

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

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

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE VITICOLE ED
ENOLOGICHE

L'evapotraspirazione del vigneto: risultati del
monitoraggio nella stazione di Lison

Relatore:

Prof. Andrea Pitacco

Correlatore:

Dott. Luca Tezza

Laureando:

Francesco Allari

Matricola n. 1234539

ANNO ACCADEMICO 2021 / 2022

Sommario

RIASSUNTO	I
ABSTRACT	III
1 INTRODUZIONE	1
1.1 SITUAZIONE GENERALE.....	1
1.2 BILANCIO IDRICO	4
1.3 POTENZIALE IDRICO.....	5
1.4 EVAPOTRASPIRAZIONE.....	6
1.5 DEFICIT DI PRESSIONE DI VAPORE (VPD).....	7
1.6 BILANCIO RADIATIVO	8
1.7 EQUAZIONE DI PENMAN-MONTEITH.....	9
1.7.1 RESISTENZA AERODINAMICA.....	12
1.7.2 RESISTENZA COLTURALE O SUPERFICIALE.....	13
1.8 EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO (ET ₀).....	14
1.8.1 EQUAZIONE DI PENMAN-MONTEITH PER IL CALCOLO DELL'ET ₀	15
1.9 COEFFICIENTE COLTURALE (K _c).....	16
1.10 METODO <i>ONE-STEP</i> E <i>TWO-STEP</i> PER LA STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE.....	18
1.11 STRESS IDRICO E IRRIGAZIONE.....	19
1.12 <i>EDDY COVARIANCE</i>	19
1.13 SCOPO DELLO STUDIO.....	22
2 MATERIALI E METODI	22
2.1 SITO DI STUDIO.....	22
2.1.1 IL VIGNETO.....	23
2.1.2 IL CLIMA.....	23
2.1.3 IL SUOLO.....	23
2.2 STRUMENTI UTILIZZATI.....	24
2.3 CALCOLO DEL COEFFICIENTE COLTURALE.....	26
2.3.1 INTERVALLI DI SVILUPPO FAO.....	28
2.4 INVERSIONE DELLA FORMULA DI PENMAN-MONTEITH PER LA STIMA DI R _c	28
3 RISULTATI	30
3.1 ANDAMENTO METEO.....	30
3.2 STIMA DEI COEFFICIENTI COLTURALI MEDIANTE IL METODO <i>TWO-STEP</i>	34
3.3 STIMA DEI COEFFICIENTI COLTURALI.....	36
3.4 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA AERODINAMICA.....	39
3.5 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA COLTURALE	39
3.6 CONFRONTO DELL'ET _c CON METODO <i>ONE-STEP</i> E <i>TWO-STEP</i>	42
4 CONCLUSIONE	45
5 BIBLIOGRAFIA	47
6 SITOGRAFIA	48

RIASSUNTO

Il cambiamento climatico in atto sta portando ad un innalzamento delle temperature medie annuali globali, ma soprattutto ad una variazione nella distribuzione e nell'intensità delle precipitazioni, spesso accoppiata a marcate ondate di calore estive. In questa nuova cornice, è di fondamentale importanza monitorare i consumi idrici effettivi del vigneto e caratterizzare i possibili episodi di stress idrico, anche in quelle aree dove la precipitazione è ancora, su base annua, piuttosto abbondante come nella Regione Veneto. È opportuno valutare, inoltre, se i coefficienti colturali utilizzati per il computo dell'evapotraspirazione siano sufficientemente rappresentativi. Per raggiungere tali scopi, in questo studio è stato condotto un monitoraggio dell'evapotraspirazione reale di un vigneto del Veneto orientale, tramite la tecnica *dell'Eddy Covariance*. Questo ha permesso di conoscere l'evapotraspirazione effettiva del vigneto, consentendo di apprezzare situazioni di stress idrico e relative conseguenze sull'attività fotosintetica della vegetazione. Nella tesi sono riportati alcuni risultati preliminari, utili alla determinazione dei consumi idrici della vite.

ABSTRACT

The ongoing climate change is leading to a rise in global annual average temperatures, but above all to a change in the distribution and intensity of rainfall, often coupled with marked summer heat waves. In this new framework, it is of fundamental importance to monitor the actual water consumption of the vineyard and characterize the possible episodes of water stress, even in those areas where precipitation is still, on an annual basis, rather abundant as in the Veneto Region. It is also advisable to evaluate whether the crop coefficients used for the calculation of evapotranspiration are sufficiently representative. To achieve these purposes, in this study a real evapotranspiration monitoring of a vineyard in eastern Veneto was carried out, using the Eddy Covariance technique. This allowed us to know the actual evapotranspiration of the vineyard, allowing us to appreciate situations of water stress and related consequences on the photosynthetic activity of the vegetation. The thesis reports some preliminary results, useful for determining the water consumption of the vine.

1 INTRODUZIONE

1.1 SITUAZIONE GENERALE

Il clima nei millenni è sempre variato alternando periodi interglaciali a periodi glaciali, ad una velocità impercettibile per gli esseri umani. Diversamente dal passato, il riscaldamento globale odierno è così veloce da avere impatti diretti sulle nostre vite. La causa primaria di questo rapido riscaldamento è da ricercare nel relativamente rapido aumento dei gas serra generati dalle attività dell'uomo (IPCC, 2021).

Il rapporto di valutazione del 2021 dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) sancisce un aumento di 1.1 °C rispetto 1850, ovvero all'era preindustriale. Un aumento di tale portata è senza precedenti negli ultimi 2000 anni.

In figura 1 è possibile vedere come la componente delle emissioni fossili, prima quasi inesistente, sia oggi la principale responsabile delle emissioni di CO₂. L'IPCC stima che attualmente le concentrazioni di CO₂ in atmosfera siano le più alte da oltre 2 milioni di anni, mentre le concentrazioni di CH₄ e NO₂ siano le più alte degli ultimi 800.000 anni. In particolare, dal 1750 la CO₂ è aumentata del 47% e il CH₄ del 156%. Tali variazioni erano state notate solo nell'arco di 800.000 anni.

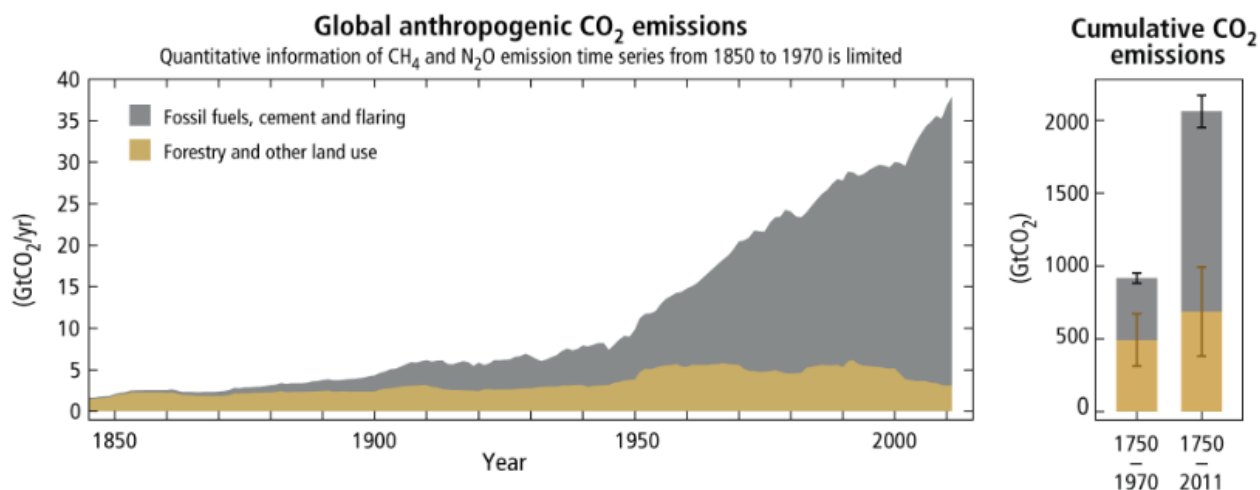


Figura 1, andamento delle emissioni di CO₂ negli ultimi due secoli (IPCC, 2021).

