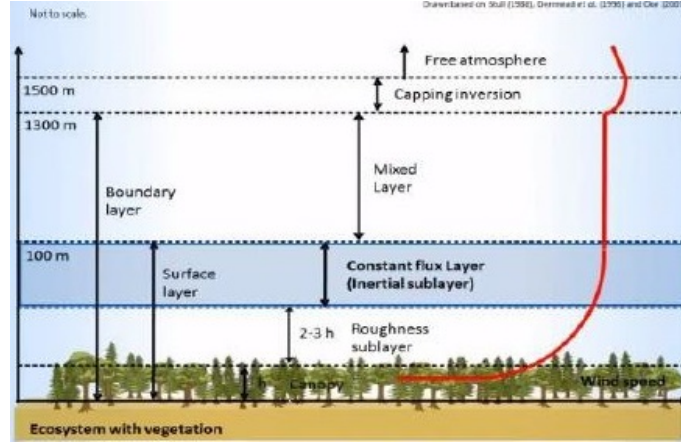


Figura 2.1: Esempio dell'area di footprint (a sinistra) e del Constant flux Layer (a destra). Da Licor Webinar. www.licor.com.

La chiusura del bilancio energetico (Eq. 2.1) permette di valutare l'accuratezza delle misurazioni condotte attraverso una stazione eddy covariance.

$$LE + H = R_n - G \quad (2.1)$$

dove LE è il flusso di calore latente, H è il flusso di calore sensibile, R_n la radiazione netta e G è il flusso di calore nel suolo tutto in $[W m^{-2}]$.

La tecnica eddy covariance (o altresì detta eddy correlation) è al momento l'approccio più avanzato per la stima del calore latente e quindi, di riflesso, del flusso evapotraspirativo. In sostanza la eddy covariance è una tecnica di similarità che stima il calore latente tramite relazioni funzionali di grandezze misurabili (Brutsaert, 2023 [8]). Attraverso l'analisi dimensionale (Garratt, 1994 [9]), ovvero decomponendo la una generica grandezza nella somma di un valore medio più una fluttuazione a media nulla, è possibile dimostrare che:

$$LE = \lambda \rho_a \overline{w'q'} \quad (2.2)$$

dove λ è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua, ρ_a la densità dell'aria e $\overline{w'q'}$ è la covarianza tra la componente verticale della velocità del vento e l'umidità dell'aria. Il calore sensibile, H invece si esprime come:

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T'} \quad (2.3)$$

Dove C_p è il calore specifico dell'aria e $\overline{w'T'}$ è la covarianza tra la componente verticale della velocità del vento e la temperatura dell'aria.

Si ricorda che dal punto di vista statistico la correlazione tra due popolazioni campionarie x ed y è definita come:

$$cov(x, y) = \overline{x'y'} = \frac{E[(x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.4)$$

dove: x_i è l' i -esimo dato della popolazione x ; y_i è l' i -esimo dato della popolazione y ; μ_x è la media campionaria della popolazione x ; μ_y è la media campionaria della popolazione y ; σ_x è la deviazione standard campionaria della popolazione x ; σ_y è la deviazione standard campionaria della popolazione y ; $E[-]$ è il valore atteso, ossia la media.

In particolare, questi flussi sono misurati nello strato dell'atmosfera più vicino al suolo, strato che in letteratura è noto con il nome di Atmospheric Boundary Layer (ABL). Fondamentalmente può essere inteso come la parte bassa di atmosfera dove la natura e le proprietà della superficie influiscono direttamente sulla turbolenza. Nell'ABL i flussi atmosferici su scala orizzontale sono molto maggiori rispetto a quelli a scala verticale, per cui i gradienti orizzontali sono di norma piccoli se paragonati ai gradienti verticali (Garratt, 1994 [9]). Per quanto attiene le velocità, la componente verticale è più piccola rispetto a quelle orizzontali. In virtù di quanto è stato detto sono valide le seguenti assunzioni (Brutsaert, [8]):

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta x} &= \frac{\delta}{\delta y} = 0 \\ \bar{w} &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Inoltre, se si indica con u , la direzione prevalente del vento, è sperimentalmente provato che la componente media trasversale del vento è nulla $\bar{w} = 0$. In generale l'Eq.2.5 porta per estensione alla conclusione che l'aria si muove parallelamente alla superficie e che in media le concentrazioni di qualsivoglia proprietà cambiano solo lungo la direzione verticale restando costanti lungo l'orizzontale. Perciò solo le fluttuazioni verticali (in senso turbolento) sono responsabili dei cambi di concentrazione. Applicando quindi un'analisi alla Reynolds, il flusso medio sulla verticale di un generico costituente C può essere scritto come:

$$\overline{\rho_a w C} = \overline{\rho_a} + \overline{\rho'_a} \quad \overline{w} + \overline{w'} \quad \overline{C} + \overline{C'} \quad (2.6)$$

Noto che nella bassa atmosfera la densità dell'aria può essere considerata costante e che in base all'Eq.2.5 =0, l'Eq.2.6 si riduce alla seguente espressione:

$$\overline{\rho_a w C} = \rho_a \overline{w' C'} \quad (2.7)$$

Da ciò trovano senso l' Eq.2.2 e l'Eq.2.3. L'anemometro sonico ed il gas analyzer misurano proprio le grandezze espresse nelle covarianze, mentre il datalogger è in grado di ricavare le covarianze tra le medesime in una fissata finestra temporale definita dall'utente. Per quanto attiene i due strumenti, essi sono in grado di misurare le grandezze di competenza a frequenze molto elevate, dell'ordine di 10 Hz, pari ad un intervallo di rilevazione dell'ordine di 10^{-1} secondi. Ciò consente di ottenere stime robuste delle covarianze da inserirsi nell'Eq. 2.2 e nell'Eq. 2.3.

La radiazione netta può essere suddivisa in quattro componenti, in base alla lunghezza d'onda ed alla provenienza: radiazioni ad onde lunghe e ad onde corte, provenienti rispettivamente dal sole e dalla superficie del suolo. La radiazione netta è ottenuta, attraverso misure delle quattro componenti effettuate con radiometri, mediante l'equazione:

$$R_n = R_{i_l} + R_{s_i} - R_{i_o} - R_{l_o} \quad (2.8)$$

dove R_{s_i} è la radiazione ad onde corte e R_{i_l} la radiazione ad onde lunghe proveniente dal sole, mentre R_{s_o} è la radiazione ad onde corte e R_{l_o} quella ad onde lunghe uscente dalla superficie del suolo.

Il flusso di calore nel suolo G (Eq.2.9) è proporzionale al gradiente di temperatura nei primi strati di suolo (20 cm) e alla conduttività molecolare a_G , che dipende dal tipo di suolo (desumibile dalla letteratura, si veda ad esempio: Foken, 2008 [7]).

$$G = a_G \frac{\Delta T_s}{\Delta z} \quad (2.9)$$

Il flusso di calore nel suolo è determinato in campo dall'accoppiamento delle piastre per la misura del flusso di calore nel suolo (Heat Flux Plate; HFP) e delle termocoppie atte alla misura della temperatura nel suolo. Generalmente l'HFP è posizionata all'incirca 10-15 cm sotto la superficie del suolo. Al di sopra di questa si installano, all'incirca a 5 cm di distanza, le due termocoppie.

2.1 Strumenti di misura

Come già anticipato, la strumentazione installata durante le campagne di monitoraggio descritte in questo elaborato, hanno acquisito dati in continuo nel corso delle stagioni agrarie attraverso la stazione eddy covariance completata da sensori agrometeorologici standard:

- Traliccio con gli strumenti per la misura dei diversi termini del bilancio di massa ed energia e le variabili ambientali
- Gli strumenti per il monitoraggio dello stato idrico del suolo in corrispondenza della torre stessa

2.1.1 La stazione eddy covariance

L'altezza a cui sono stati montati gli strumenti deve essere correttamente calibrata in funzione del tipo di coltura che è stato analizzato durante la campagna di monitoraggio per poter tener conto delle ipotesi precedentemente citate. Un esempio di una stazione montata in un Pereto durante la campagna di monitoraggio del 2022 è visibile in Figura 2.2.



Figura 2.2: Stazione eddy covariance di Vignola

Gli strumenti sul traliccio sono stati regolati in altezza e orientati verso sud, seguendo le normative internazionali (WMO, n.8), in modo da ricevere più ore di luce solare, senza ombre od ostacoli che possono alterare la validità della misura. Per lo stesso motivo il pannello solare è stato installato sufficientemente distante dalla stazione e rivolto anch'esso a sud. Gli strumenti che servono per l'applicazione della tecnica eddy-covariance installati presso la stazione sono i seguenti:

- Anemometro sonico 3D
- Gas-analyser
- Radiometro
- Sensore per la misura della temperatura superficiale del suolo tramite radiazione infrarossa
- Pluviometro automatico a bascula

Anemometro

L'anemometro sonico tridimensionale misura le componenti ortogonali del vento oltre al modulo della velocità. Queste misure vengono poi utilizzate per calcolare il flusso di quantità di moto e la temperatura sonora. Ogni anemometro sonico triassiale, come mostrato nella Figura 2.3, è composto da tre paia di trasduttori che registrano ognuno la velocità del suono. Le tre componenti vettoriali vengono calcolate e la componente della velocità verticale del vento w è utilizzata per le analisi di covarianza (Burba, [5]).

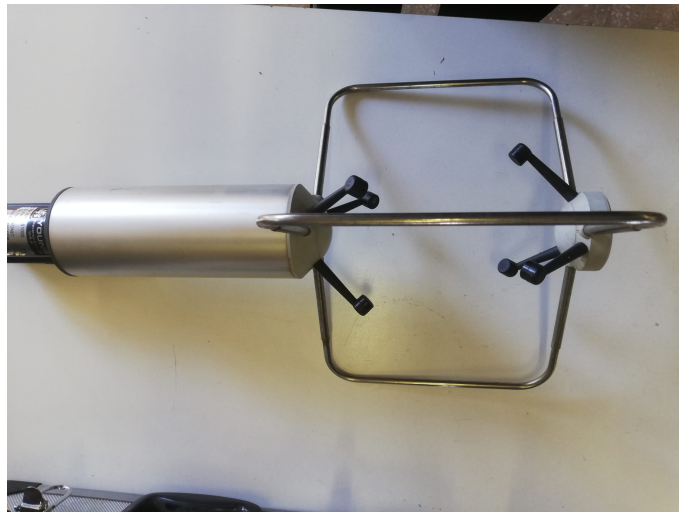


Figura 2.3: Anemometro sonico

La velocità del vento viene misurata all'interno della distanza tra le coppie di trasduttori, visibili in Figura 2.3. Questa è calcolata come la differenza

nel tempo che il segnale acustico impiega per percorrere il percorso all'inverso, o dalla differenza tra la velocità del suono nota a livello dell'aria e quella misurata nell'aria in movimento (Burba, [5]). L'out-put finale dello strumento saranno le tre componenti della velocità del vento [m s⁻¹] (x, y, z) e la temperatura sonora [°C] ad alta frequenza (20 Hz);

Gas-analyser

L'analizzatore di gas compatibile con il metodo di eddy covariance è solitamente un analizzatore ottico in grado di misurare le fluttuazioni della concentrazione dei gas in atmosfera ad alta risoluzione temporale (10Hz o maggiore) in particolare misura la concentrazione di vapore acqueo [mmol m⁻³], CO₂ [mmol m⁻³] e la pressione atmosferica [kPa].



Figura 2.4: Gas-analyser

Il Gas-analyser è posizionato di solito allo stesso livello dell'anemometro o poco lontano, mantenendo una distanza orizzontale che non supera i 15-20 cm (Burba, [5]). Questa disposizione permette di ridurre i ritardi nelle misurazioni delle due apparecchiature. É comunque necessario che gli strumenti siano posizionati in modo da ridurre al minimo la distorsione del flusso di aria misurato dall'anemometro. In generale gli strumenti devono essere in grado di quantificare i flussi in tutti gli intervalli di frequenza richiesti ed essere molto sensibili a piccole variazioni che si possono verificare nell'atmosfera.

Radiometro e strumenti per la misura delle condizioni ambientali

Sul traliccio vengo inoltre posizionati una serie di strumenti per misurare la radiazione solare e tutte le condizioni ambientali in particolare la temperatura e l'umidità quali:

- Radiometro per la misura delle quattro componenti della radiazione entrante (piranometro) e uscente (pirgeometro) a onde corte e lunghe misurate in $[W m^{-2}]$ (Figura 2.5 a);
- sensore per la misura della temperatura superficiale del suolo $[K]$ tramite radiazione infrarossa Apogee (Figura 2.5 b);
- termo-igrometro per la misura della temperatura $[^{\circ}C]$ e dell'umidità relativa dell'aria $[\%]$ (Figura 2.5 c);

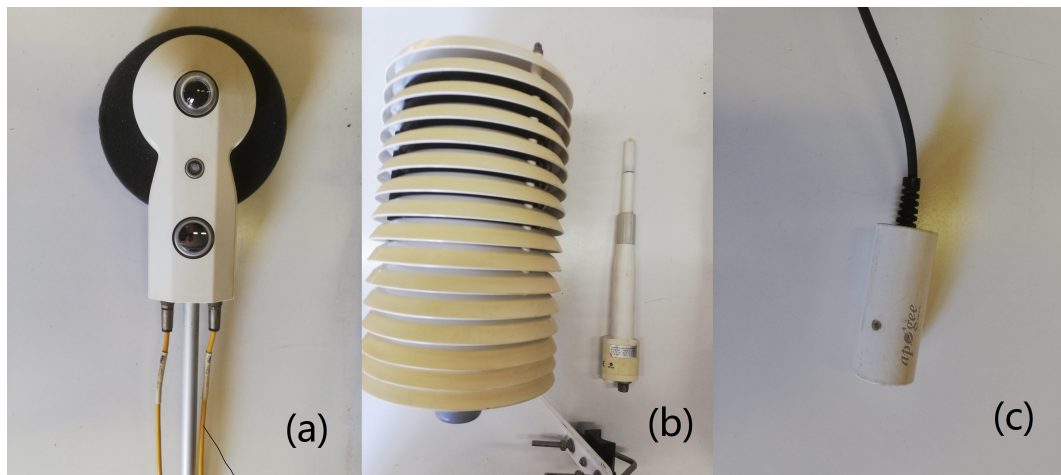


Figura 2.5: (a) Radiometro a quattro componenti; (b); (c) Termo igrometro posizionato in schermo solare;

Strumenti per il monitoraggio dello stato dell'acqua e lo scambio di calore nel suolo

Per andare a stimare il contenuto idrico del suolo vengono utilizzate tecniche di misura indirette misurando grandezze ad esso strettamente connesse ma di più facile determinazione. Le sonde più utilizzate sono quelle che utilizzano la riflettometria nel dominio del tempo (TDR - Time Domain Reflectometry) Figura 2.6(b) Queste sonde determinano il contenuto idrico sulla base della misura di alcune proprietà elettromagnetiche del suolo. La tecnica TDR si

basa sulla misura della velocità di propagazione di un segnale elettromagnetico lungo gli aghi della sonda che vengono infissi nel suolo per determinarne la costante dielettrica. Questa è strettamente connessa alla costante dielettrica dell'acqua, poiché quelle dell'aria e delle componenti minerali ed organiche del suolo sono molto basse. E' una tecnica molto accurata, di contro è costosa e necessita dell'apertura di una trincea per l'installazione delle sonde che hanno la forma di un pettine con aghi lunghi circa 10 cm Figura2.6(c). Queste sonde, oltre che a stimare l'umidità del suolo, permettono di misurare anche la temperatura a diverse profondità. Misurando il gradiente di temperatura dello strato più superficiale di suolo [$^{\circ}\text{C}$] e combinandolo alla misura fornita dalle piastre (Figura2.6(a)) che stimano il flusso di calore nel suolo [W m^{-2}] si ottiene una stima del flusso di calore del suolo alla superficie ovvero la componente G [W m^{-2}].