Una conseguenza diretta dell'aumento dei gas ad effetto serra (GHG) e del conseguente innalzamento delle temperature, è lo scioglimento dei ghiacci. Infatti, ci sono evidenze che dagli anni '50 ad oggi la velocità con cui si sono ritirati i ghiacciai è senza precedenti negli ultimi

2000 anni. Ciò causa un aumento del livello dei mari che non è mai stato più rapido negli ultimi 3000 anni.

L'IPCC ha individuato alcuni dei principali effetti che hanno un impatto diretto sulla vita umana:

- Ondate di calore estreme sempre più frequenti, a livelli difficilmente raggiungibili se non ci fosse l'influenza dell'uomo.
- Maggiore probabilità di fenomeni piovosi intensi.
- Fenomeni di siccità agricola ed ecologica a causa dell'aumento dell'evapotraspirazione dei terreni e della diversa distribuzione temporale delle piogge.
- Ciclone di forte intensità a latitudini sempre più spostate verso nord.

Per quanto riguarda l'Italia, la situazione è in tendenza con le dinamiche globali. Ponendo uno sguardo al futuro gli effetti che noteremo nel clima saranno diversi a seconda delle regioni considerate. Il grafico in figura 2 mostra i due scenari di innalzamento delle temperature più probabili (RCP 4.5 e RCP 8.5) al nord, centro e sud Italia.

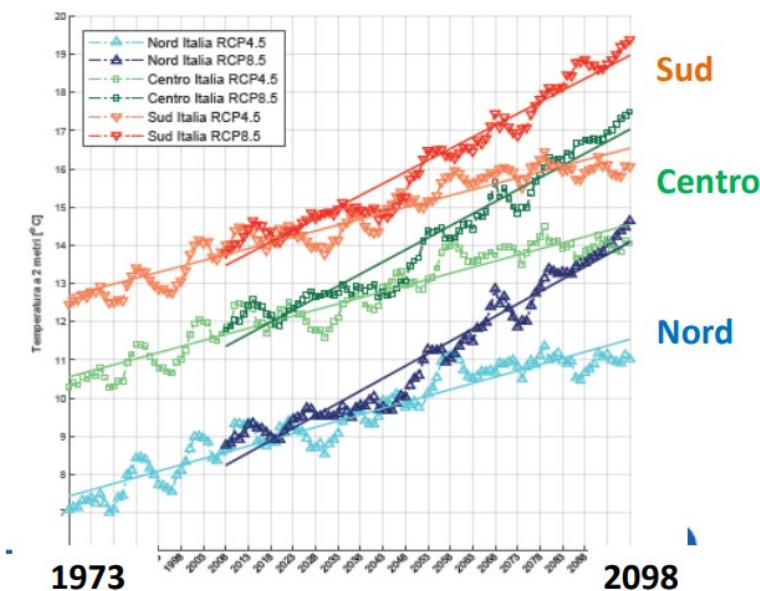


Figura 2, diversi scenari per l'aumento delle temperature in Italia (IPCC, 2021).

RCP (Representative Concentration Pathways) è un indice utile a indicare uno scenario climatico espresso in concentrazioni di gas serra. Il numero associato all'RCP si riferisce alla forzante radiativa, ovvero quanti W/m^2 di calore in più arriveranno sulla superficie terrestre. Lo scenario 8.5 ipotizza che non venga presa nessuna

contromisura e ci porta ad un aumento di circa $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ entro il 2100; lo scenario 4.5 assume la messa in atto di importanti iniziative per il controllo delle emissioni e ipotizza un aumento di circa $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ entro il 2100 (figura 2).

Per quanto riguarda le precipitazioni in uno scenario RCP4.5 ci aspettiamo un calo soprattutto al nord nel periodo estivo. Uno scenario RCP8.5 causerebbe una concentrazione delle piogge

nei mesi invernali e un ulteriore calo nel periodo estivo soprattutto nelle zone montane (figura 3). L'assenza di precipitazioni in zone montane e il contestuale innalzarsi delle quote a cui è possibile avere neve causerebbe un enorme problema per le riserve idriche da sfruttare nei mesi estivi.

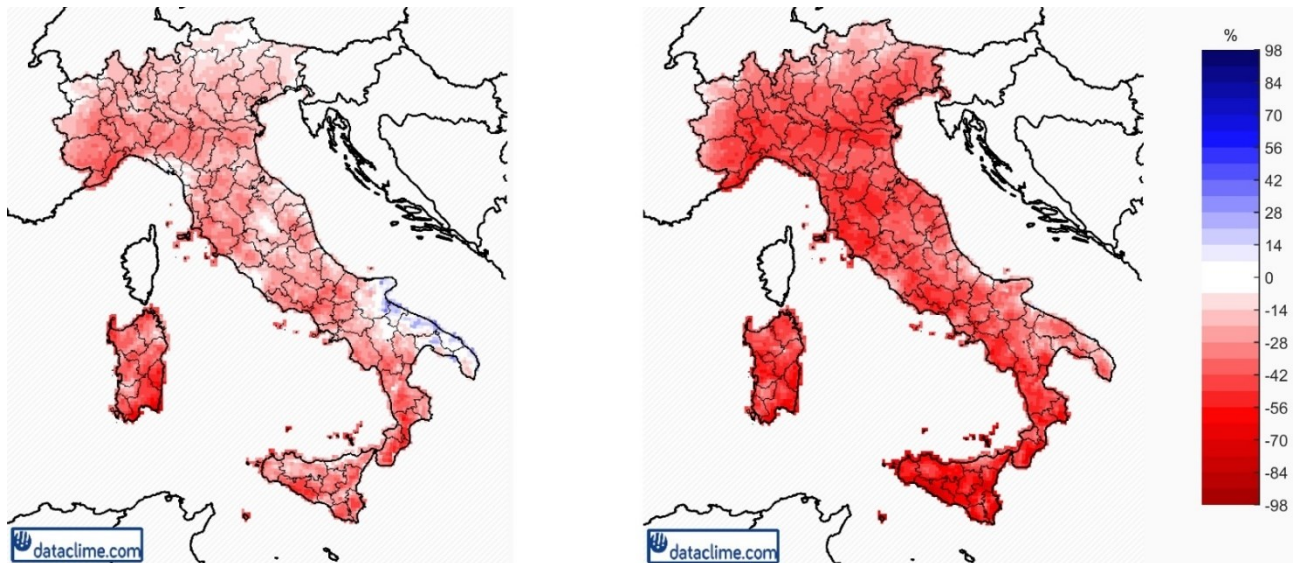


Figura 3, rappresentazione della piovosità estiva: a sinistra la situazione prevista entro il 2050 mentre a destra la situazione entro il 2070, in entrambi i casi con RCP 4.5 (CMCC, 2021).

In Veneto l'andamento delle temperature massime evidenzia un generale aumento dei valori sia per quanto riguarda le medie annuali che le medie stagionali, più marcato in estate che in inverno (+ 1.8 °C in 50 anni). Anche le minime evidenziano un trend positivo con un aumento di 1.1 °C. Inoltre sono sempre frequenti giorni, anche consecutivi, in cui le temperature non scendono mai sotto i 20 °C (ARPA).

Per quanto riguarda le precipitazioni in Veneto il dato sembra costante, esiste una lieve tendenza negativa ancora non statisticamente significativa. La reale variazione sta avvenendo nell'intensità e nella distribuzione delle precipitazioni. Infatti gli eventi di pioggia intensa sono sempre più frequenti ma sono intervallati da lunghi periodi siccitosi (figura 4).

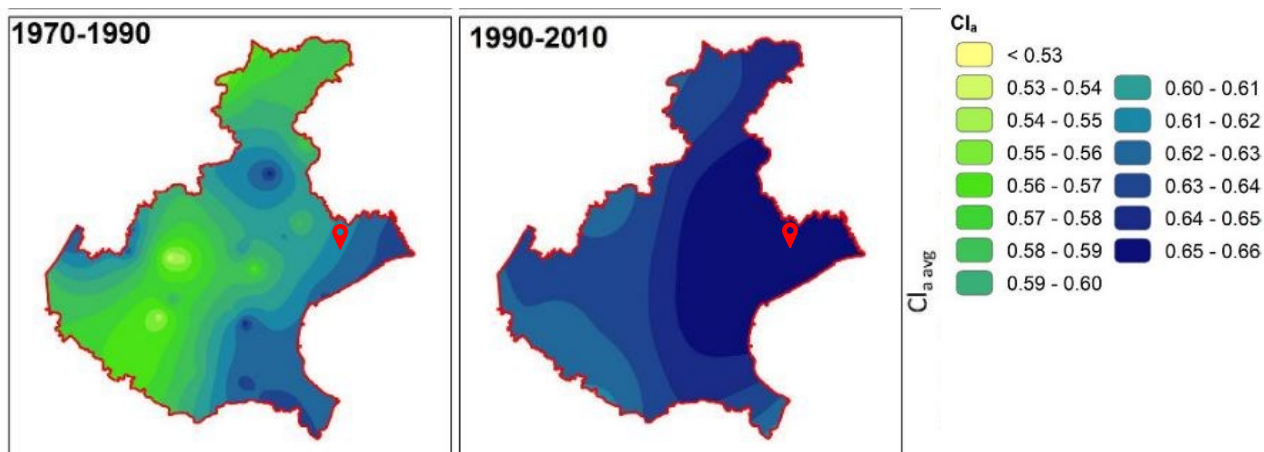


Figura 4, evoluzione nell'intensità degli eventi piovosi, l'indicatore evidenzia la posizione del sito di studio (Sofia et al, 2017).

Come sottolineato dall'Arpa, i trend appena proposti rappresentano andamenti evolutivi generali risultato di condizioni metereologiche anche molto variabili e contrastanti nel tempo. Il manifestarsi di fenomeni estremi di segno opposto ai trend sopracitati è altamente probabile.

Alla luce di quanto emerso dal rapporto IPCC e dai dati Arpa relativamente ad innalzamento delle temperature, soprattutto estive, e della sempre più elevata irregolarità temporale nelle precipitazioni, in ambito agricolo diventa fondamentale la conoscenza dei dati relativi all'evapotraspirazione reale delle colture. Una più precisa conoscenza dei loro fabbisogni irrigui è fondamentale per poter modulare l'irrigazione adattandola alle reali esigenze della coltura e utilizzando la risorsa idrica in modo efficiente. Infatti, un utilizzo oculato delle risorse idriche risulta sempre più importante per evitare inutili sprechi che potranno avere ricadute sia ambientali che economiche e sociali.

1.2 IL BILANCIO IDRICO

In agricoltura è sempre stato importante conoscere il bilancio idrico della coltura in oggetto allo scopo di utilizzare la risorsa idrica nel modo più efficiente possibile. Oggi tutto ciò diventa ancora più vitale per far fronte alle crescenti difficoltà nell'approvvigionamento e distribuzione dell'acqua. Inoltre, un corretto utilizzo dell'acqua ha ricadute positive sia da un punto di vista della sostenibilità ambientale che economica. Questo metodo si pone come obiettivo il bilancio della riserva idrica disponibile nel suolo tenendo conto delle voci in entrata e in uscita dal sistema. In un'ottica di efficienza, un intervento irriguo sarà opportuno solo quando la riserva idrica si starà per esaurire, in caso contrario gran parte dell'acqua non verrà utilizzata dalle piante e andrà persa. Il bilancio idrico è riassumibile tramite la seguente equazione:

$$P + F + I = ET + Perc. + R + \Delta RU$$

Equazione 1

Dove:

- P, apporto dato dalle precipitazioni;
- F, apporto della falda;
- I, apporto delle irrigazioni;
- ET, perdite per evapotraspirazione;
- Perc., percolazione profonda;
- R, perdite per ruscellamento;
- ΔRU , variazioni di riserva del suolo.

L'applicazione di tale equazione non è sempre agevole. Le difficoltà maggiori si riscontrano nel recuperare i dati necessari e nello stimare bilanci idrici per appezzamenti di terreno di medie-grandi dimensioni. Infatti alcuni parametri utilizzati nel bilancio idrico sono legati alla tessitura e alla struttura del terreno e sappiamo che questa non è sempre costante.

1.3 IL POTENZIALE IDRICO

Il potenziale idrico è una grandezza che indica lo stato energetico dell'acqua e, indirettamente, la facilità con cui la pianta può assorbire acqua dal suolo, ed esso è definito dall'equazione:

$$\psi = \psi_g + \psi_m + \psi_s + \psi_p$$

Equazione 2

Dove:

- ψ_g , potenziale gravitazionale, trascurabile per le piante sotto i 10 m di altezza, indica la forza necessaria a mantenere l'acqua a certe altezze;
- ψ_m , potenziale matriciale, originato dalla tensione matriciale, deriva dalle interazioni dell'interfaccia terreno-acqua;
- ψ_s , potenziale osmotico, dipende dalla concentrazione dei soluti;
- ψ_p , potenziale di pressione o turgore, è il risultato della pressione idrostatica nelle cellule.

Il potenziale idrico rappresenta l'energia libera delle molecole d'acqua in una determinata matrice rispetto all'acqua pura, le quali tendono a muoversi da zone a maggiore potenziale verso zone a potenziale inferiore. La pianta si colloca nel mezzo del sistema suolo-pianta-atmosfera, e il potenziale idrico può rappresentare il lavoro che la pianta deve spendere nell'assorbimento radicale. In questo sistema il potenziale idrico va diminuendo dal suolo

verso l'atmosfera, diventando quindi il motore del movimento dell'acqua nel sistema. In casi di elevati gradienti di potenziale idrico tra suolo e atmosfera la movimentazione dell'acqua attraverso la pianta avviene in misura maggiore che con bassi gradienti.