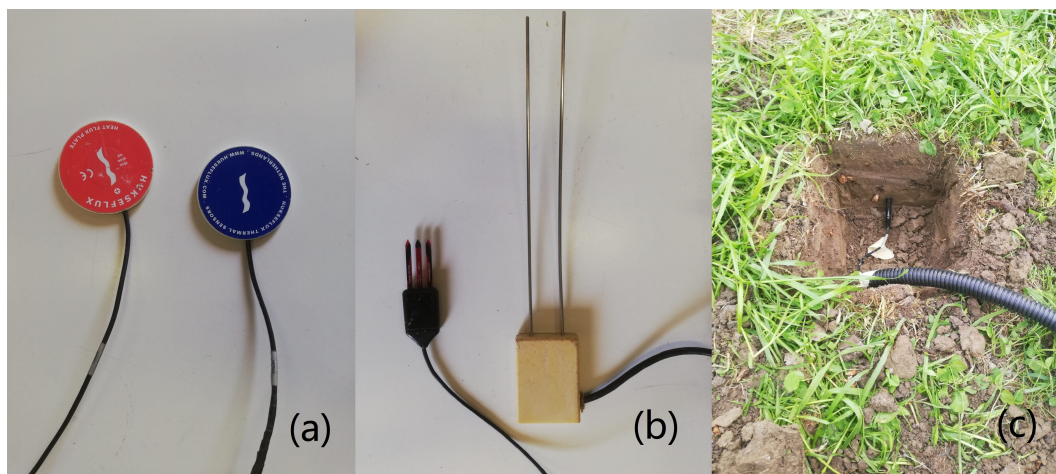


Figura 2.6: sonde TDR per la misura dell'umidità del suolo

2.2 Correzione dei dati

Tutti i dati acquisiti vengono archiviati da uno o più datalogger. Questo consente di scaricare i dati anche tramite modem da remoto e rappresenta una sorta di centro di comando della stazione. Attraverso la sua programmazione si è in grado di impostare la strumentazione affinché acquisisca i segnali voluti a certe frequenze, li medi su passi temporali decisi dall'operatore, e li archivi in tabelle opportunamente predisposte.

Successivamente questi dati vengono rielaborati attraverso il software PEC (Polimi Eddy Covariance [10]) contenente l'algoritmo di correzione di dati grezzi misurati dalla stazione eddy covariance. Tali correzioni si possono

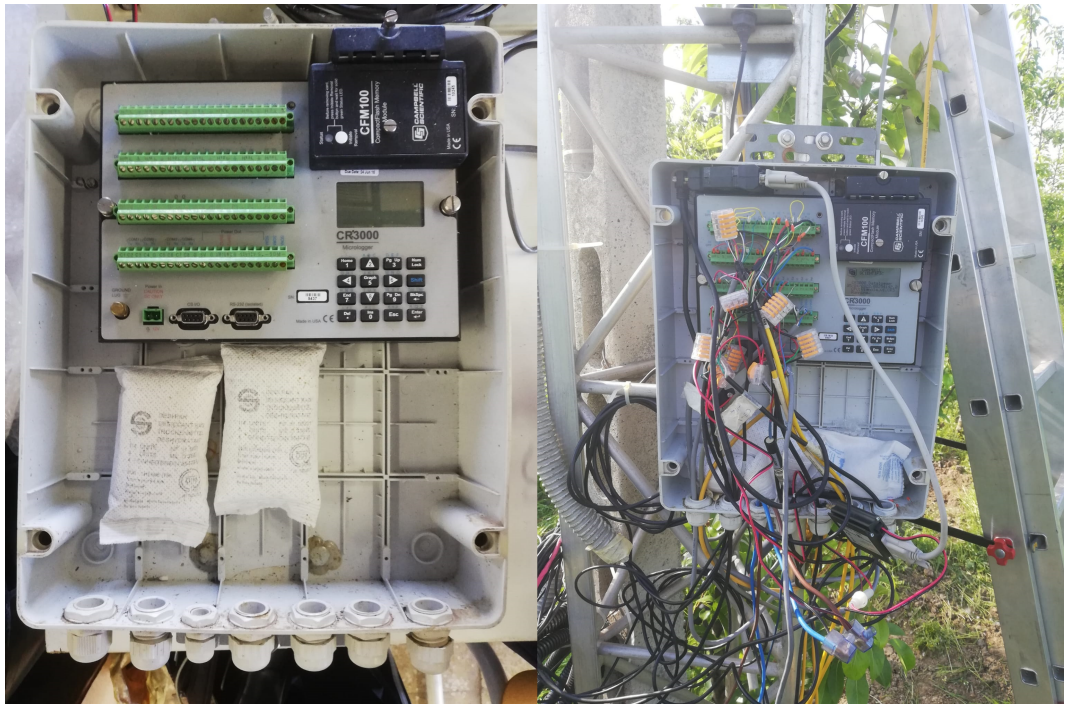


Figura 2.7: datalogger utilizzato nella campagna di monitoraggio di Vignola

suddividere in due categorie: correzioni di carattere strumentale e correzioni di carattere fisico.

2.2.1 Correzioni strumentali del dato

Le correzioni strumentali sui dati in uscita dal datalogger coinvolgono principalmente le misure acquisite dall'anemometro sonico tridimensionale e dal gas analyzer e si basano sull'applicazione di tre operazioni distinte: la rotazione degli assi cartesiani (Wilczak et. 62 al., 2000 [11]), la correzione della risposta in frequenza (Massman, 2000 [12]) ed il despiking (Vickers and Mahrt, 1997 [13]) che vengono applicate in sequenza.

La rotazione degli assi cartesiani

Il problema fondamentale, che generalmente si riscontra nel momento dell'installazione dell'anemometro sonico, è che quest'ultimo non è posizionato perfettamente in asse sulla verticale. Con l'applicazione della rotazione degli assi le componenti u, v (componenti complanari della velocità del vento) e w vengono ristabilite e la media di w rispetta il comportamento descritto in letteratura. Come indicato in Wilczak et. al. (2000) [11], la rotazione degli

assi cartesiani avviene semplicemente moltiplicando la terna dei vettori u, v e w in uscita dal datalogger, per una matrice di rotazione in modo da ottenere una terna corretta di valori di u, v e w .

La correzione della risposta in frequenza

La correzione della risposta in frequenza è in realtà un insieme di correzioni (Burba [5]) che si possono raggruppare in un'unica funzione di trasferimento. La procedura, piuttosto complessa, porta alla correzione dei flussi di calore latente e sensibile passando attraverso la modifica dei termini di covarianza $cov(wT)$ e $cov(wH_2O)$ che rappresentano le covarianze tra la componente turbolenta della velocità verticale del vento, della temperatura dell'aria e della concentrazione di vapore acqueo applicando un fattore correttivo maggiore di 1.

Despiking

Il despiking è una procedura che consiste nell'eliminazione dei dati anomali (outlier) Seguendo Vickers e Mahrt (1997) [13], ovvero nel definire una finestra di accettabilità dei valori delle variabili in un intervallo temporale di 5 minuti. Se esistono meno di 3 outlier consecutivi allora questi vengono scartati, se si presentano un numero maggiore di outlier lo si considera un fenomeno fisico e i dati vengono considerati accettabili.

2.2.2 Correzioni fisiche del dato

Le correzioni fisiche del dato eddy covariance sono legate ad una corretta stima dei flussi di calore latente, sensibile e di CO_2 e si possono suddividere in quattro operazioni distinte: presenza della pioggia, correzione Webb-Pearman-Leuning, correzione della temperatura sonica e correzione dovuta alla stabilità atmosferica.

Pioggia

Tutti gli strumenti sono influenzati dai forti eventi di precipitazione, dalla neve ma anche dalla rugiada mattutina. Ogni strumento tuttavia reagisce in modo differente. L'anemometro sonico risente lievemente mentre il gas analyzer risulta essere maggiormente influenzate dalle condizioni di pioggia, a causa della presenza di gocce d'acqua sui vetrini dello strumento. In conclusione tutti i flussi turbolenti misurati durante e immediatamente dopo le precipitazioni debbono essere eliminati perché affetti da errore.

Webb-Pearman-Leuning

La correzione Webb-Pearman-Leuning (WPL) (Webb et. al., 1980 [14]) influisce sulle misure di calore latente e di flusso di CO₂. Questa procedura si rende necessaria per correggere le fluttuazioni di densità dell'aria all'interno del volume di campionamento compreso nella testa dell'analizzatore a cammino aperto. Nel caso questa correzione non venga applicata, l'ipotesi di velocità media verticale nulla viene a cadere a causa del trasporto indotto dalle fluttuazioni di densità.

2.2.3 Temperatura sonica

Il problema relativo al calcolo del flusso di calore sensibile tramite un anemometro sonico è connesso al fatto che la temperatura misurata è una temperatura sonica, dunque diversa dalla temperatura dell'aria (Foken, 2008 [7]). Tale temperatura risulta affetta dall'umidità specifica dell'aria.

2.2.4 Stabilità dell'atmosfera

L'analisi della qualità delle misure eddy covariance non può prescindere dalle condizioni di turbolenza relative allo strato limite superficiale. Infatti questo strato è interessato da fenomeni di turbolenza di piccole, medie e grandi scale dettati principalmente dalla rugosità e dal riscaldamento della superficie del suolo (Sozzi et al., 2002 [15]). Le caratteristiche delle ore diurne sono le cosiddette condizioni instabili caratterizzate da vortici di grandi dimensioni generati dal riscaldamento della superficie del suolo. Di notte invece prevalgono le condizioni stabili caratterizzate da strutture turbolente poco intense e di piccole dimensioni, e ci si avvicina dunque alla condizione laminare. In questa situazione gli strumenti della tecnica eddy covariance, quali anemometro sonico e gas analyzer, non funzionano correttamente ed i flussi di calore latente e sensibile misurati vanno dunque eliminati (Foken, 2008 [7]).

2.3 Chiusura bilancio energetico

La chiusura del bilancio energetico è un altro metodo diffuso utilizzato per valutare la qualità delle misure di una stazione eddy covariance (Foken, 2008 [7]). Questa resta una problematica tutt'ora aperta, ma l'uso di dati energetici per validare i modelli di bilancio di massa ed energia richiede che la chiusura del bilancio energetico sia verificata. L'equazione 2.1 esprime il bilancio energetico per un agro-ecosistema. Assumendo che le ipotesi teoriche della tecnica eddy siano rispettate e che quindi i flussi misurati siano

corretti, il bilancio energetico risulta tipicamente non chiuso e in particolare l'energia disponibile è maggiore della somma dei flussi turbolenti (Corbari et al., 2010 [16]). Questo errore è stimato tra il 10% e il 20% (Foken, 2008 [7]). In ogni caso una mancanza di chiusura del bilancio energetico non indica necessariamente che una cattiva qualità del dato misurato. Questo problema della chiusura del bilancio è principalmente dovuto, tra gli altri fattori, alla stratificazione dello strato limite, all'aggregazione temporale, alle differenti aree di misure degli strumenti e ai termini energetici di accumulo (Balocchi, 2003 [6]). Nella Figura 2.8 è visibile la chiusura del bilancio energetico verificata per la campagna del Chiese del 2018 (cultura arborea) e per la campagna di Vignola (cultura orticola)

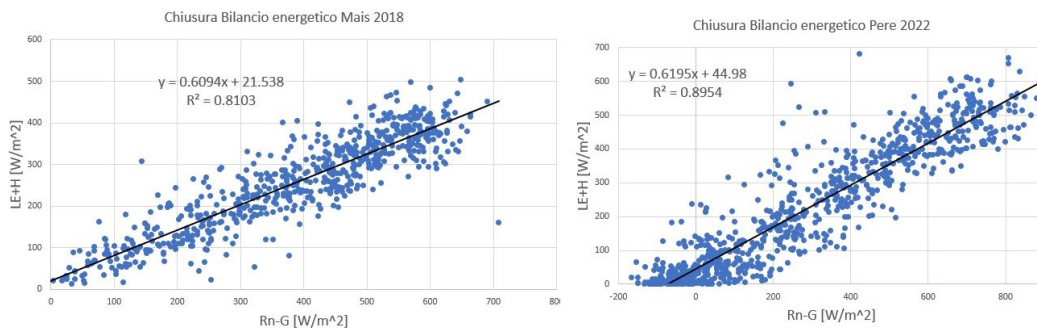


Figura 2.8: Chiusura bilancio energetico dei dati misurati nella stazione per le campagne di Vignola e del Chiese

2.4 Siti e attività sperimentali

2.4.1 Sito sperimentale del Chiese

I campi di Mais osservati durante le campagne di monitoraggio del 2016 e 2018 si trovano presso il Consorzio Irriguo Chiese (20.000 ha) (www.consorziodibonificachiese.it), situato in Lombardia Regione vicino al Lago d'Idro nel nord Italia e presenta le seguenti caratteristiche:

- Temperatura media annuale intorno ai 17 [C°]
- Piovosità media annua di 250 [mm]
- superficie coltivata con colture estive, come mais e foraggio e grano invernale

- Terreno sabbioso
- irrigazione per scorrimento
- Raccolto ad inizio settembre
- Profondità sonde TDR a 5 e 45 [cm]

2.4.2 Sito sperimentale di Vignola

Il Pereto osservato durante la campagna di monitoraggio del 2022 si trovano presso il Consorzio della Bonifica Burana (242.521 ha) (www.consorzioburana.it), situato tra le provincie di Modena, Mantova, Ferrara, Bologna e Pistoia e presenta le seguenti caratteristiche:

- Temperatura media annuale intorno ai 17 [C°]
- Piovosità media annua di 270 [mm]
- superficie coltivata con alberi da frutto prevalentemente ciglie e pere.
- Terreno limoso
- irrigazione a goccia
- Raccolto ad inizio settembre
- Profondità sonde TDR a 10,20 e 55 [cm]

2.4.3 Sito sperimentale Noceto

Il noceto osservato durante le campagne di monitoraggio del 2020 e 2021 si trova nel centro Italia e presenta le seguenti caratteristiche:

- Temperatura media intorno ai 14 [C°]
- Piovosità media annua di 761 [mm]
- Alberi giovani alti circa 10 [m]
- Terreno limoso
- Raccolto ad inizio settembre
- irrigazione a goccia
- Profondità sonde TDR a 5 e 15 [cm]

Capitolo 3

Analisi preliminare

3.1 Analisi dei dati con cadenza semioraria

Il primissimo per andare ad analizzare i fenomeni di scambio di CO_2 è stata un'analisi rispetto a tutte le variabili ambientali misurate ritenute di maggior importanza. I dati misurati dalla stazione e successivamente corretti appropriatamente sono stati inizialmente graficati per avere un'idea degli andamenti temporali durante le campagne di monitoraggio. A titolo di esempio sono stati riportati nelle Figure seguenti gli andamenti temporali per la campagna di monitoraggio del mais del 2016.