Il potenziale idrico più elevato nel suolo è quello dell'acqua di percolazione, ovvero quella che si muove nei macropori e percola molto rapidamente. Il suo movimento è influenzato dalla tessitura e dalla permeabilità del suolo. Successivamente si trova l'acqua che rimane nel terreno per capillarità capillare disponibile che è quella assorbita dalle piante e utilizzata per l'evapotraspirazione, questa. L'ultima quota non ha interesse agronomico in quanto non utilizzabile dalle colture, si tratta dell'acqua capillare non disponibile ed è persa solo per evaporazione. Tutta la quota d'acqua compresa tra la capacità di campo e il punto d'appassimento è considerata acqua disponibile.

1.4 EVAPOTRASPIRAZIONE

L'evapotraspirazione consiste in due processi simultanei, evaporazione e traspirazione, per i quali si ha una perdita di acqua verso l'atmosfera rispettivamente per evaporazione dal suolo e traspirazione dalla pianta attraverso degli stomi.

Perché l'evaporazione avvenga è necessaria dell'energia che deriva in misura maggiore dalla radiazione solare, ma in parte anche dal calore dell'aria stessa. Il passaggio di stato, da liquido a gassoso, causa un aumento della umidità dell'aria fino ad arrivare alla sua saturazione. A questo punto, il processo si ferma a meno che fattori ambientali, come il vento, sostituiscano l'aria satura con aria più secca. Il processo di evaporazione, quindi, sarà tanto più veloce quanto maggiore sarà la differenza tra pressione di vapore sulla superficie evaporante e atmosferica (deficit di pressione di vapore – VPD). Parlando di suolo è necessario tenere conto anche dell'ombreggiamento dato dalla vegetazione, della capacità dello stesso di trattenere acqua e della frequenza delle irrigazioni. Ovviamente, in caso di piogge e irrigazioni poco frequenti il suolo si seccherà e l'evaporazione diventerà sempre minore fino a fermarsi.

La traspirazione rappresenta la perdita di acqua dai tessuti vegetali, quindi una forma particolare di evaporazione regolata dall'apertura e dalla chiusura degli stomi. Anche questa dipende da fattori come l'energia disponibile, il deficit di pressione di vapore (VPD) e il vento. Ma in questo caso il grado di traspirazione può essere regolato dalla pianta, e dipende anche da altri fattori, come la capacità dell'acqua di muoversi nel suolo verso le radici, dalla salinità

del terreno, dalla fase fenologica, da fattori climatici e da pratiche agronomiche (ad es. potatura).

Quindi l'evapotraspirazione è la somma di questi due processi. L'evaporazione prevale nelle fasi iniziali (scarsa copertura della *canopy*) in quanto dipende perlopiù dalla capacità della radiazione solare di raggiungere il suolo. Con lo svilupparsi della vegetazione la radiazione giunge al suolo sempre meno rendendo la traspirazione il processo prevalente.

Negli anni sono stati definiti diversi aspetti dell'evapotraspirazione, di cui vengono qui riportate le due più importanti in questa sede. L'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) indica l'evapotraspirazione di una coltura di riferimento in condizioni standard descritte dalla FAO, ovvero un prato di *Festuca arundinacea* in condizioni ottimali di rifornimento idrico, alta 0.12 m, con una resistenza colturale di 70 s m^{-1} , un'albedo di 0.23 e in assenza di malattie; L'evapotraspirazione effettiva o colturale (ET_c) è l'evapotraspirazione in condizioni reali della coltura oggetto d'analisi. A differenza dell' ET_0 , in questo caso le condizioni non sono ottimali ma reali, quindi possiamo trovarci anche in presenza di stress biotici o abiotiche possono diminuire il tasso di evapotraspirazione potenziale (massimo) di quella coltura.

1.5 DEFICIT DI PRESSIONE DI VAPORE (VPD)

Il vapore acqueo, essendo un gas, contribuisce alla pressione atmosferica. La quantità di acqua nell'aria è direttamente correlata alla pressione parziale esercitata dal vapore acqueo nell'aria ed è quindi una misura diretta del contenuto di acqua nell'aria. Quando l'aria è satura significa che non è più in grado di accettare altre molecole d'acqua; la corrispondente pressione è detta pressione di vapore di saturazione. Questa è direttamente correlata alla temperatura dell'aria, infatti più alta la temperatura, maggiore sarà la capacità di accettare molecole d'acqua e quindi maggiore risulterà essere la pressione di vapore di saturazione (e_s).

La pressione di vapore effettiva (e_a) è la pressione di vapore che l'acqua esercita nell'aria nelle condizioni attuali. Se l'aria non è satura la tensione di vapore effettiva è inferiore alla pressione di vapore di saturazione. La differenza tra queste due grandezze è il deficit di pressione di vapore ed è indicativo della capacità evaporativa dell'aria:

$$VPD = e_s - e_a \qquad \text{Equazione 3}$$

Invece, rapporto tra e_s ed e_a definisce l'umidità relativa (RH). Il VPD una variabile molto importante nel processo di evapotraspirazione e nel suo calcolo. Ad esempio, se il VPD fosse

pari a 0 significherebbe che l'aria non può più accettare molecole d'acqua al suo interno e quindi la pianta sarebbe impossibilitata ad evapotraspirare. Al contrario, un elevato VPD comporta elevati tassi di evapotraspirazione, che la pianta deve controllare in caso di scarsità disponibilità d'acqua.

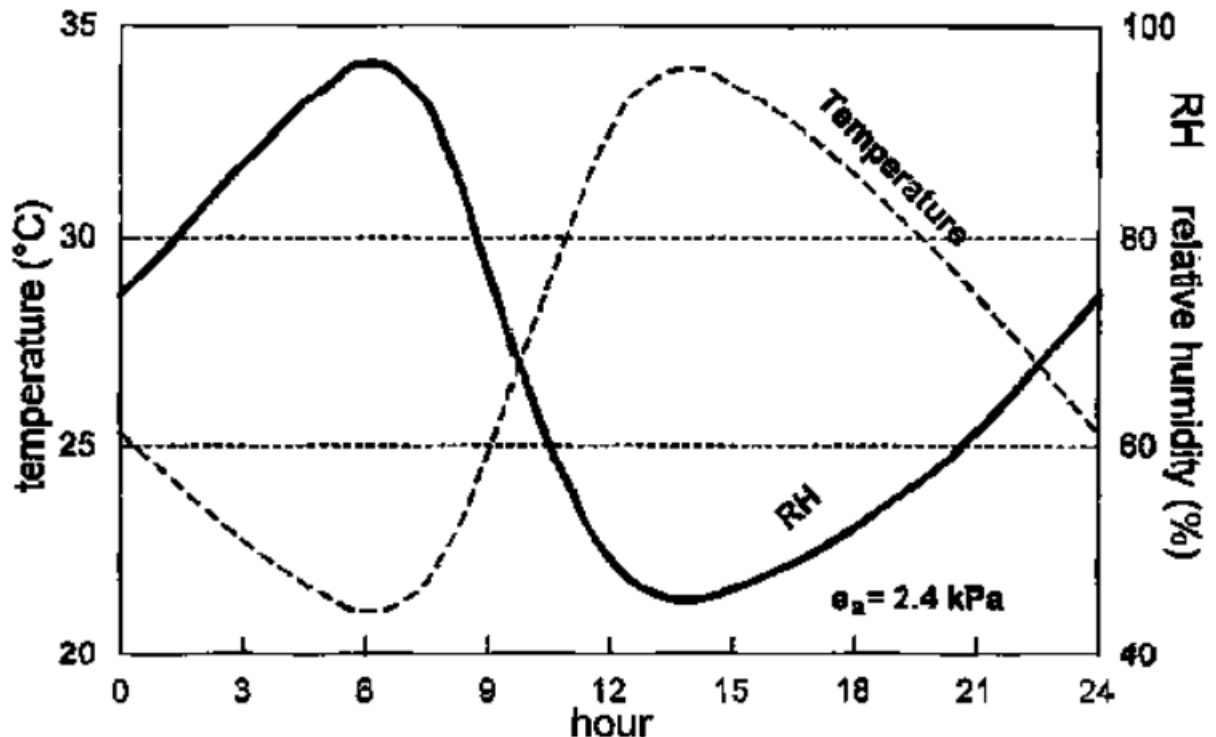


Figura 5, variazione dell'umidità relativa durante la giornata con VPD costante (Allen et al., 1998).