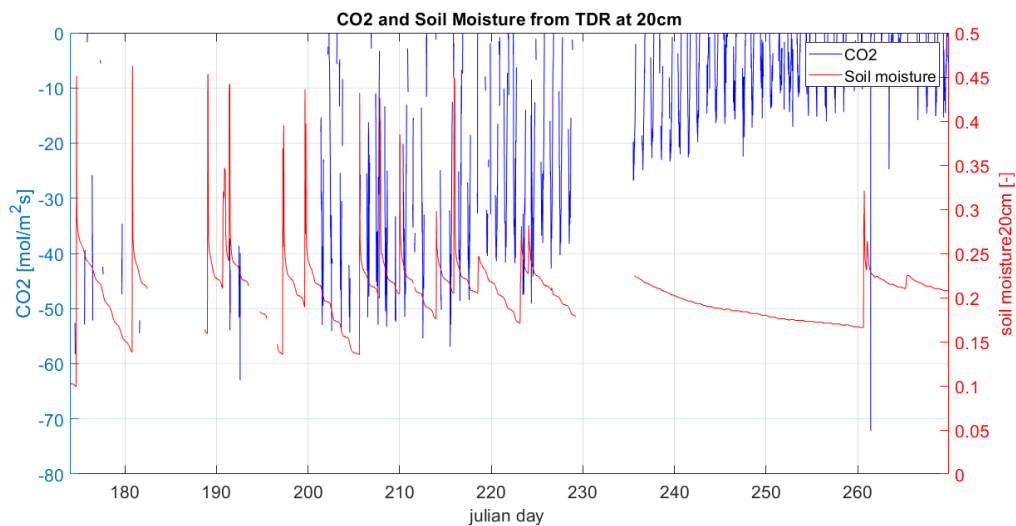
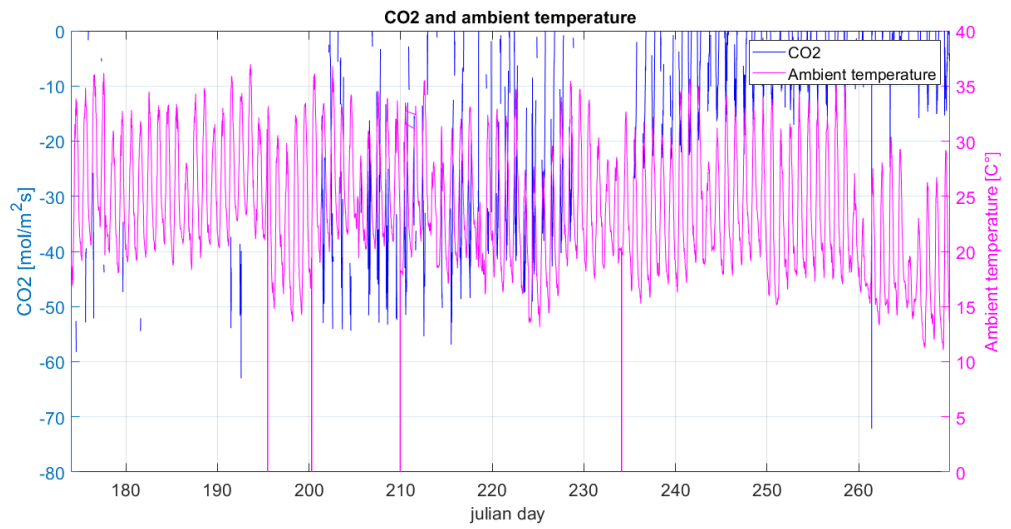
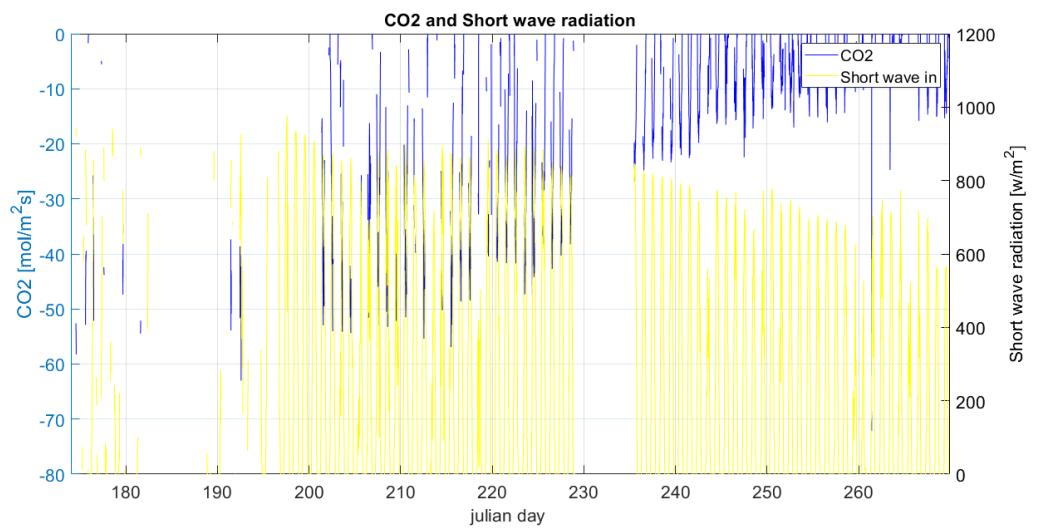
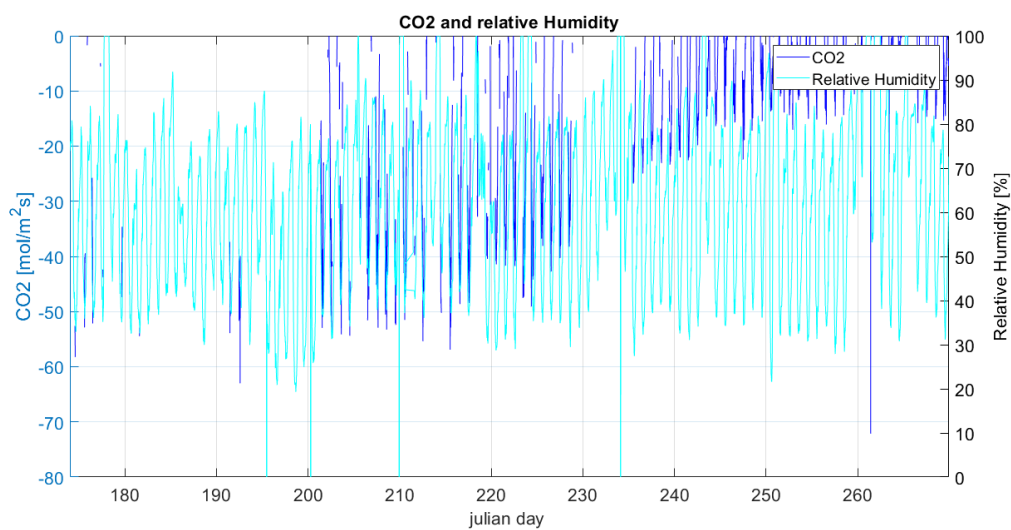
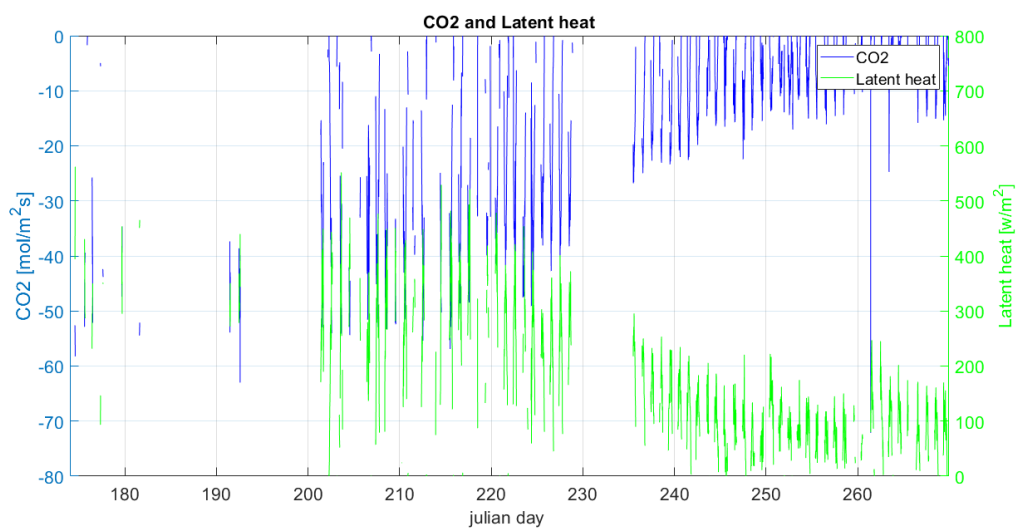


Figura 3.1: Andamenti temporali della CO_2 e dell'umidità del suolo misurata a 20 cm con la sonda TDR.

Figura 3.2: Andamenti temporali della CO_2 e della temperatura ambienteFigura 3.3: Andamenti temporali della CO_2 e della radiazione entrante ad onde corte

Figura 3.4: Andamenti temporali della CO_2 e dell'umidità relativaFigura 3.5: Andamenti temporali della CO_2 e del calore latente (evapotraspirazione)

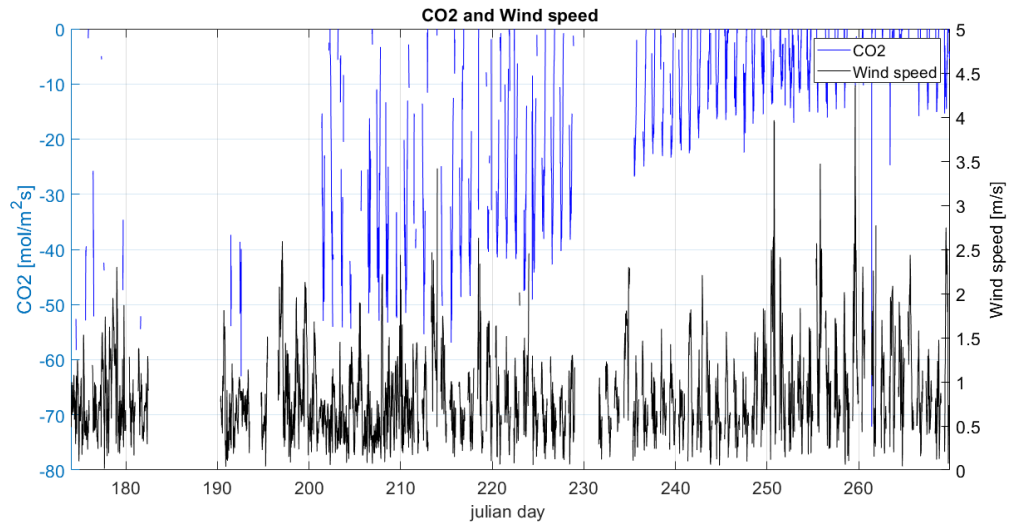


Figura 3.6: Andamenti temporali della CO_2 e della velocità del vento misurata dall'anemometro sonico

Si può notare come i dati di CO_2 siano assenti per gran parte del periodo soprattutto nelle ore notturne per motivi legati alla strumentazione o alla validazione del dato.. Possiamo affermare che risulta difficoltoso osservare un qualche tipo di legame osservando questi questi grafici così come sono

3.1.1 Correlazioni dei dati semiorari

Per analizzare quale fosse il legame effettivo di tutte le misure interessate sono stati graficati i dati di CO_2 con cadenza semioraria rispetto a tutte le variabili di maggiore interesse. L'analisi visibile in Figura 3.7 mostra che esiste una forte correlazione con i dati di calore latente LE mentre per tutte le altre variabili non si evidenzia alcuna corrispondenza. Queste considerazioni sono visibili nei grafici di Figura 3.7 a titolo di esempio per l'anno 2016 ma valgono per tutte le campagne di monitoraggio analizzate in questo elaborato.

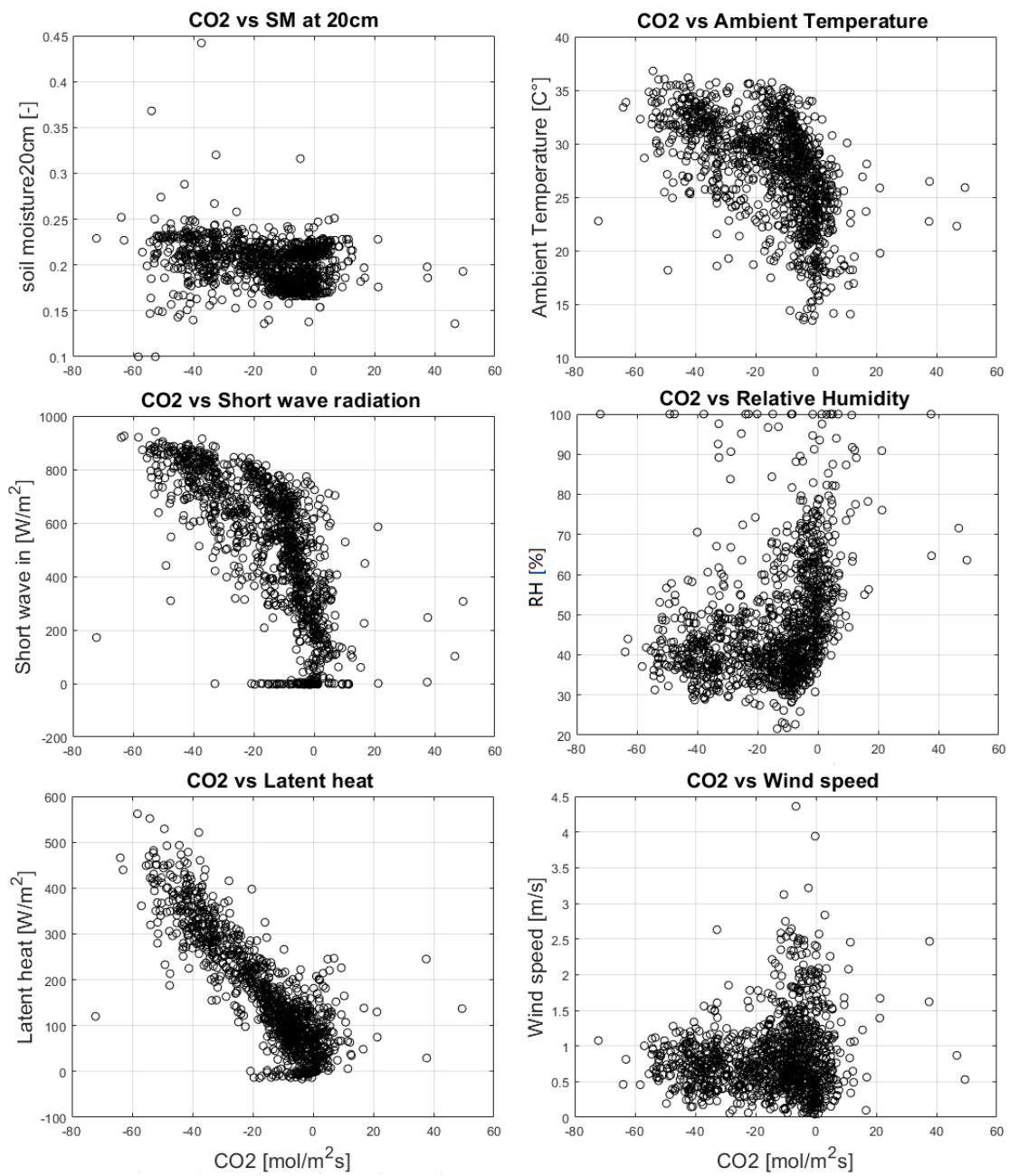


Figura 3.7: Correlazione del dato di CO₂ con cadenza semioraria rispetto a tutte le variabili

3.2 Analisi dei dati mediati giornalmente

Per poter verificare se il periodo di riferimento del dato fosse il problema principale sono stati successivamente mediati i dati durante ogni giornata.

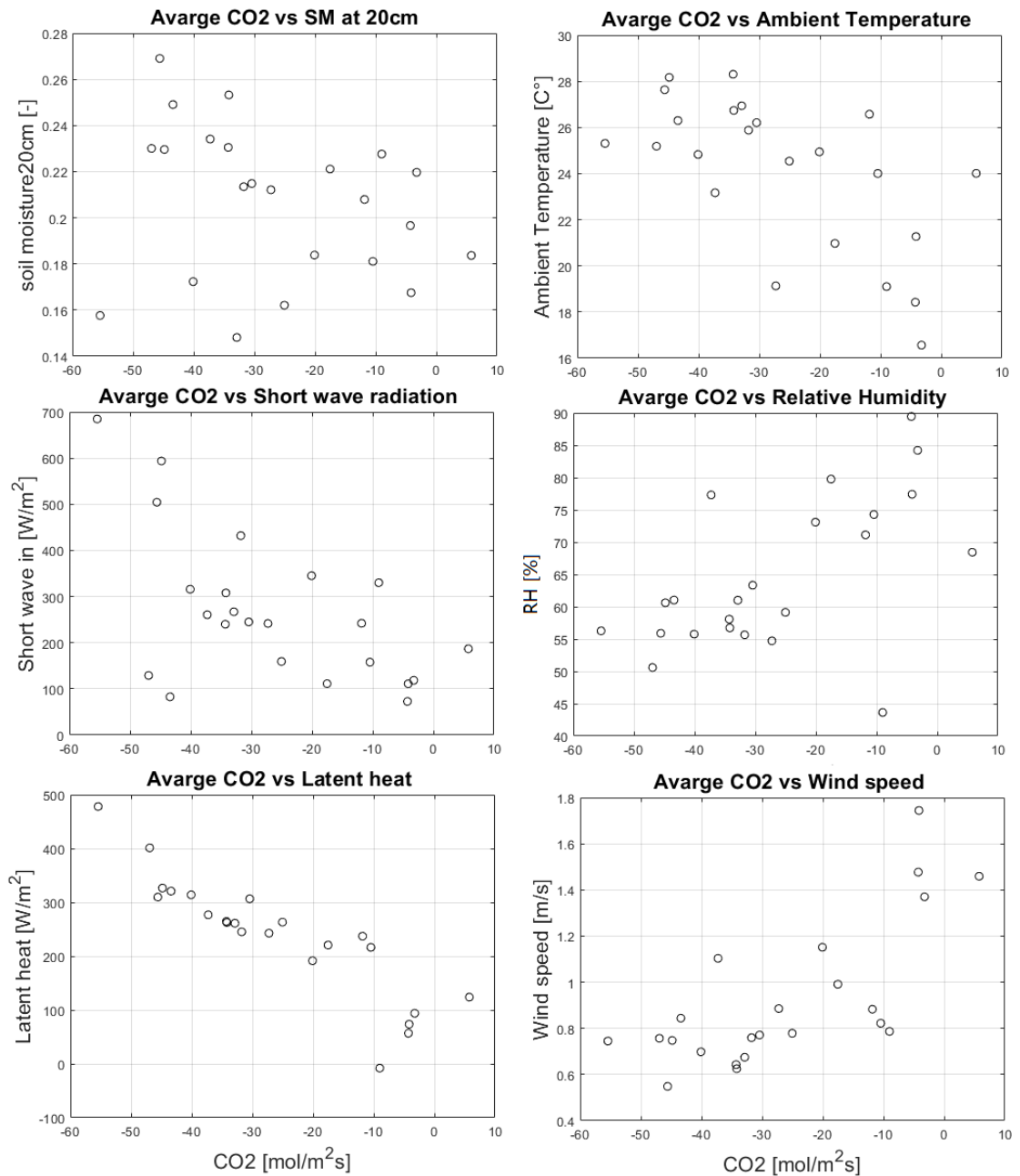


Figura 3.8: Correlazione del dato di CO₂ mediato giornalmente

Viene scelta una finestra temporale di ventiquattro ore in modo da poter comunque riuscire a percepire l'effetto dell'irrigazione sulle misure, infatti un turno irriguo dura circa sette giorni nei campi osservati. Le correlazioni graficate sono osservabili in Figura 3.8 ed i risultati non permettono di aggiungere alcuna considerazione rispetto a quelle precedentemente fatte per l'analisi con i dati semiorari.

Capitolo 4

Studio della dinamica dei flussi di CO₂

4.1 Bilancio dei flussi di carbonio in un agro ecosistema

La misura dei flussi di carbonio, tra l'atmosfera e la biosfera tramite la stazione eddy-covariance, fornisce un'accurata conoscenza dello scambio netto di carbonio dell'ecosistema *NEE* (Net Ecosystem Exchange). Questo dato permette di calcolare la *GPP* (Gross Primary Productivity), ovvero la produzione primaria totale, avvalendosi dell'equazione:

$$\begin{cases} NEE = R_{\text{eco}} & \text{notte} \\ NEE = R_{\text{eco}} - GPP & \text{giorno} \end{cases} \quad (4.1)$$

Dove R_{eco} è la sommatoria della respirazione eterotrofa, R_{h} (principalmente microbica ma anche animale) e la respirazione autotrofa, R_{a} (Geider et al., 2001 [17]):

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{a}} + R_{\text{h}} \quad (4.2)$$

La stima di questi valori risulta complessa in quanto legata a diversi variabili; un possibile metodo di calcolo è quello di stimare $Reco$ ($= Ra + Rh$) durante il giorno, partendo dai dati di respirazione notturna dell'ecosistema misurati direttamente con la stazione eddy covariance.

La valutazione del *GPP* da questa misura del *NEE* è limitata dalla difficoltà nel determinare le emissioni delle sorgenti di CO₂, ovvero, la respirazione eterotrofa, R_{h} e la respirazione autotrofa, R_{a} .

Nei casi di studio, non potendo considerare validabili i dati notturni di respirazione per problematiche relative all' assenza di vento, non è stato possibile stimare la GPP; al suo posto sono stati perciò utilizzati i dati direttamente misurati dalla stazione. Questi valori rappresentano il NEE, che può essere considerato comunque una buona rappresentazione dei fenomeni presi in esame.

Si può osservare che, il NEE passa da valori positivi, ovvero correlati ad emissione di anidride carbonica, a valori negativi, ovvero di assimilazione di anidride carbonica. Per l'analisi del trend sotto riportato, occorre però tenere in considerazione molti fattori riguardanti l'ecosistema considerato quali lo stress ambientale, la struttura della pianta ed in particolar modo lo stato di crescita della pianta osservata. In funzione di tutte queste variabili sono stati osservati POI dei dati presenti nel database FLUXNET (<https://fluxnet.fluxdata.org/>) che avessero le caratteristiche il più possibile vicine a quelle delle campagne di monitoraggio analizzate. Come mostra la Figura 4.1 sono stati scelti dei dati per una coltivazione di mais di Borgo Cioffi (IT-Bci,Eboli, Italy, latitude 40 31' 25.5", longitude 14 57' 26.8"; mean altitude 15 m a.s.l) misurati durante la campagna di monitoraggio nel 2008 [18].

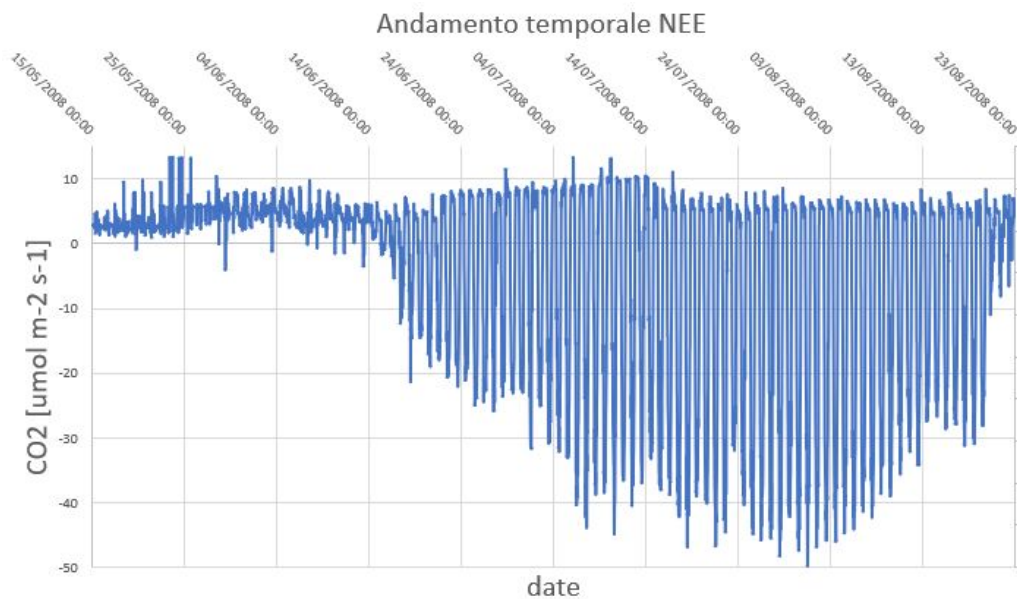


Figura 4.1: Andamenti temporali del NEE dal 15/05/2008 (semina) al 23/08/2008 (raccolto) con i dati presi da FLUXNET

Dai grafici si può apprezzare come il trend giornaliero cambi in funzione delle condizioni dell'ecosistema; In aggiunta, permettono di affermare che la

variabile più significativa, in termini di quantità di CO₂ assimilata, dovrà essere legata al grado di crescita della pianta Figura 4.3.

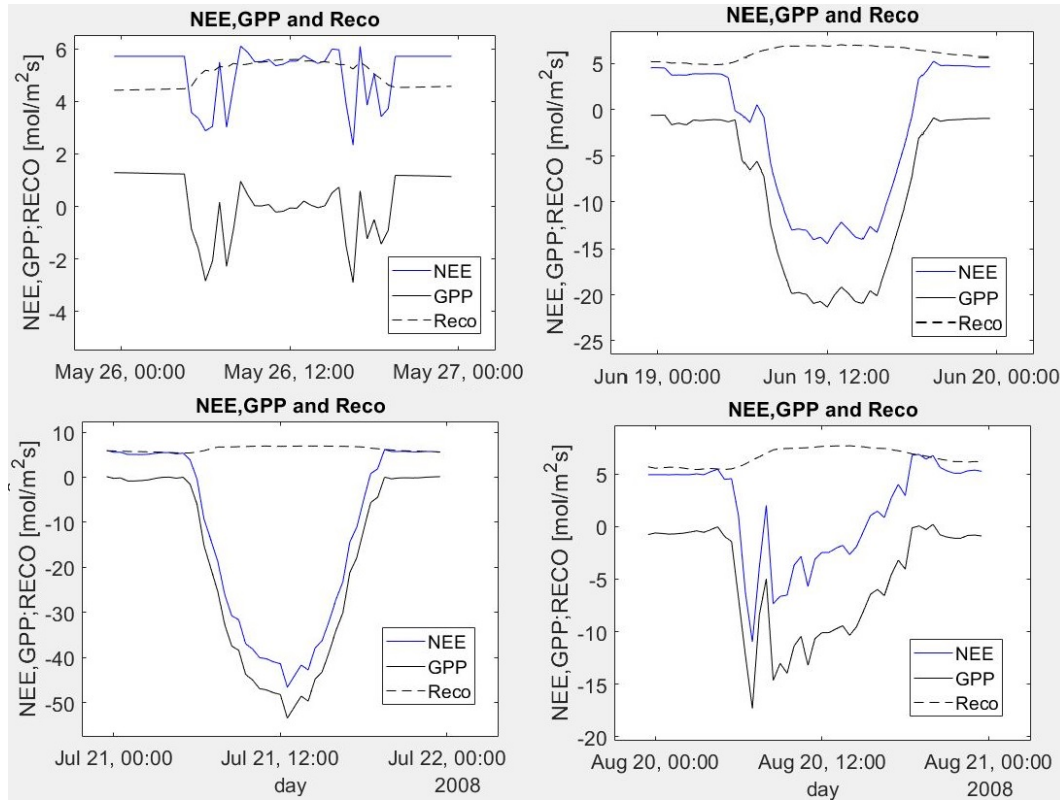


Figura 4.2: Trend diurni dei flussi di CO₂ dell'ecosistema in diverse epoche temporali della stagione di crescita del mais. NEE, Net Ecosystem CO₂ Exchange; GPP, primario lordo Produzione; Reco, Respirazione dell'ecosistema.

4.2 Analisi dei dati di picco della curva di CO₂

Analizzando con particolare attenzione le curve fotosintetiche, ovvero i dati relativi alle ore diurne (dove l'ecosistema è maggiormente esposto alle radiazioni solari e la pianta svolge i processi di fotosintesi), si può osservare che l'andamento dei picchi delle curve segue in modo abbastanza sistematico gli andamenti dell'umidità del suolo Figura 4.3.

Il valore di picco delle curve fotosintetiche risulta rappresentativo della quantità di CO₂ assimilata durante la fotosintesi, è stato dunque graficato rispetto a tutte le variabili in gioco così da comprendere se effettivamente sia possibile evidenziare una correlazione tra lo scambio di gas e le altre

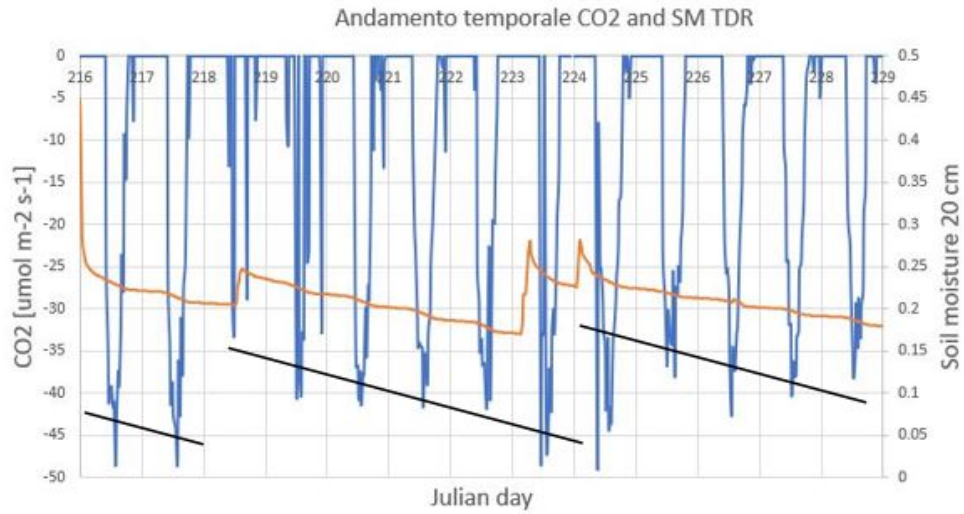


Figura 4.3: Confronto degli andamenti dei picchi di CO₂ rispetto all'umidità del suolo

variabili variabili; Particolare focus è stato posto rispetto all'umidità del terreno misurata tramite le sonde TDR.

I grafici dei valori dei picchi di CO₂ vengono di seguito riportati (Figura 4.4) in funzione delle principali variabili relative ai processi di fotosintesi e respirazione delle piante.

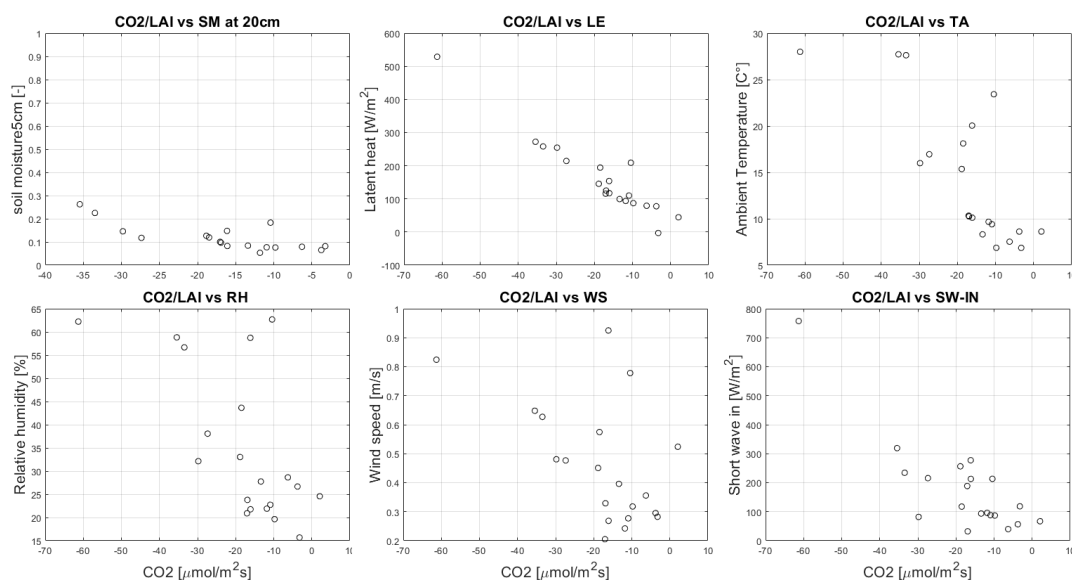


Figura 4.4: Correlazione Minimi di NEE con i corrispettivi valori: RH (umidità relativa), LE (calore latente di vaporizzazione), TA (temperatura ambiente), WS (velocità del vento), SW-IN (radiazione entrante ad onde corte), SM (umidità del suolo)

4.3 Dipendenza dal periodo fenologico

La fenologia vegetale studia le fasi del ciclo vitale delle piante (germogliamento, fioritura, maturazione dei frutti, crescita e caduta delle foglie) in relazione ai fattori ambientali, in particolare quelli meteorologici (temperatura, umidità, radiazione del suolo e ambiente circostante). L'introduzione di quest'aspetto risulta di fondamentale importanza per l'analisi dei dati di CO₂, essendo questi molto variabili in funzione dello stadio di crescita della pianta. Nel presente studio si è scelto di osservare e analizzare la variabile LAI (Leaf Area Index), in quanto rappresentativa della fase di ciclo vitale della pianta.

4.3.1 LAI Leaf area index

Il pigmento delle foglie, la clorofilla, assorbe fortemente la luce visibile (da 0,4 a 0,7 μm) per l'utilizzo nella fotosintesi. La struttura cellulare delle foglie, invece, riflette fortemente la luce nel vicino infrarosso (da 0,7 a 1,1 μm). Più sono grandi e più è alto il numero di foglie, maggiori sono le lunghezze d'onda colpite e quindi, maggiore è la quantità di luce che viene coinvolta. Viene stimato perciò, un indice che rappresenti la quantità e le dimensioni delle

foglie, mediante l'utilizzo di immagini satellitari, considerando solo giornate di cielo sereno.

Il LAI viene calcolato in funzione del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Corbari 2019 [19]:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (4.3)$$

Dove VIS e NIR rappresentano le misure di riflettanza spettrale acquisite, rispettivamente nella regione visibile (rosso) e nel vicino infrarosso.

Utilizzando gli algoritmi sviluppati da [?] Richter e Timmermans (2009), risulta possibile calcolare il LAI secondo la formula:

$$LAI = \frac{\log(1 - (\frac{NDVI}{0.95}))}{0.75} \quad (4.4)$$

In funzione delle immagini satellitari usate come input, con un certa risoluzione spaziale e temporale, sono stati ricavati gli andamenti del LAI durante le campagne di monitoraggio visibili nella Figura 4.5

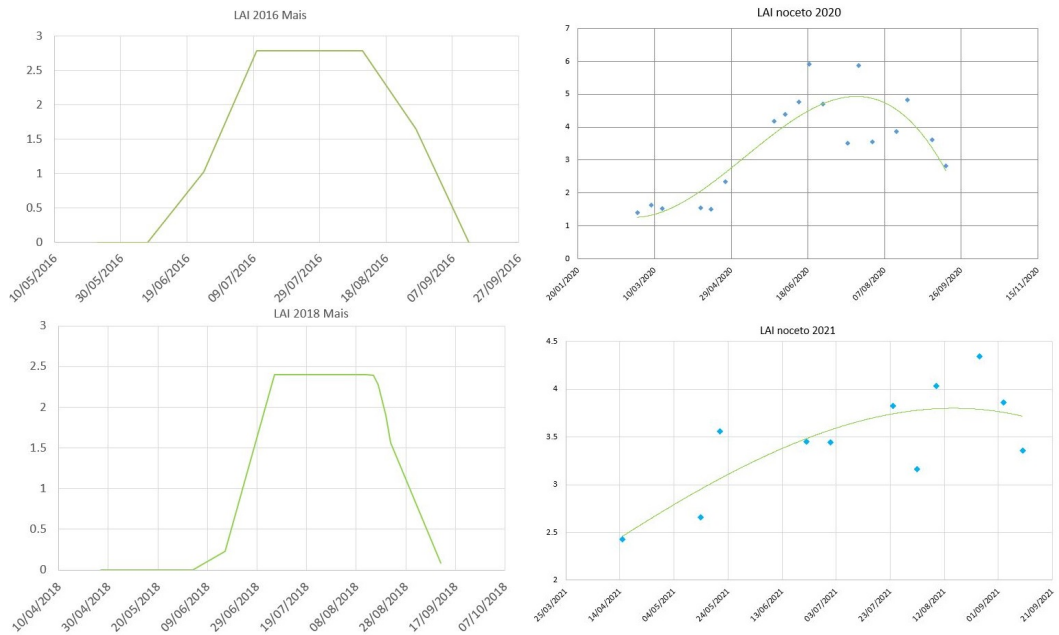


Figura 4.5: Trend del valore di LAI per le campagne di monitoraggio osservate

tali andamenti permettono di:

- quantificare in modo più appropriato la superficie effettiva che viene coinvolta nei processi di scambio di gas tra la pianta e l'ecosistema circostante
- definire, in termini di massa di CO₂ scambiata, diversi periodi al quale fare riferimento

4.3.2 Analisi dei dati rispetto al LAI

Riprendendo l'obiettivo principale, ovvero comprendere la correlazione tra il contenuto di acqua nel suolo e la variazione dei flussi di carbonio, è stato utilizzato il dato di LAI misurato durante le campagne di monitoraggio per escludere l'eventuale dipendenza dei flussi di CO₂ dal periodo fenologico della pianta.