1.6 BILANCIO RADIATIVO

Non tutta la radiazione emessa dal sole giunge sulla terra. Il sole emette radiazioni ad onda corta che arrivano sull'atmosfera con un flusso medio annuo di 342 W/m² (Treccani). Sulla superficie terrestre ne arriverà una quantità minore, in quanto una parte viene persa per fenomeni di riflessione o diffusione verso lo spazio da parte delle nubi e del particolato. Un'altra parte di radiazione è assorbita dai gas che compongono l'atmosfera. Superati questi ostacoli al suolo giunge, in modo diretto o per diffusione, il 51% della radiazione ricevuta ai limiti dell'atmosfera. Ogni superficie ha un albedo diverso a seconda della capacità di riflettere la radiazione, per esempio il prato di *Festuca arundinacea* ha un albedo di 0.23 mentre la neve di 0.87.

Seguendo la legge di Stefan-Boltzmann un ideale corpo nero ha un'emittanza proporzionale alla temperatura dello stesso corpo elevata alla quarta potenza. Ciò si traduce nel fatto che ogni elemento (con temperatura superiore a 0°K) emette radiazione sia di giorno che di notte.

Nel caso del pianeta terra l'emissione della radiazione è nello spettro dell'infrarosso (radiazione ad onda lunga). Quindi possiamo affermare che dal sole arriva fondamentalmente una radiazione ad onda corta diretta sulla terra, per fenomeni di riflessione la radiazione ad onda corta può tornare verso lo spazio; a causa di questa energia, la superficie terrestre si riscalda ed emette radiazione ad onda lunga, la quale può essere dispersa nello spazio o venire riflessa dalle nubi e ritornare verso la terra stessa. Tutto ciò si può riassumere nel bilancio radiativo:

$$R_n = R_c \uparrow + R_l \uparrow + R_c \downarrow + R_l \downarrow \quad \text{Equazione 4}$$

Dove con R_n è indicata la radiazione netta, con R_c la radiazione ad onda corta e con R_l la radiazione ad onda lunga. La freccia \downarrow indica la radiazione in entrata, ovvero quella verso la terra, mentre la freccia \uparrow indica la radiazione in uscita, ovvero quella verso lo spazio. L'unità di misura utilizzata per il flusso di energia è $W m^{-2}$.

1.7 EQUAZIONE DI PENMAN-MONTEITH

Nel corso degli anni sono stati proposti diversi metodi per il calcolo dell'evapotraspirazione. Nessun metodo gode di precisione assoluta, ma quello che dovrebbe essere più utilizzato, il cui impiego viene raccomandato dalla FAO, è sicuramente il metodo di Penman-Monteith con le modifiche apportate dalla FAO. Questo metodo non è di facile applicazione e si basa su dati meteorologici piuttosto completi, non sempre disponibili (radiazione solare, temperatura dell'aria, pressione, umidità dell'aria e velocità del vento).

L'evaporazione dell'acqua ha bisogno di una importante quota di energia. Per l'evaporazione di un grammo di acqua allo stato liquido, sono necessari 2450 J. Essendo governata dagli scambi di energia alla superficie, l'evapotraspirazione è limitata dalla quantità di energia disponibile nel sistema, ovvero dalla radiazione netta.

Grazie a questa limitazione, applicando il principio di conservazione dell'energia, è possibile prevedere il tasso di evapotraspirazione. Infatti, questa energia deve essere dissipata e ciò può avvenire in due modi: evaporazione dell'acqua (flusso di calore latente, λE) ed emissione di calore (flusso di calore sensibile, H). Inoltre, una (piccola) parte potrà entrare direttamente nella superficie sotto forma di calore (G) (figura 6). Il bilancio energetico di una superficie è definito come:

$$R_n = H + G + \lambda E$$

Equazione 5

$$R_n = H + G + \lambda E$$

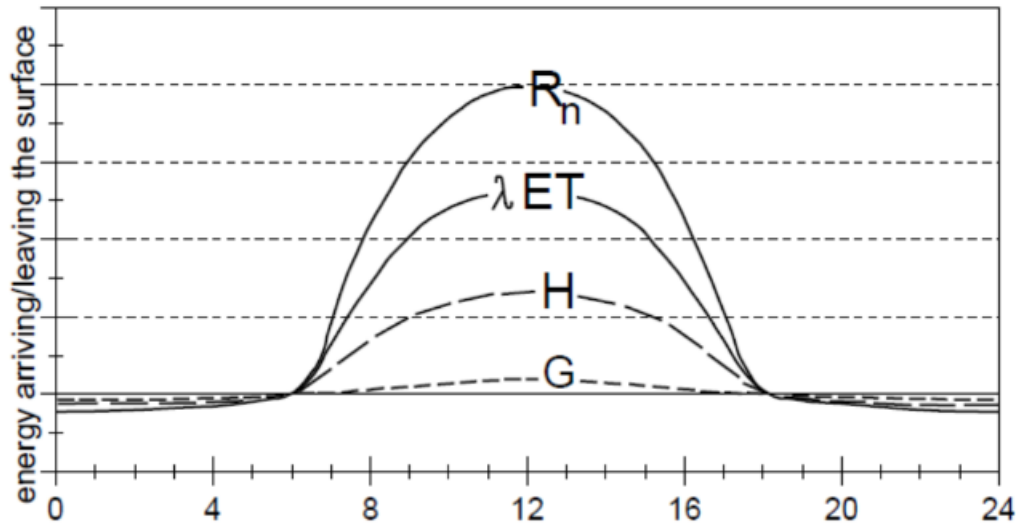


Figura 6, variazione delle componenti del bilancio energetico sopra una superficie vegetata; si nota la trascurabilità del termine G (Allen et al., 1998).

Creando un sistema di equazioni che riassumono il bilancio energetico e il flusso di calore sensibile si ottiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \lambda E + H, \text{ con } A = R_n - G \\ H = k(T_c - T_a), \text{ con } k = \frac{\rho c_p}{r_H} \\ \lambda E = A - H \rightarrow \lambda E = A - k(T_c - T_a) \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Equazione 6} \\ \text{Equazione 7} \\ \text{Equazione 8} \end{array}$$

Dove:

- ρ densità dell'aria espressa in kg m^{-3} ;
- c_p calore specifico dell'aria in $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$;
- T_c e T_a temperatura della canopy e dell'aria in $^{\circ}\text{C}$;
- r_H resistenza al trasporto di calore in s m^{-1} .

Con la risoluzione del sistema è stata ottenuta la componente radiativa del flusso di radiazione da una superficie.

Il termine aerodinamico dell'evaporazione può essere ottenuto dall'equazione del profilo del vento in condizioni adiabatiche, introducendo la resistenza aerodinamica di una superficie al trasporto di quantità di moto:

$$\lambda E = \frac{q\lambda(e_s(T_c) - e_a)}{r_a} \quad \text{Equazione 9}$$

Dove:

- λ calore latente di evaporazione (2.45 MJ Kg⁻¹ con T° = 20 °C);
- e_a umidità specifica dell'aria in kPa;
- e_s pressione di vapore saturo alla temperatura della canopy in kPa;
- r_a resistenza aerodinamica nel trasferimento del vapore acqueo tra la superficie e un punto di riferimento esterno, s m⁻¹.

Nel 1948 Penman combinò le due equazioni complementari ottenendo l'equazione:

$$\lambda E = \frac{[\Delta(R_n - G) + (\gamma\lambda E_a)]}{\Delta + \lambda} \quad \text{Equazione 10}$$

Dove:

- Δ pendenza della curva di saturazione al variare della temperatura, ovvero la variazione di e_s al variare della temperatura in kPa °C⁻¹;
- γ costante psicrometrica in kPa °C⁻¹.
- E_a flusso di vapore in mm gg⁻¹.

Penman non considerò il fatto che il rilascio di vapore acqueo fosse controllato dagli stomi, e non prese in considerazione quindi la resistenza stomatica o colturale. Monteith nel 1965 modificò la precedente equazione:

$$\lambda E = \frac{\rho c_p (e_s(T_c) - e_a)}{\gamma(r_c + r_a)} \quad \text{Equazione 11}$$

Dove r_c indica la resistenza colturale.

Combinando l'equazione 11 con l'equazione 8 si ottenne l'equazione di Penman – Monteith:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad \text{Equazione 12}$$

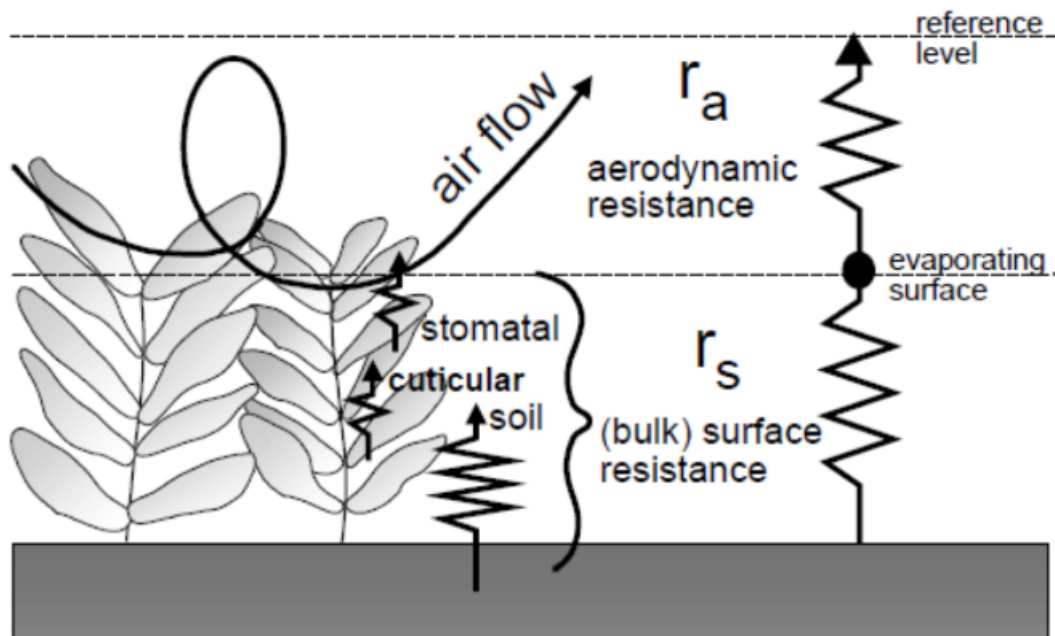


Figura 7, schematizzazione della resistenza superficiale e aerodinamica (Allen et al., 1998).

dove R_n è la radiazione netta, G è il flusso di calore nel suolo, $(e_s - e_a)$ rappresenta il deficit di pressione di vapore dell'aria, ρ_a è la densità media dell'aria a pressione costante, c_p è il calore specifico dell'aria, Δ rappresenta la pendenza della relazione tra la pressione di vapore e la temperatura di saturazione, γ è la costante psicrometrica e r_s e r_a sono la resistenza superficiale (*bulk*) e la resistenza aerodinamica (figura 7). L'approccio di Penman-Monteith include tutti i parametri che regolano lo scambio di energia e il conseguente flusso di calore latente (evapotraspirazione) dalla vegetazione.

La maggior parte dei parametri sono misurati o possono essere facilmente calcolati da dati meteorologici. Ogni coltura ha una resistenza aerodinamica e superficiale proprie, di conseguenza, conoscendo queste è possibile calcolare l'evapotraspirazione teorica di ogni coltura. Questa equazione è stata scelta dalla FAO come più precisa per il calcolo dell'evapotraspirazione in quanto è una rappresentazione realistica del processo di evapotraspirazione basata su variabili fisiche.

1.7.1 RESISTENZA AERODINAMICA

Il trasferimento di calore e vapore acqueo dalla superficie di evaporazione verso l'aria sopra la vegetazione è determinato dalla resistenza aerodinamica, funzione della velocità del vento, secondo la seguente formula:

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

Dove:

- r_a , resistenza aerodinamica in [$s\ m^{-1}$]
- z_m , altezza di misura del vento [m]
- d , altezza di misura dell'umidità [m]
- z_{om} , altezza di spostamento del piano zero [m]
- z_{oh} , lunghezza della rugosità della superficie che regola il trasferimento di quantità di moto [m]
- z_{oh} , lunghezza della rugosità della superficie che regola il trasferimento di calore e di vapore [m]
- k , costante di Von Karman (0.41)
- u_z , velocità del vento all'altezza z [$s\ m^{-1}$]

L'equazione è valida in condizioni di stabilità neutra, ovvero condizioni in cui la temperatura, la pressione atmosferica e la velocità del vento sono in condizioni quasi adiabatiche (nessuno scambio termico). L'applicazione dell'equazione per periodi brevi (orari o meno) può richiedere correzioni per la stabilità; tuttavia la previsione dell' ET_0 su una superficie di riferimento ben irrigata può eliminare le correzioni in quanto la quantità di calore scambiato è piccola (Allen *et al.* 1998).