I dati dei flussi di CO₂ sono stati perciò divisi per il valore di LAI corrispondente in modo da perdere la variabilità legata a questo parametro ed ottenere una misura dei flussi rispetto all'effettiva superficie di scambio. L'analisi dimensionale delle variabili è visibile nell'Equazione 4.5

$$CO_2 = \frac{\mu mol}{m^2_{superficie} s} \quad LAI = \frac{m^2_{superficie}}{m^2_{supfogliare}} \quad \frac{CO_2}{LAI} = \frac{\mu mol}{m^2_{supfogliare} s} \quad (4.5)$$

Ciò permette di osservare, dato un cambiamento di contenuto idrico del terreno, come aumenta o diminuisce la conduttanza stomatica e conseguentemente l'assorbimento o l'emissione di CO₂ a parità di superficie di scambio durante tutto il periodo di monitoraggio. A titolo d'esempio, vengono di seguito mostrati i risultati (Figura 4.6) per la campagna di monitoraggio nel consorzio di bonifica del Chiese del 2016.

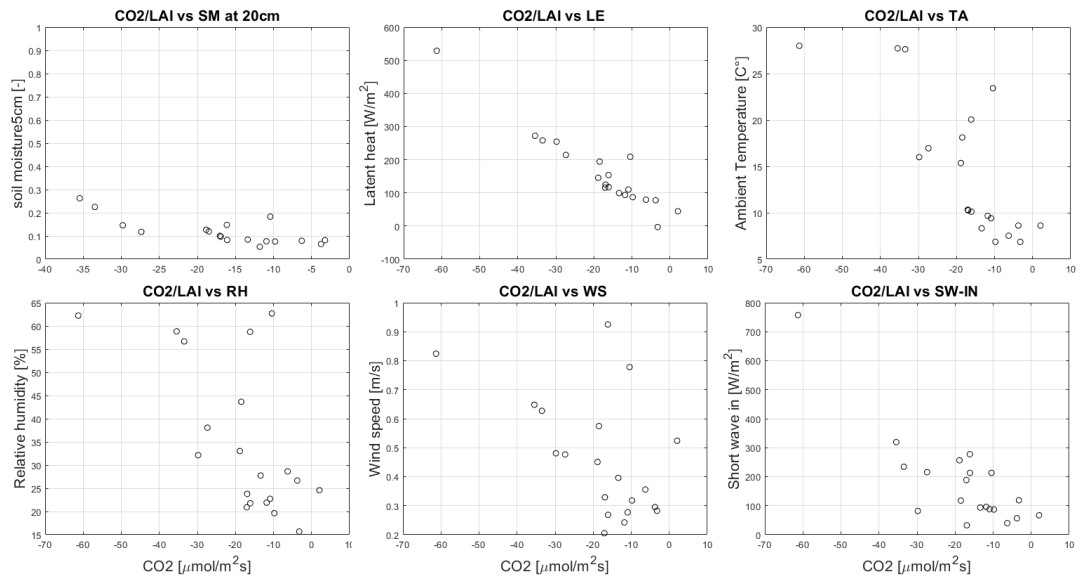


Figura 4.6: Correlazione NEE/LAI con: RH(umidità relativa), LE (claoere latente di vaporizzazione), TA (temperatura ambiente), WS (velocità del vento),SW-IN (radiazione entrante ad onde corte), SM (umidità del suolo)

I dati di CO₂ sono stati mediati giornalmente, divisi per il valore di LAI misurato ed infine graficati rispetto a tutte le variabili che entrano in gioco nei processi di fotosintesi e respirazione delle piante.

Questi grafici hanno permesso di capire che l'approccio non è in grado di mettere in luce una risposta effettiva dell'eco-sistema all'irrigazione; ad ogni modo, si è dedotto che, escludere la variabilità dei dati in funzione del LAI, migliora il risultato rispetto alle analisi preliminari svolte.

4.4 Metodo di analisi della CO₂ in coltivazioni irrigue

Dalla combinazione di tutte le considerazioni precedentemente elencate, è stato ricavato il metodo di analisi che esprime in modo più evidente una correlazione tra i flussi di carbonio e l'umidità del suolo.

4.4.1 Esclusione dei dati di CO₂ in funzione dell'andamento del LAI

E' stato preso in esame il trend dell'indice LAI, per poter escludere la dipendenza dal periodo fenologico della pianta e quindi andare ad osservare i flussi di carbonio rispetto ad una superficie di scambio costante nel tempo.

Differentemente dall'approccio precedente, si è valutato che il modo migliore di agire fosse osservare il dato in un frangente temporale in cui questo parametro rimanga costante. Il periodo scelto è quello di massima crescita fogliare, dove gli andamenti di quest'indice, per le coltivazioni prese in esame, presentano un valore di picco rimanendo pressochè costante (Figura 4.7).

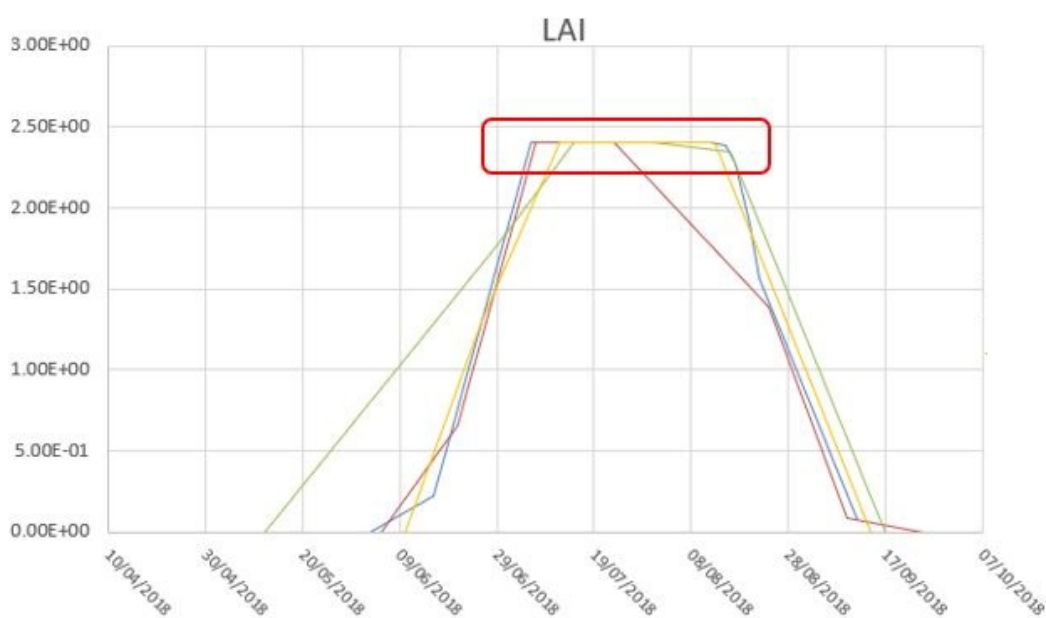


Figura 4.7: Identificazione del periodo in cui il LAI rimanga costante e massimo per la campagna del 2018

In questo intervallo di plateau del trend, le foglie, ovvero la superficie disponibile per lo scambio di gas con l'atmosfera, raggiungono il loro massimo sviluppo con un conseguente aumento della curva di NEE. Tale incremento avviene maggiormente nelle ore in cui la pianta assorbe CO₂ e sta svolgendo la fotosintesi (come ben visibile nei dati presenti in Figura 4.1), da ciò si deduce che anche la sensibilità del dato di flusso dovrebbe aumentare in risposta all'irrigazione.

4.4.2 Esclusione dei dati di CO₂ in funzione della radiazione solare

Per analizzare dei dati similari e che contengano la stessa informazione, sono stati esclusi quelli relativi a giornate di maltempo in cui l'assimilazione del gas ha subito un forte cambiamento dovuto alle condizioni ambientali non favorevoli.

Nelle giornate di pioggia, come mostrato in Figura 4.8, la curva subisce una drastica diminuzione nel trend giornaliero poichè la pianta e gli strumenti sono esposti a condizioni climatiche differenti rispetto al resto del periodo di analisi, in questi casi i dati risultano pertanto poco paragonabili a quelli stimati nei giorni di beltempo.

Per individuare quali potessero essere le giornate effettivamente adatte al confronto dei dati di CO₂ con l'umidità del suolo; sono state osservate le misure fornite dal radiometro. La pianta, durante la fotosintesi, assorbe la radiazione solare ed in particolare la radiazione entrante ad onde corte (SW-IN); come visibile in Figura 4.8 questa misura evidenzia quali giornate debbano essere escluse dall'analisi in modo evidente, pertanto, per periodo di plateau di LAI sono stati esclusi i dati di tutte le giornate con bassa radiazione.

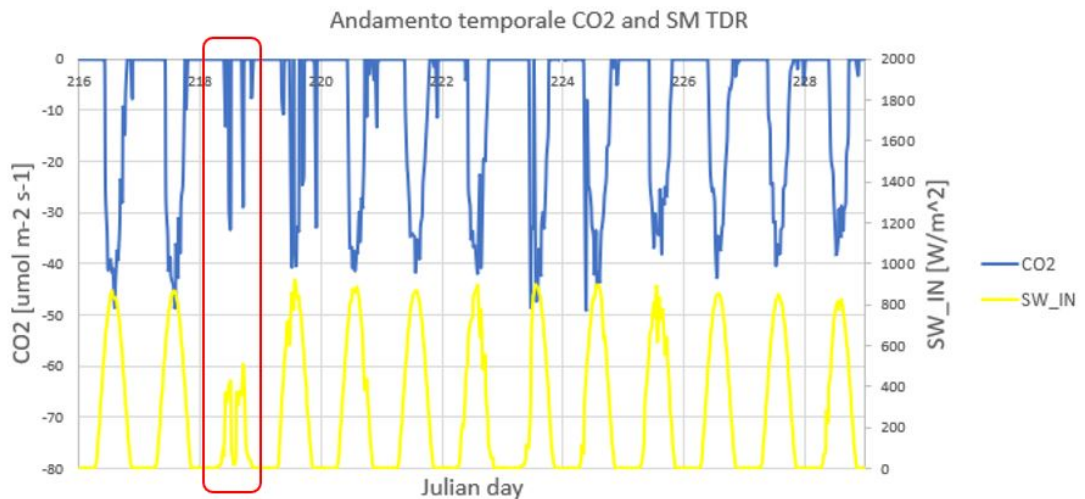


Figura 4.8: Esempio dell'individuazione delle giornate da escludere in funzione del dato di radiazione entrante ad onde corte (SW-IN)

4.5 Risultati

Utilizzando le misure delle giornate di plateau di LAI ed escludendo le giornate nelle quali l'informazione non è comparabile, è stato possibile procedere con un'analisi più efficace.

I dati dei picchi di CO₂ sono stati graficati rispetto all'umidità del suolo, misurata attraverso le sonde TDR a diverse profondità, così da poter capire se effettivamente la pianta fornisce una risposta in termini di flusso di gas all'irrigazione. Negli andamenti temporali sono stati inseriti la soglia di stress e il punto di appassimento, valutati attraverso le indagini del terreno svolte in laboratorio sui campioni di suolo prelevati in loco con le modalità descritte nella relazione del progetto ACCA [10]. Per ogni campagna di monitoraggio sono stati poi valutati anche gli andamenti della temperatura ambiente, per poter verificare se fossero presenti delle giornate anomale nel periodo preso in esame.

- **Mais 2016/2018** : Per queste campagne di monitoraggio il periodo di Plateau di LAI sono dal 3/08/2016 al 09/07/2016 nel 2016 e dal 6/07/2018 al 15/08/2018 nel 2018. I dati delle giornate mancati sono dovuti ad errori degli strumenti o alla mancata validazione del dato tanto che nel 2016 è stato possibile osservare solamente il periodo dal 3/08/2016 al 18/08/2016. I risultati sono visibili in Figura4.9 e Figura4.10
- **Noci 2020/2021** : Per queste campagne di monitoraggio il periodo osservato sono dal 27/05/2020 al 04/08/2020 nel 2020 e dal 01/06/2021 al 29/07/2021 nel 2021. La mancanza di molte giornate nei grafici delle correlazioni è dovuta alla scarsità di valori validati durante la campagne infatti le curve di CO₂ presentando molti dati mancanti. I risultati sono visibili in Figura4.11 e Figura4.12
- **Pere 2022** : Per questa campagna di monitoraggio il periodo osservato sono dal 27/05/2022 al 17/07/2022. I risultati sono visibili in Figura4.13

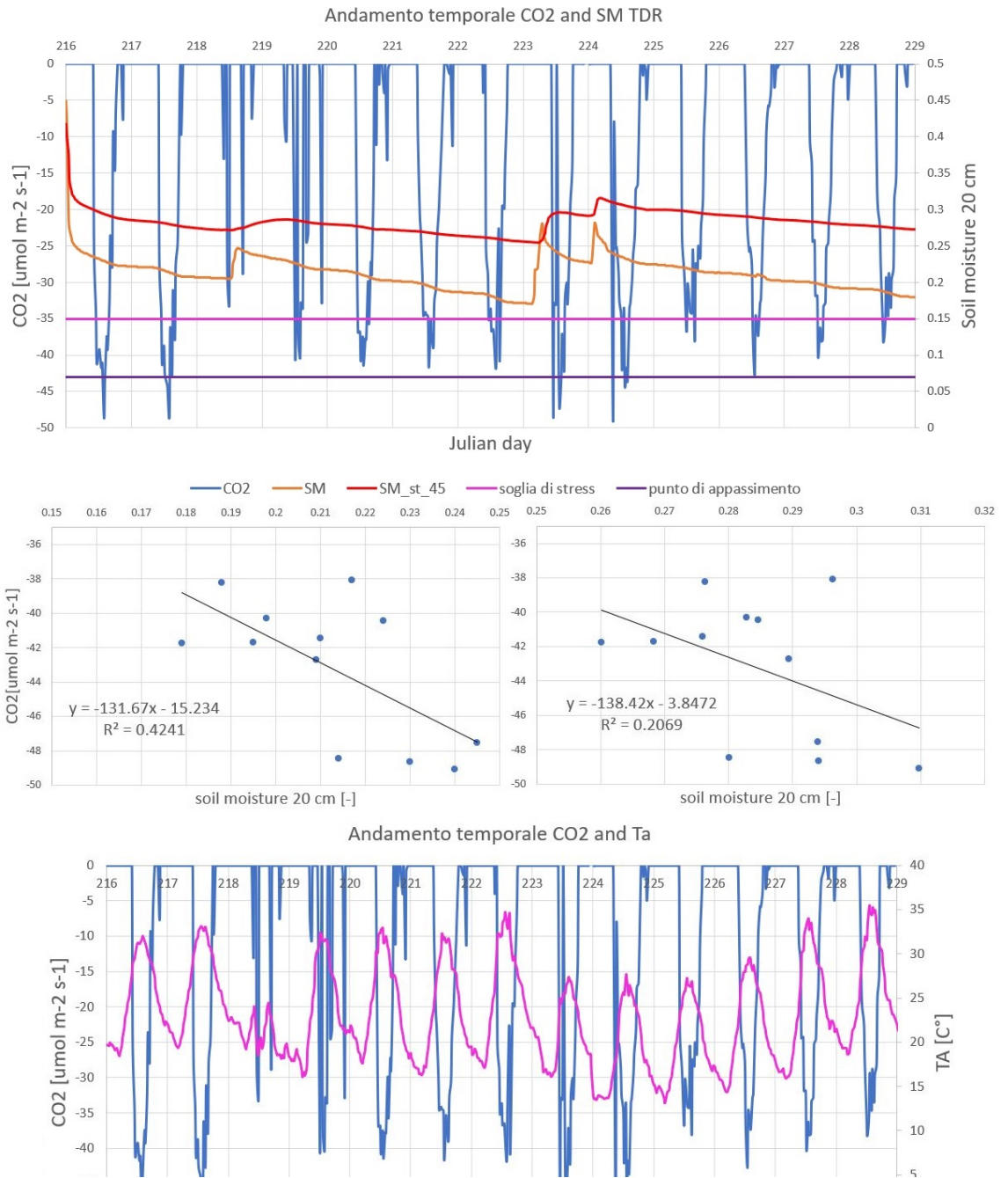


Figura 4.9: **Mais 2016**: Andamenti semiorari dell'NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili. Trend della temperatura ambiente e della CO₂

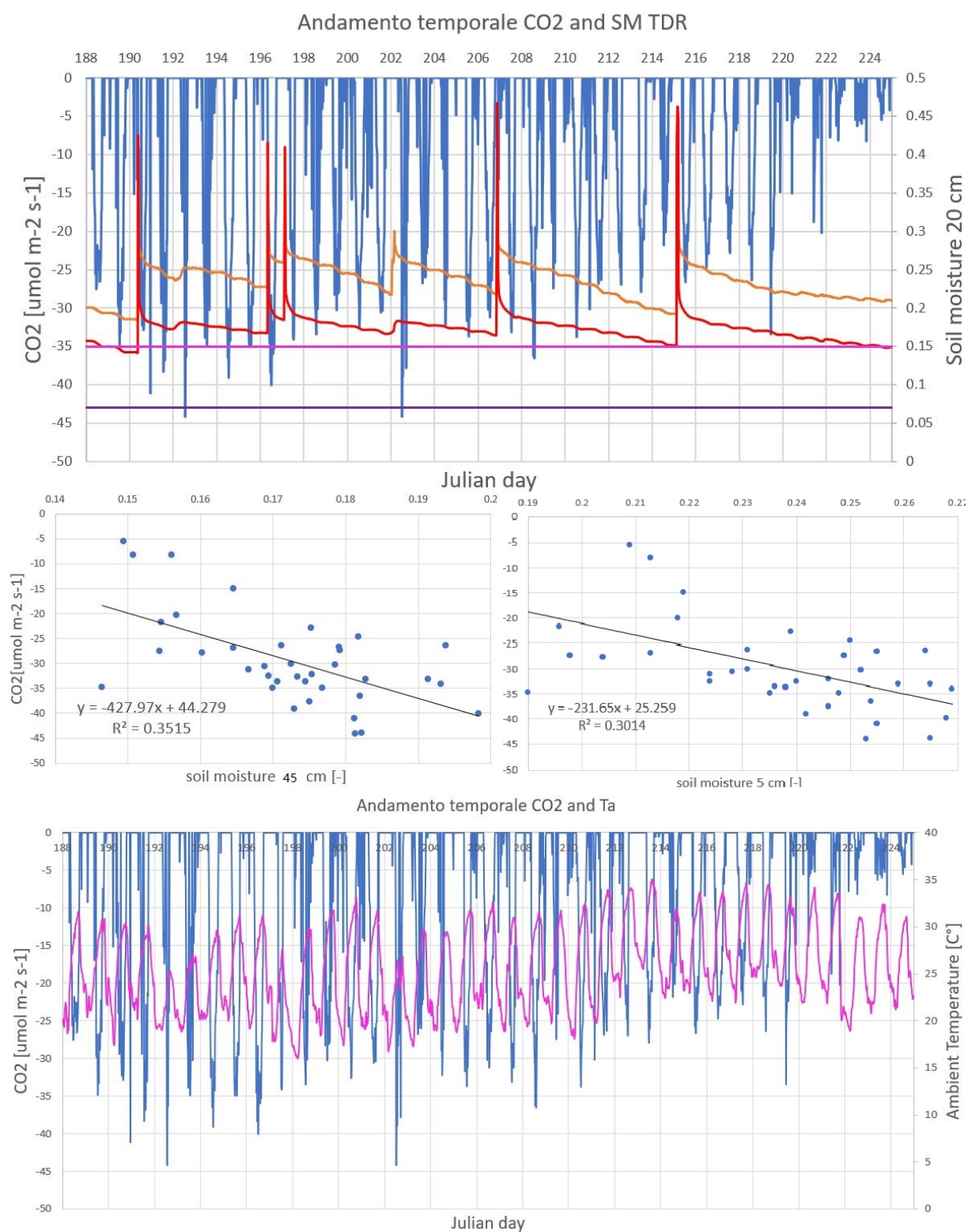


Figura 4.10: **Mais 2018**: Andamenti semiorari dell'NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili. Trend della temperatura ambiente e della CO_2

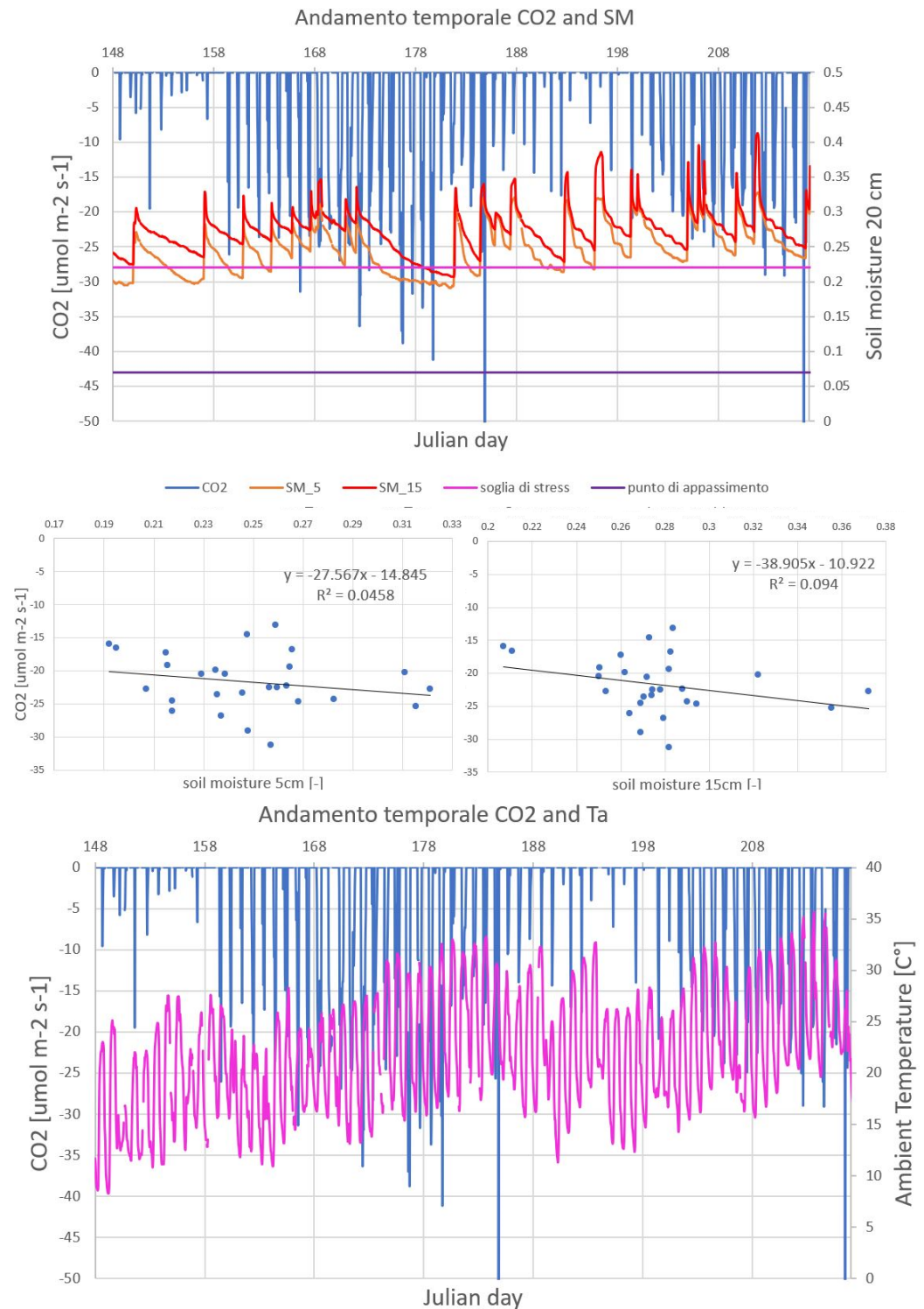


Figura 4.11: **Noci 2020**: Andamenti orari dell'NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili. Trend della temperatura ambiente e della CO₂

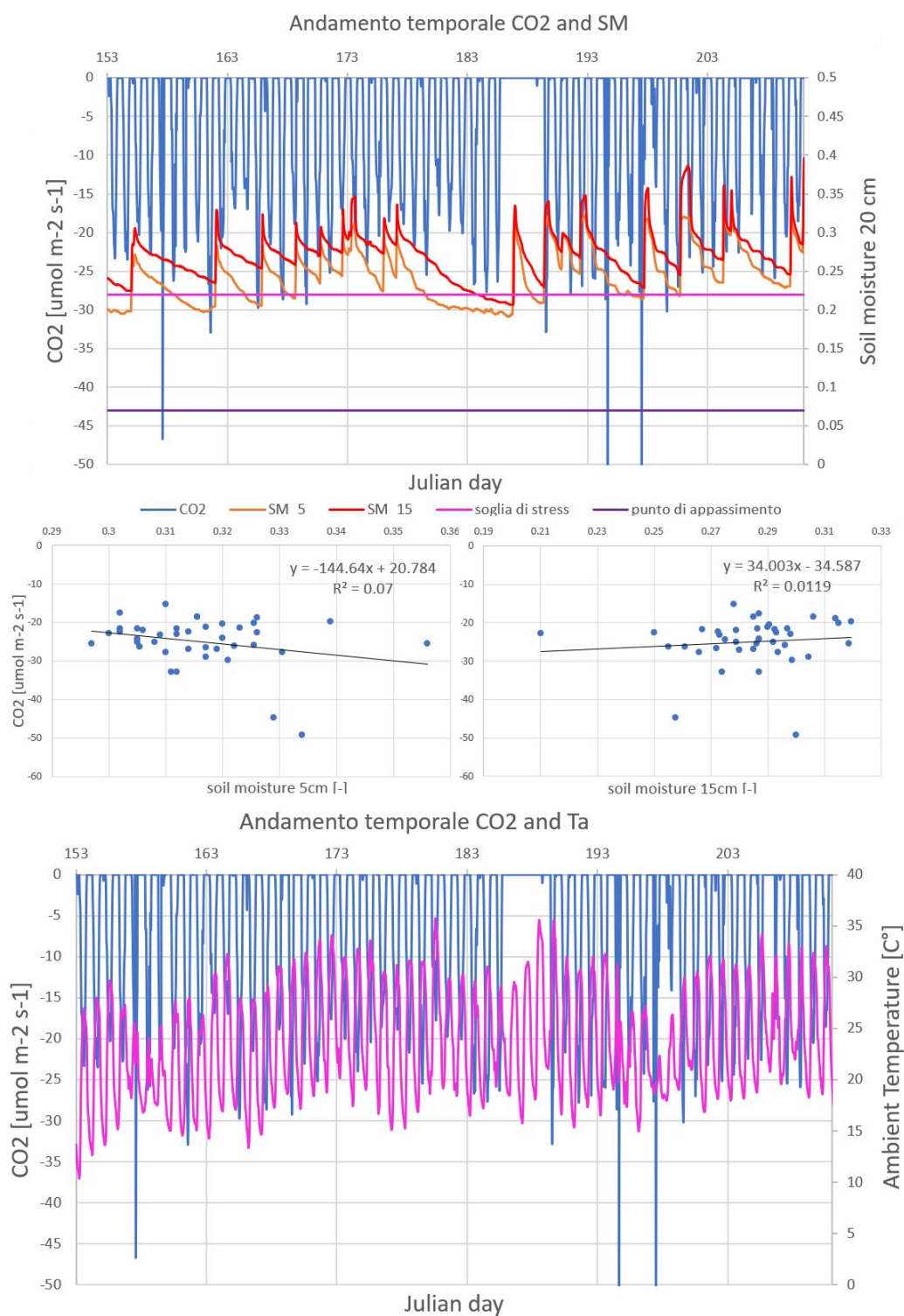
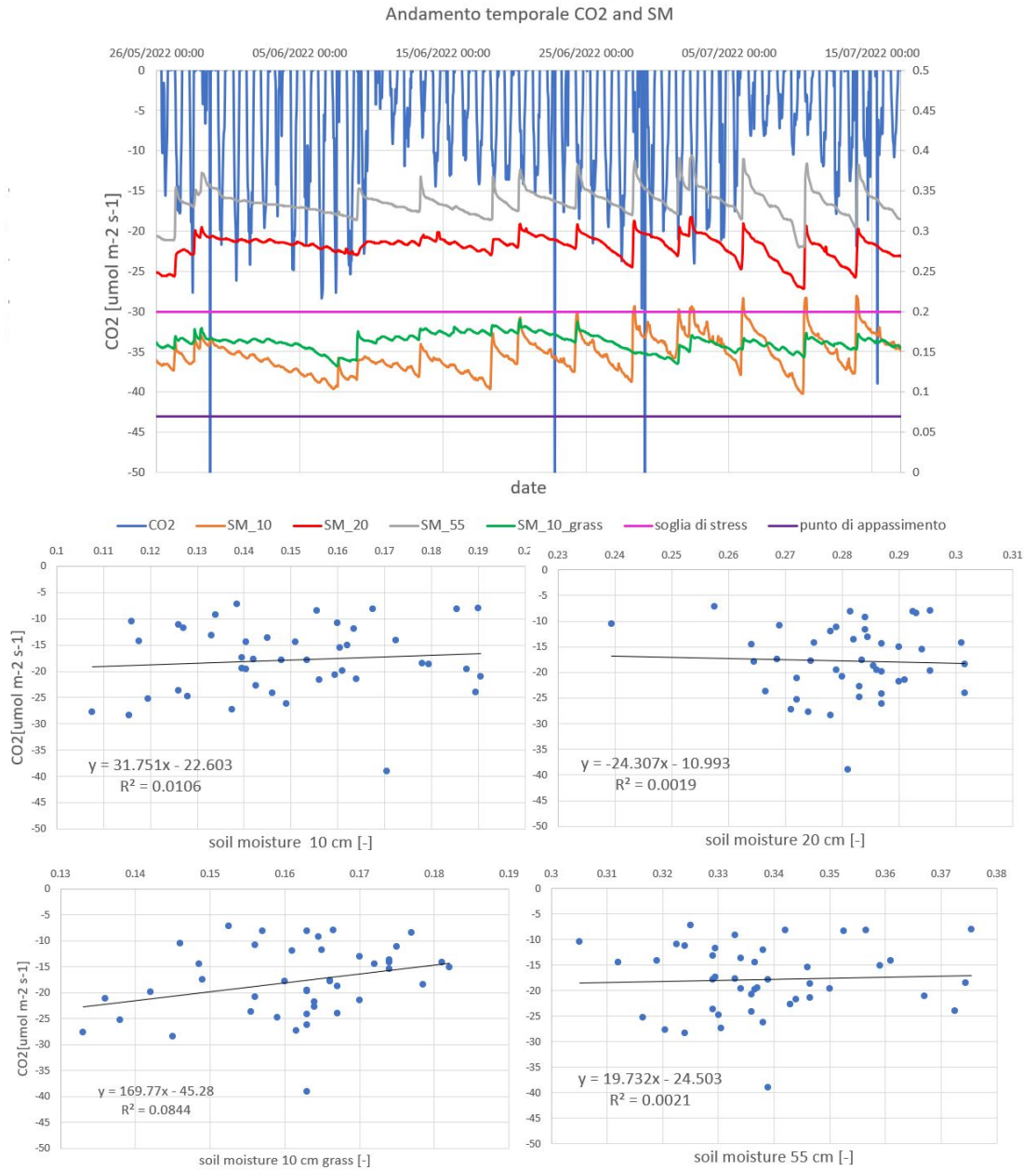


Figura 4.12: **Noci 2021**: Andamenti orari dell'NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili. Trend della temperatura ambiente e della CO_2



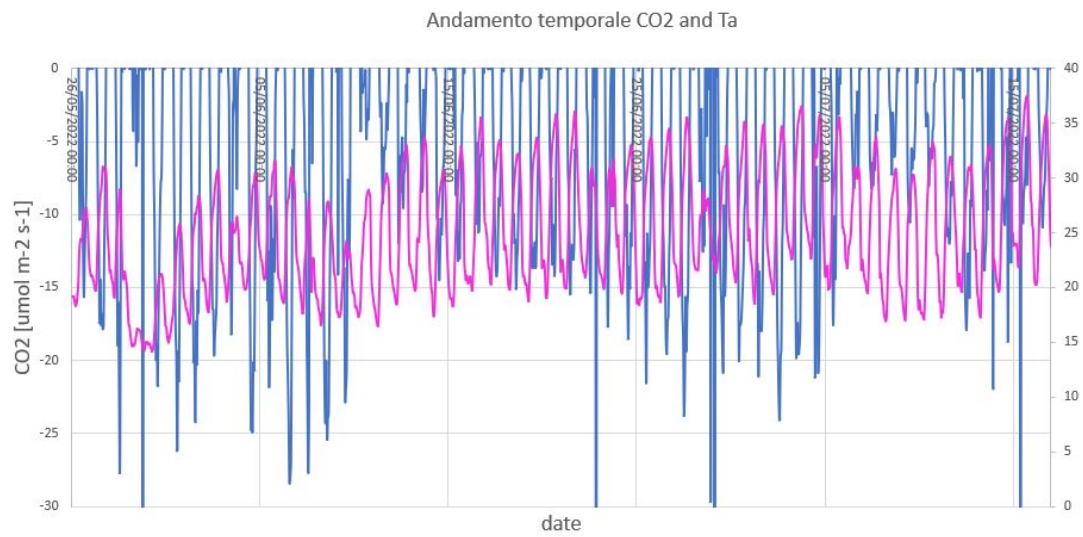


Figura 4.13: **Pere 2022**: Andamenti orari dell'NEE e dell'umidità del suolo a diverse profondità con i grafici di correlazione tra le due variabili. Trend della temperatura ambiente e della CO₂

Capitolo 5

Stima del conduttanza stomatica

5.1 Equazione Penman-Monteith

Nel 1948, Penman combinò il bilancio energetico con il metodo del trasferimento di massa e ne derivò un'equazione per calcolare l'evapotraspirazione delle piante da standard climatologici, ovvero misura delle componenti di radiazione solare, temperatura, umidità e velocità del vento. Questo metodo, in particolare, introduce il concetto di resistenza, suddividendola tra resistenza aerodinamica e superficiale espressa dai due fattori r_a ed r_s (Figura 5.1).