1.7.2 RESISTENZA CULTURALE O SUPERFICIALE

La resistenza culturale descrive la resistenza incontrata dal vapore acqueo nell'attraversare la pianta o il suolo. Dove il suolo non è interamente coperto dalla vegetazione la resistenza culturale dovrebbe comprendere anche gli effetti dell'evaporazione dalla superficie del suolo. Un altro fattore influente è la disponibilità idrica per la pianta. Un'approssimazione della resistenza culturale si ha dividendo la resistenza stomatica per il LAI (*Leaf Area Index*):

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}}$$

Dove:

- r_s , resistenza culturale [$s\ m^{-1}$]
- r_l , resistenza stomatica di foglie ben illuminate dalla luce solare [$s\ m^{-1}$]

- LAI_{active}, indice di area fogliare attivo (porzione illuminata dalla luce solare) [adimensionale]

Il LAI ha valori che differiscono ampiamente tra diverse colture ma generalmente i valori rientrano tra 3 e 5. Il LAI normalmente si evolve durante la stagione vegetative per raggiungere il suo massimo valore prima o in corrispondenza della fioritura. Inoltre dipende anche da varietà e densità delle piante. La resistenza stomatica rappresenta la resistenza media di una singola foglia; questa dipende dalla varietà e dalla gestione della coltura. Solitamente aumenta con l'avvicinarsi al raccolto e con l'invecchiare della coltura. Tuttavia gli studi relativi alla resistenza stomatica sono orientati verso aspetti fisiologici o eco-fisiologici. Sappiamo che la resistenza aumenta quando la coltura è sottoposta a stress idrico poiché la disponibilità idrica del suolo limita l'evapotraspirazione della coltura (Allen *et al.* 1998).

1.8 L'EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO (ET₀)

L'evapotraspirazione di riferimento rappresenta la velocità con cui l'acqua del suolo prontamente disponibile viene evaporata da una superficie vegetale standard (Jensen *et al.*, 1990). Calcolando l'acqua evaporata da parte della coltura è possibile sapere in modo abbastanza preciso la quota da reintegrare tramite irrigazione senza incorrere in difetti o eccessi idrici. Conoscendo l'evapotraspirazione di riferimento si può giungere a una stima dell'evapotraspirazione colturale, ovvero dell'evapotraspirazione di una specifica coltura, grazie all'uso di coefficienti colturali K_c.

Il concetto di superficie di riferimento è stato introdotto per ovviare alla necessità di parametri unici di evaporazione per ogni coltura e fase di crescita (Allen *et al.* 1998). In passato era stato proposto di usare, come superficie di riferimento, l'acqua libera ma venivano a mancare dinamiche e processi biologici tipici di una superficie coltivata. Considerando che l'erba e l'erba medica sono colture molto studiate in tutto il mondo anche per quanto riguarda le caratteristiche aerodinamiche, si è deciso di prenderle come superficie di riferimento. La resistenza alla diffusione del vapore dipende fortemente dall'altezza delle colture, dalla copertura del terreno, dal LAI e dall'umidità del suolo è necessario fissare in modo preciso le caratteristiche che la coltura di riferimento deve avere. Inoltre, stress idrico e grado di copertura del suolo hanno un'influenza sulle resistenze e sull'albedo. Solo se questi parametri vengono fissati è possibile estendere la validità della superficie di riferimento a livello mondiale. L'utilizzo dell'erba presenta comunque dei problemi. Il tasso di evapotraspirazione

è fortemente influenzato dalla varietà e dalla morfologia del cotico erboso, inoltre ci sono importanti differenze a livello di controllo stomatico tra erbe della stagione calda ed erbe della stagione fresca. Infine può essere difficile coltivare alcuni tipi di erbe in climi caldi e tropicali. Gli esperti FAO hanno accettato la seguente definizione univoca per la superficie di riferimento: “Una coltura di riferimento ipotetica, con un’altezza di 0.12 m, una resistenza superficiale fissa di 70 s m⁻¹ e con un albedo di 0.23” (Allen *et al.* 1998).

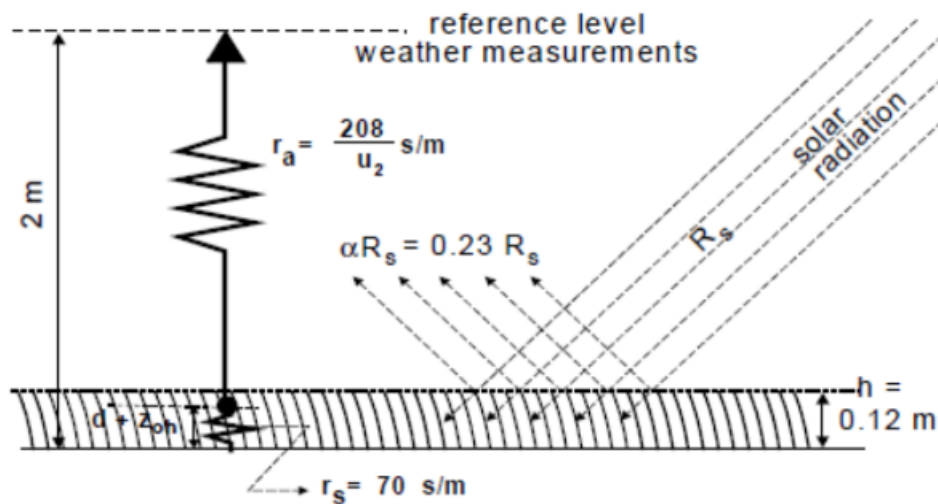


Figura 8, caratteristiche della superficie di riferimento per il calcolo di ET₀ (Allen *et al.*, 1998).

Oggi è possibile eseguire il calcolo dell’evapotraspirazione di riferimento per via indiretta grazie a dati meteorologici come radiazione solare, temperatura dell’aria, velocità del vento, pressione atmosferica e umidità dell’aria. In passato questo calcolo è stato confrontato con misure dirette di ET avvalendosi di un lisimetro e un contenitore ospitante *Festuca arundinacea*. Pesando giornalmente il contenitore e facendo la differenza tra le diverse misure si risale ai grammi di acqua evapotraspirata dalla coltura. Questo metodo è costoso, laborioso e richiede strumenti molto precisi, tuttavia ha permesso di porre le basi per il calcolo dell’ET₀ in modo indiretto.

1.8.1 L’EQUAZIONE DI PENMAN-MONTEITH PER IL CALCOLO DELL’ET₀

La seguente equazione permette il calcolo per via indiretta dell’evapotraspirazione di riferimento (Allen *et al.*, 1998), utilizzando i dati metereologici sopracitati:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{Equazione 15}$$

Dove:

- ET_0 , evapotraspirazione di riferimento [mm giorno^{-1}]
- R_n , radiazione netta sulla superficie della coltura [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$]
- G , flusso di calore nel suolo [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$]
- T , temperatura media dell'aria a 2 metri di altezza [$^{\circ}\text{C}$]
- u_2 , velocità del vento a 2 metri di altezza [m s^{-1}]
- $e_s - e_a$, VPD (deficit di pressione di vapore) [kPa]
 - e_s , pressione di vapore saturo [kPa]
 - e_a , pressione di vapore effettiva [kPa]
- Δ , pendenza della curva di pressione di vapore [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
- γ , costante psicrometrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

In molte stazioni, come ad esempio quelle del Servizio Idrografico, sono presenti solo dati di temperatura dell'aria e di precipitazione; in tal caso si possono adottare metodi come quello di Hargreaves o procedure di stima dei dati mancanti (Jensen *et al.*, 1990), la cui accuratezza è accettabile per intervalli temporali superiori ai dieci giorni. In generale, mentre la temperatura e l'umidità dell'aria, la velocità del vento e la precipitazione possono variare sensibilmente tra loro anche se misurate in luoghi poco distanti l'uno dall'altro, la radiazione solare presenta una variabilità spaziale più ridotta. In generale, l'affidabilità è migliore quando si utilizzano misure aggregate a scala giornaliera o maggiore, piuttosto che dati orari. Laddove i dati di stazioni meteorologiche non siano disponibili o affidabili, è possibile ricorrere ai modelli di circolazione atmosferica a scala locale che consentono di derivare tutte le variabili sopra descritte in maniera spazialmente distribuita e omogenea, come ad esempio il modello meteorologico Cosmo-Lami con risoluzione di 7,5 km oppure i modelli MOLOCH (1.5 km) e BOLAM (8.3 km) (Regione Veneto ALLEGATO B alla Dgr n. 2240 del 23 dicembre 2016).