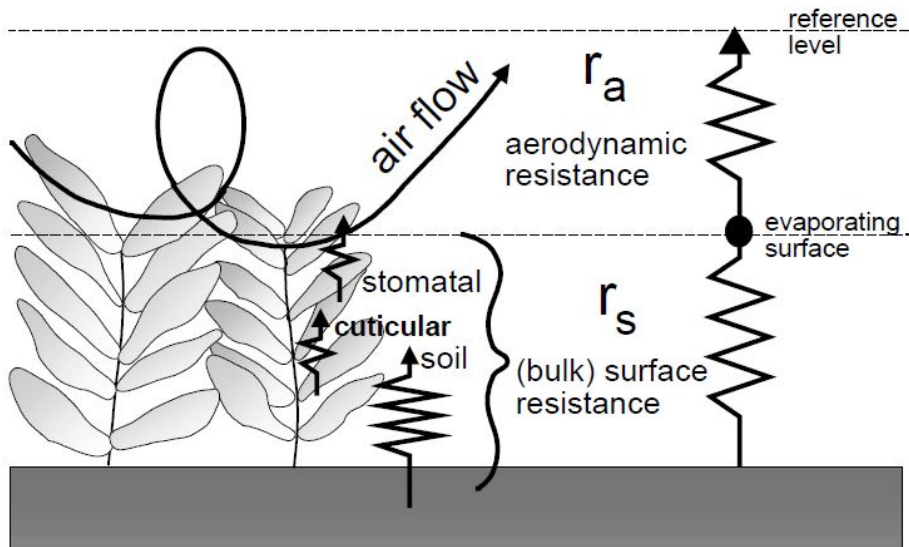


Figura 5.1: Rappresentazione semplificata della resistenza superficiale ed aerodinamica nel flusso di vapore acqueo (FAO 56 [1])

La resistenza superficiale, r_s , descrive l'impedimento del flusso di vapore dovuto all'apertura degli stomi, all'area fogliare totale e alla porzione di suolo che si considera.

La resistenza aerodinamica, r_a , descrive la resistenza impressa dalla parte alta della vegetazione che, esercitando un attrito, devia il flusso d'aria.

Sebbene il processo di scambio tra la vegetazione e l'atmosfera sia molto complesso l'utilizzo di questi due fattori di resistenza permette di ottenere buone correlazioni tra i tassi di evapotraspirazione misurati e calcolati. (FAO 56 [1])

Viene riportata l'equazione di Penman-Monteith :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (5.1)$$

dove:

- R_n è la radiazione netta
- G è il flusso di calore del suolo
- $(e_s - e_a)$ rappresenta il deficit di vapore dell'aria
- ρ_a è la densità dell'aria
- c_p è il calore specifico dell'aria
- Δ rappresenta la pendenza della relazione tra temperatura e pressione di vapore a saturazione
- γ è la costante psicrometrica
- r_s e r_a sono la resistenza superficiale e le resistenze aerodinamica

L'approccio Penman-Monteith, come formulato sopra, include tutti i parametri che governano lo scambio di energia e il corrispondente flusso di calore latente (evapotraspirazione) dalla vegetazione. L'equazione può essere utilizzata per il calcolo diretto di qualsiasi coltura, in quanto l'informazione contenuta nei parametri di resistenza è già specifica della coltura in esame.

5.1.1 Resistenza aerodinamica r_a

Il flusso di vapore dalla superficie evaporante nell'atmosfera di una pianta con altezza h è determinato attraverso la resistenza aerodinamica:

$$r_a = \frac{\ln(\frac{z_m - d}{z_{om}}) \ln(\frac{z_h - d}{z_{oh}})}{k^2 u_z} \quad (5.2)$$

dove:

- r_a resistenza aerodinamica [$s \text{ m}^{-1}$]

5.2. MISURE DI CO₂ PER LA STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE 47

- r_s altezza di misura del vento [m]
- z_h altezza di misura dell'umidità [m]
- d altezza di spostamento dalla quota zero $d = 2/3h$ [m]
- z_{om} spessore dello strato di scambio $z_{om} = 0.123h$ [m]
- z_{oh} lunghezza che regola il trasferimento di calore e vapore $z_{oh} = 0.1z_{om}$ [m]
- k costante di von Karman 0,41 [-]
- u_z velocità del vento alla quota z [m s⁻¹]

5.1.2 Resistenza superficiale r_s

L' r_s descrive la resistenza del flusso di vapore attraverso la traspirazione coltura ed evaporazione della superficie del suolo. La vegetazione non copre completamente il suolo ed il fattore di resistenza dovrebbe infatti includere gli effetti dell'evaporazione dalla superficie del suolo; Un'approssimazione accettabile per esprimere questa relazione molto complessa è:

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{active}} \quad (5.3)$$

dove:

- r_s resistenza superficiale [s m⁻¹]
- r_1 resistenza stomatica della foglia $r_1 = 100$ [s m⁻¹] quando la coltivazione è ben irrigata
- LAI_{active} indice di superficie fogliare $LAI_{active} = 0.5LAI$ [m²_{superficie fogliare} m⁻²_{superficie di suolo}]

Il LAI_{active} è l'indice della superficie fogliare che contribuisce attivamente al trasferimento di calore e vapore e generalmente è la parte superiore della pianta che viene illuminata dal sole. La resistenza stomatica, r_1 , è la resistenza media di una singola foglia. Questa resistenza è specifica per le colture e differisce sia per la tipologia che la gestione stessa delle piante.

5.2 Misure di CO₂ per la stima dell'evapotraspirazione

Fin dalle analisi preliminari i dati hanno mostrato una forte correlazione tra i valori misurati di calore latente LE e di CO_2 mostrando perciò un legame tra le emissioni di vapore acqueo e gli scambi di anidride carbonica con l'atmosfera. Per la campagna svolta nella coltivazione di mais nel 2018 (poiché presentava più dati) e per il pereto (i dati nel noceto avevano troppe criticità)

è stato elaborato un diverso approccio per andare a stimare la resistenza superficiale basandosi sull'utilizzo dei dati di CO_2 . In particolare viene proposta una modellazione di ET molto simile a quella di da Penman-Monteith dove però la stima della conduttanza superficiale (che è l'inverso della resistenza) viene fatta attraverso il dato di CO_2 . L'equazione di Penman-Monteith con le conduttanze al posto delle resistenze è così descritta:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) G_a}{\Delta + \gamma(1 + \frac{G_a}{G_s})} \quad (5.4)$$

dove gli unici termini a che cambiano sono:

- G_a che esprime la conduttanza aereodinamica $G_a = \frac{1}{r_a} [\text{m s}^{-1}]$
- G_s è la conduttanza superficiale

5.2.1 Conduttanza superficiale G_s

La stima di questo parametro nel modello proposto da Shen Tan et al., [2] è funzione dei valori misurati di CO_2 , dalla pressione parziale di anidride carbonica nell'atmosfera C_a e dal rapporto della pressione parziale del gas tra l'interno e l'esterno della pianta $\chi = \frac{C_i}{C_a}$.

$$G_s = 1.6 \frac{GPP}{C_a(1 - \chi)} \quad (5.5)$$

dove:

- 1.6 è il rapporto delle diffusività molecolari di acqua e CO_2
- C_a è la pressione parziale di CO_2 in atmosfera $C_a = 0.0304 [\text{KPa}]$
- χ è il rapporto della pressione parziale del gas tra l'interno e l'esterno della pianta $\chi = 0.45$

5.2.2 Risultati

In questo elaborato sono dunque state utilizzate le Equazioni 5.4 e 5.1 per stimare il flusso di evapotraspirazione oltre alla misura fornita della stazione eddy-covariance. L'unità standard utilizzata sia dagli strumenti che dalle equazioni 5.4 ed 5.1 per esprimere l'energia ricevuta su una superficie unitaria per unità il tempo è $[\text{W}/\text{m}^2]$. Per poterla trasformare in evaporazione equivalente in mm è stata adottato un fattore di conversione pari a l'inverso del calore latente di vaporizzazione $1/\lambda = 0,408$ in modo da ottenere una portata espressa in $[\text{mm}/\text{s}]$. Questa portata è stata successivamente moltiplicata la per il periodo di riferimento della misurazione (semiorario nel Mais e orario per il Pereto) per poter osservare il dato in $[\text{mm}]$.

Mais 2018

I risultati per la campagna di monitoraggio del Chiese del 2022 per la coltivazione di mais presa in esame sono visibili in Figura 5.2

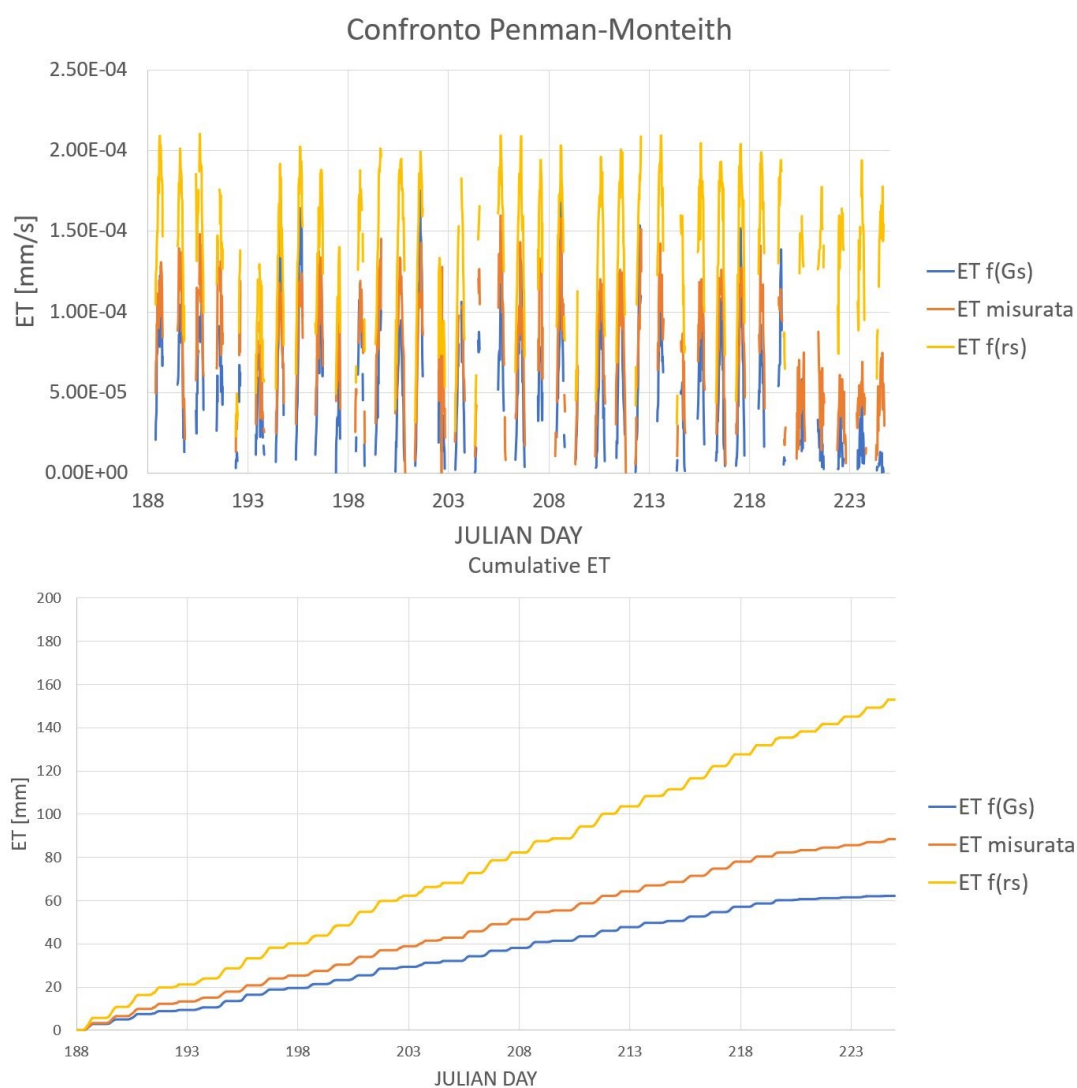


Figura 5.2: Andamenti temporali e cumulate dell'evaporazione espressa in mm di acqua per la campagna del mais nel 2018

dove viene inoltre calcolata la cumulata di evaporazione equivalente in mm per poter osservare meglio la quantità d'acqua che è evapotraspirata nel periodo preso in considerazione (Figura 5.2)

Pere 2022

I risultati per la campagna di monitoraggio di Vignola del 2022 per la coltivazione pere presa in esame sono visibili in Figura 5.3

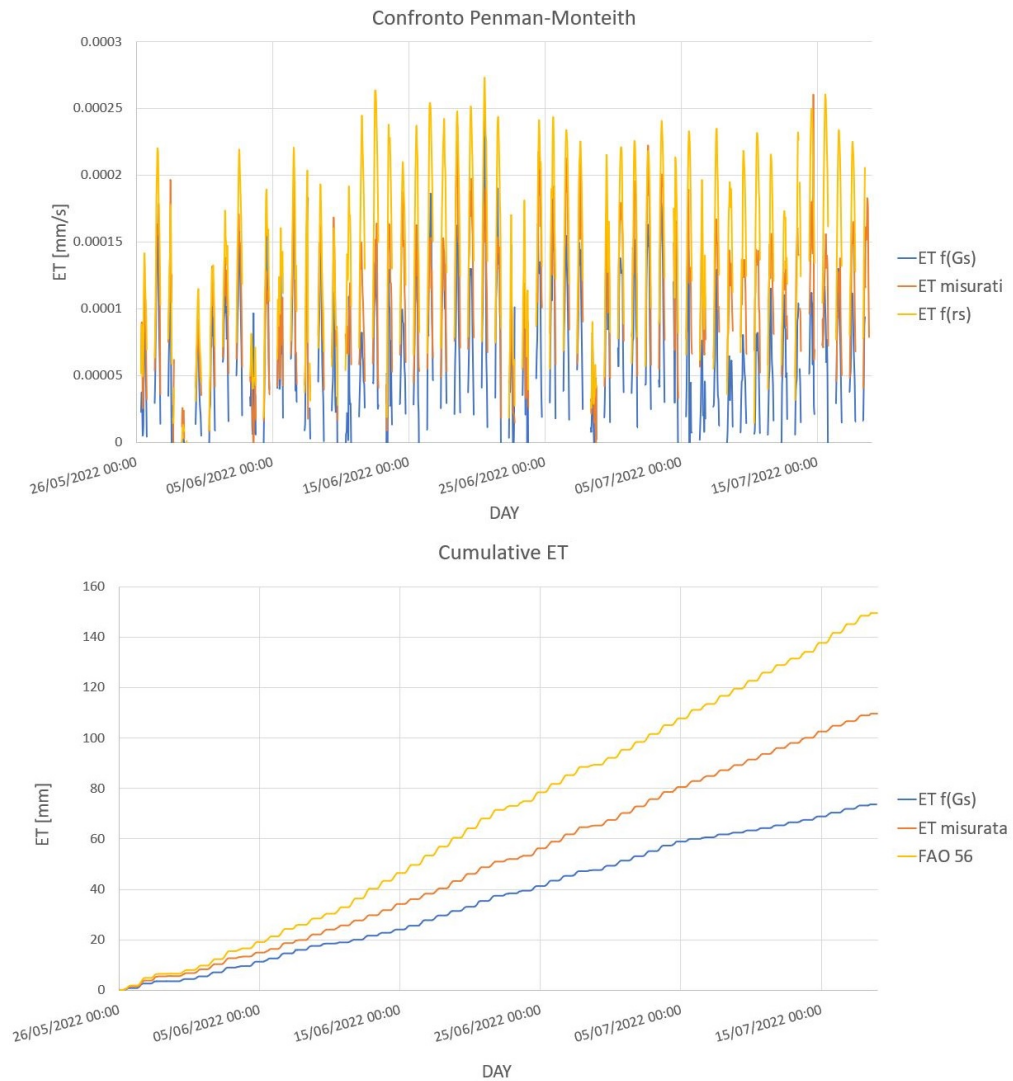


Figura 5.3: Andamenti temporali e cumulate dell'evaporazione espressa in mm di acqua per la campagna del pereto nel 2022

dove viene inoltre calcolata la cumulata di evaporazione equivalente in mm per poter osservare meglio la quantità d'acqua che è evapotraspirata nel periodo preso in considerazione (Figura 5.3)

5.3 Calibrazione

Sulla base delle misure svolte attraverso la stazione eddy viene infine calibrato il parametro di resistenza stomatale calcolato attraverso l'equazione 5.5. G_s è stato moltiplicato per un parametro k così da ottenere un valore di λET_k molto più fedele a quello della stazione. Per la fase di calibrazione è stata calcolata la somma dei quadrati degli errori (SSE sum of square error) in modo che la massa totale di CO_2 scambiata durante il periodo fosse il più simile possibile a quella osservata.

$$SSE = \sum (\lambda ET_{\text{misurato}} - \lambda ET_{\text{modellato}})^2 \quad (5.6)$$

L'SSE è successivamente stato minimizzato cambiando il parametro k di calibrazione con il risolutore di excel portando i risultati visibili in Figura 5.4

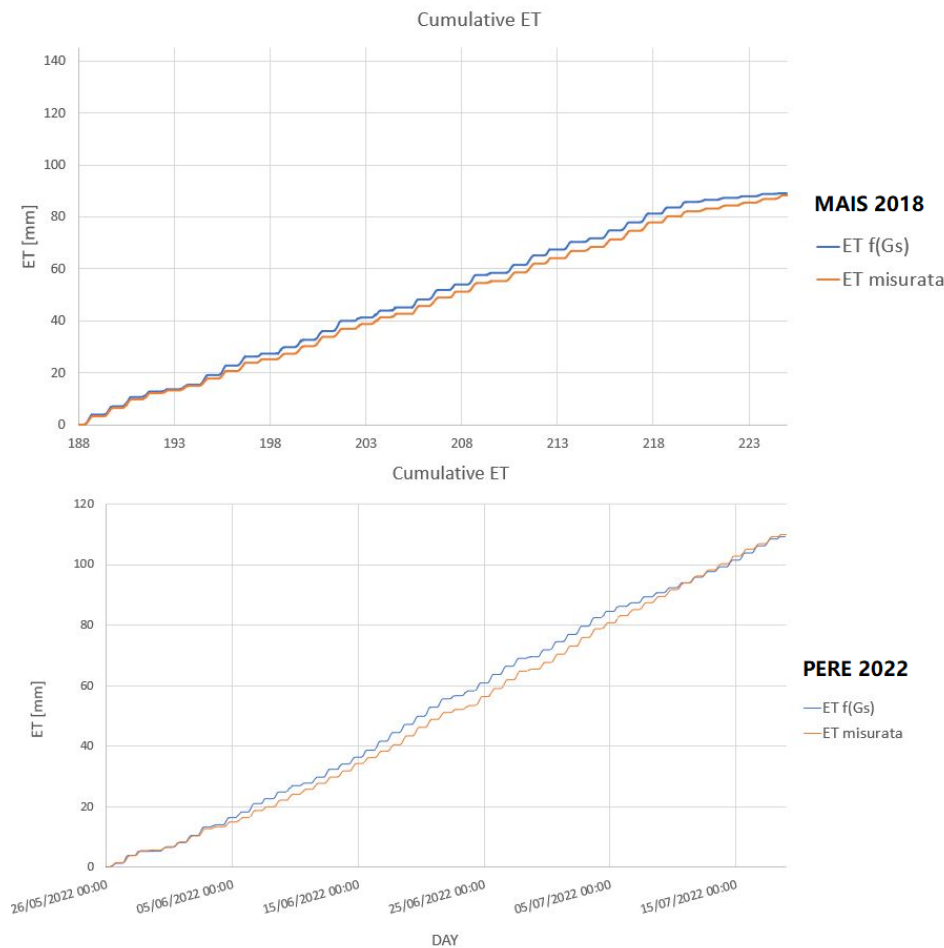


Figura 5.4: Cumulate con il valore di conduttanza stomatica G_s calibrato

Vengono di seguito riportati i valori cumulati espressi in [mm] per i periodi considerati nelle seguenti tabelle:

Anno	mm tot misurati	mm/gg
Mais 2018	88	2.4
Pere 2022	109	2.9

Anno	mm tot modellati	mm/gg modellati	G_s [m/s]	r_s [s/m]
Mais 2018	62	1.7	0.0016	633
Pere 2022	71	1.9	0.0009	1067

Anno	mm tot calibrati	mm/gg calibrati	$G_{s\text{calibrato}}$	$r_{s\text{calibrato}}$
Mais 2018	88	2.4	0.003	333
Pere 2022	101	2.7	0.0025	400

il Parametro di calibrazione $K_{\text{calibrazione}}$ inserito nella formula 5.5 è risultato:

- $K_{\text{calibrazione}} = 1.9$ per la campagna di monitoraggio del Mais del 2018
- $K_{\text{calibrazione}} = 2.7$ per la campagna di monitoraggio del Pereto del 2022

Perciò si può affermare che il modello utilizzato va a sottostimare l'effettiva evapotraspirazione delle piante. Utilizzando la formula 5.5 che calcola la conduttanza della pianta come $f(C_{O_2})$ è però possibile mantenere un trend molto più coerente ai dati misurati (Figura 5.4) dove grazie ad un'appropriate calibrazione si è riuscito ad ottenere un andamento praticamente identico.

Conclusioni

Il lavoro analizza i flussi di CO₂ e di calore latente (Evapotraspirazione) in funzione delle variabili meteorologiche e di umidità del suolo per campi irrigui sia di colture erbacee che colture arboree.

5.4 Sensibilità della CO₂ all'irrigazione

Dalle analisi svolte è possibile affermare che le misure di CO₂ evidenziano una scarsa correlazione con l'umidità del suolo e quindi con l'irrigazione. Se ne deduce che per i campi irrigui esaminati lo scambio di CO₂ tra la coltivazione e l'atmosfera (fotosintesi e respirazione della pianta) non sembra limitato dal contenuto idrico del suolo. Il turno irriguo garantisce quindi per le colture prese in esame una piena disponibilità idrica e conseguentemente la pianta non fornisce alcuna risposta misurabile tramite i flussi di CO₂. Al fine di poter fornire un'analisi più approfondita si rende necessario l'utilizzo di dati che contengano un periodo di stress idrico dove poter osservare un'effettiva risposta della pianta alla mancanza di irrigazione.

Coltura	θ_{stress}	θ_{campo}	θ_{min}
Mais 2018	0.15	0.28	0.14
Mais 2016	0.15	0.28	0.16
Noci 2020	0.22	0.39	0.2
Noci 2021	0.22	0.39	0.2
Pere 2022	0.2	0.32	0.21

5.5 Uso delle misure di CO₂ per il controllo dell'evapotraspirazione

Il lavoro ha permesso di calibrare per la coltura erbacea del Mais e per la coltura arborea di un pereto la resistenza superficiale che regola il flusso di evapotraspirazione nel modello di Penman-Monteith.

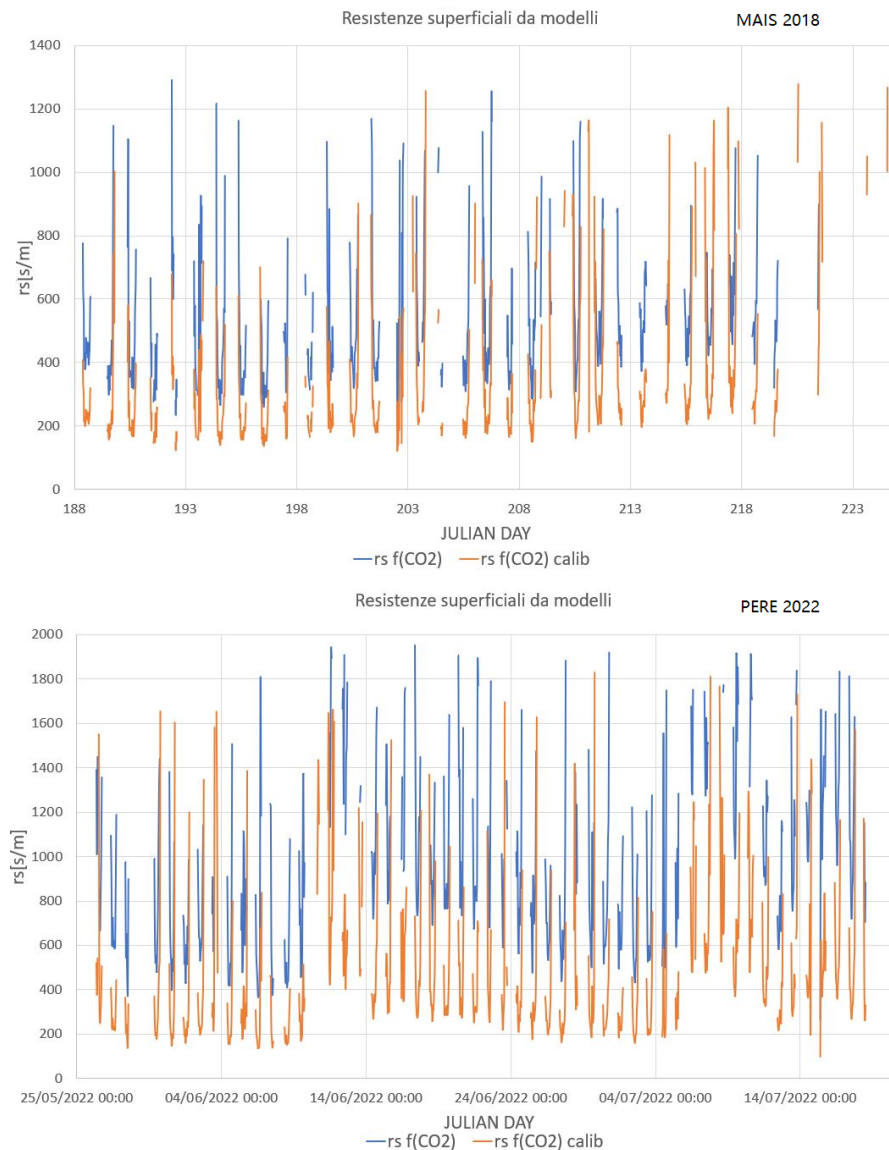


Figura 5.5: Resistenza superficiale calcolata con il modello Allen et al. (FAO 56) [1] e con il modello Shen Tan et al. [2] pre e post calibrazione

5.5. USO DELLE MISURE DI CO₂ PER IL CONTROLLO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE 55

Attraverso la calibrazione del modello proposto da Shen Tan et al. [2] per il calcolo della conduttanza G_s è stato dunque possibile stimare una resistenza r_s che, a differenza di quella proposta da Allen et al. [1], possa variare nel tempo in funzione dello scambio di CO₂ come visibile nelle Figura 5.5. I risultati finali per la stima delle resistenze (calcolate come valore medio nel caso del modello di Shen Tan et al. [2]) sono :

Coltura	Mais 2018	Pere 2022
rs (FAO 56) [s/m]	83	100
mm tot	152 (+70%)	149 (+50%)
rs f(CO ₂) [s/m]	633	1067
mm tot	62 (-30%)	71 (-30%)
rs f(CO ₂) _{calibrata} [s/m]	333	400
mm tot	88	101

I risultati mostrano l'importanza della stima della resistenza stomatica nell'evapotraspirazione (in queste analisi potenziale dato il mancato superamento della soglia di stress) e quindi del relativo bilancio idrico del suolo. Per i periodi di massima crescita della vegetazione si osserva che l'espressione della FAO comporta una sovrastima dell' evapotraspirazione di circa il 70% rispetto al valore misurato. Utilizzando invece il modello proposto da Shen Tan et al.[2], dove la conduttanza stomatica è una variabile del flusso di CO₂, si osserva oltre ad una variabilità della resistenza in funzione del flusso di CO₂, una sottostima rispetto alla misura eddy di circa il 30% e di circa il 150% rispetto a quella del modello FAO. Tale aspetto risulta importante nella definizione dei volumi irrigui da destinare alle colture anche applicando tecniche di irrigazione di precisione.

Bibliografia

- [1] Richard G. Allen and Luis S. Pereira. Fao irrigation and drainage paper no. 56. crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).
- [2] Shen Tan, Han Wang, Iain Colin Prentice, and Kun Yang. Land-surface evapotranspiration derived from a first-principles primary production model. *Environmental Research Letters*, 16, 10 2021.
- [3] Project Coordinator, Marco Mancini, Chiara Corbari, Alessandro Cepi, Gabriele Lombardi, Giovanni Ravazzani, Ben Charfi, Nicola Paciolla, Erika Ferrari, Luca Cerri, Josè Sobrino, Drazen Skokovic, Li Jia, Chaolei Zheng, Guangcheng Hu, (Radi-Cas, Arjan Peters, Moorman Joos, Frank Van Der Bolt, Massimo Menenti, Monica Herrero Huerta, Seyed Enayat, Hosseini Aria, Raffaele Salerno, Alessandro Perotto, Romu Romero, Arnau Amengual, and Alejandro Hermoso Verger. Sim smart irrigation from soil moisture forecast using satellite and hydro-meteorological modelling technical report.
- [4] Aubinet et al. *Eddy Covariance*. Springer Netherlands, 2012.
- [5] George Burba. Eddy covariance method for scientific, regulatory, and commercial applications.
- [6] 2003 Baldocchi, D. Dennis baldocchi et al. lecture 3 micromet flux measurements eddy.
- [7] 2008. Foken, T. Micrometeorology. berlin: Springer, pp. 306, isbn 978 3 540 74665 2.
- [8] Wilfried Brutsaert. *Hydrology*. Cambridge University Press, 2 2023.
- [9] 1994. Garratt, J. The atmospheric boundary layer. cambridge: Cambridge university press, pp.316, isbn 0 521 38052 9.

- [10] Ing. Daniele Masseroni Dott. Alessandro Ceppi Dott. Ing. Giovanni Ravazzani Giuseppe Milleo Prof. Ing. Marco Mancini, Dott.ssa Ing. Chiara Corbari. Progetto acca.
- [11] James M Wilczak, Steven P Oncley, and Steven A Stage. Sonic anemometer tilt correction algorithms, 2001.
- [12] W J Massman. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems, 2000.
- [13] Dean Vickers and L Mahrt. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data.
- [14] Pearman G. Leuning R. 1980. Webb, E. Correction of the flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. bound. lay. meteorol. , 23,251-254.
- [15] Valentini M. Georgiadis T. 2002. Sozzi, R. Introduzione alla turbolenza atmosferica, concetti stime e misure. milano/bologna.
- [16] A. Ceppi D. Masseroni M. Mancini C. Corbari, G. Ravazzani. Uso di misure eddy correlation e di un modello di bilancio di massa ed energia per meglio interpretare i flussi misurati.
- [17] Richard J Geider, Evan H Delucia, Paul G Falkowski, Adrien C Finzi, J Philip Grime, John Grace, Todd M Kana, Julie La Roche, Stephen P Long, Bruce A Osborne, Trevor Platt, I Colin Prentice, John A Raven, William H Schlesinger, Victor Smetacek, Venetia Stuart, Shubha Sathyendranath, Richard B Thomas, Tom C Vogelmann, Peter Williams, and F Ian Woodward. Primary productivity of planet earth: biological determinants and physical constraints in terrestrial and aquatic habitats.
- [18] Michele Riondino, Paul Di Tommasi, Teresa Bertolini, Angelo Fierro, and Vincenzo Magliulo. Bilanci di carbonio di una coltura irrigua di mais (zea mais l.) in ambiente mediterraneo, 2005.
- [19] Chiara Corbari, Raffaele Salerno, Alessandro Ceppi, Vito Telesca, and Marco Mancini. Smart irrigation forecast using satellite landsat data and meteo-hydrological modeling. *Agricultural Water Management*, 212:283–294, 2 2019.