1.9 IL COEFFICIENTE COLTURALE (K_c)

Il coefficiente colturale è un fattore determinato empiricamente dalla FAO per ogni coltura che permette di ricavare l'evapotraspirazione colturale partendo dall'evaporazione di riferimento:

$$ET_C = K_C \times ET_0$$

Equazione 16

Ogni coltura ha un proprio K_c e questo risulta applicabile su scala generale, infatti le variabili dettate dal clima sono incorporate in ET_0 mentre K_c è influenzato prevalentemente dalle caratteristiche delle colture e in minima parte dal clima.

Il K_c rappresenta un'integrazione di 4 caratteristiche primarie che differenziano la coltura presa in esame dalla superficie di riferimento (erba):

- Altezza della coltura, influenza il termine di resistenza aerodinamica (r_a) e di conseguenza il trasferimento di vapore dalla coltura all'atmosfera.
- Albedo della superficie coltivata, è influenzato dalla porzione di terreno coperto dalla vegetazione e dall'umidità del suolo, ciò influenza la radiazione netta (R_n) che costituisce la fonte di energia primaria per il processo evapotraspirativo.
- Resistenza della vegetazione, è influenzata dalla superficie fogliare (numero di stomi), dall'età e dalle condizioni delle foglie e dal grado di controllo stomatico; ha un effetto sulla resistenza superficiale o colturale (r_s).
- Evaporazione dal suolo, particolarmente importante se il suolo non è vegetato.

Con lo svilupparsi della coltura la sua altezza, il LAI e la copertura del terreno si evolvono. Per questo il K_c di una data coltura varia col suo ciclo di crescita. Generalmente sono state individuate 4 fasi a cui corrispondono altrettanti K_c (Figura 9).

- 1) Fase iniziale ($K_{c_{ini}}$), dall'impianto fino al 10% di copertura del terreno. Per le colture perenni si prende come riferimento lo sviluppo delle nuove foglie (*Greenup*) ed è molto breve rispetto a piante annuali. Questa fase è influenzata dalla coltura, dalla varietà e dal clima. L'evapotraspirazione vede una prevalenza della componente evaporativa dal suolo in quanto la coltura è ancora poco sviluppata.
- 2) Fase di sviluppo, dal 10% di copertura del suolo a copertura completa. Per molte colture la copertura completa coincide con la fioritura, per colture a filare si considera copertura completa quando le piante raggiungono dimensioni quasi "piene" o quando piante di file adiacenti iniziano a mescolare le foglie tra loro. Un altro modo per stimare la copertura completa è affidarsi al LAI che dovrebbe raggiungere circa valore 3. Con lo svilupparsi della coltura la traspirazione diventa sempre più preponderante rispetto all'evaporazione.

- 3) Fase di mezza stagione (K_{Cmid}), dalla copertura completa all'inizio della maturazione. Questa è la fase più lunga per le colture perenni ed annuali, mentre è abbastanza corta per le orticole che vengono raccolte fresche. Inoltre in questa fase il K_c raggiunge il suo valore maggiore.
- 4) Fase di fine stagione (K_{Cend}), dall'inizio della maturazione alla raccolta o alla senescenza completa.

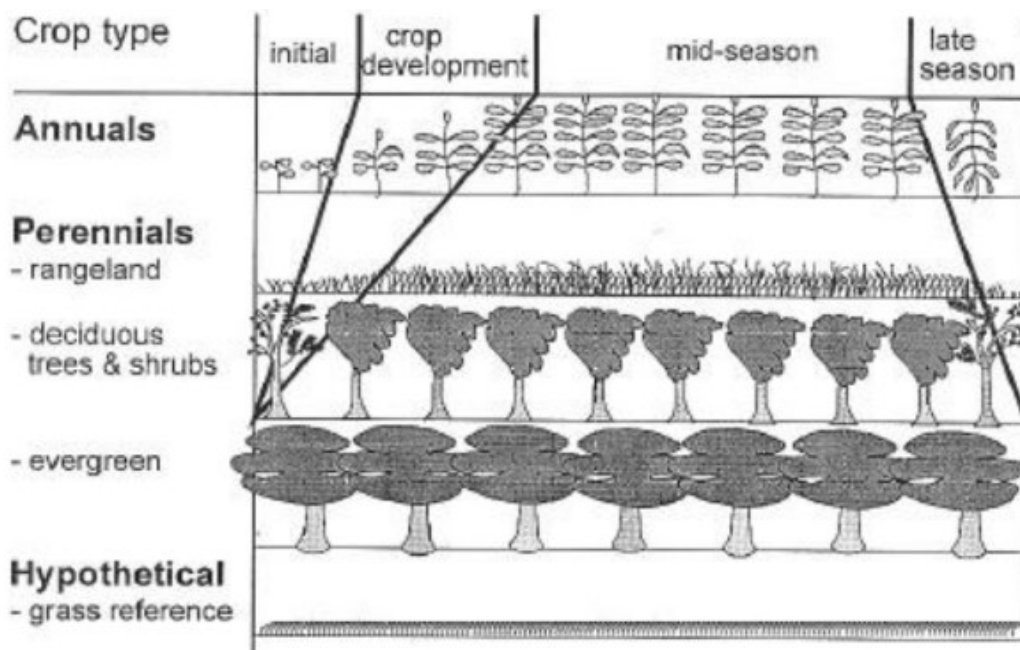


Figura 9, andamento delle fasi di sviluppo per diversi tipi di colture (FAO, 1998).

1.10 METODO ONE-STEP E TWO-STEP PER LA STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE

Nel quaderno FAO56 vengono proposti due approcci per il calcolo dell'ET_c: il metodo *one-step* e il metodo *two-step*.

Il metodo *one-step* si basa sull'applicazione diretta dell'equazione di Penman-Monteith utilizzando parametri meteorologici e i valori di resistenza colturale e aerodinamica ricavati empiricamente da precedenti misure di evapotraspirazione. Il principale svantaggio di questa soluzione è che non esistono valori tabulati di resistenza colturale e aerodinamica in quanto sono strettamente relazionati con le condizioni ambientali e strutturali del vigneto oggetto di studio. È quindi necessario ottenere misure reali di evapotraspirazione da cui poi ottenere le resistenze da applicare alla formula di Penman-Monteith.

Il metodo *two-step* è il metodo standard presentato dalla FAO per il calcolo dei fabbisogni irrigui di una coltura e si divide in due fasi. La prima richiede il calcolo dell'ET₀ della coltura di

riferimento utilizzando l'equazione di Penman-Monteith con parametri standard. Successivamente si ottiene la stima dell'ET reale utilizzando l'equazione 16, la quale moltiplica l'ET₀ per il coefficiente colturale.

1.11 STRESS IDRICO E IRRIGAZIONE

Il contenuto di acqua attorno alla radice si può esprimere come carenza di acqua rispetto alla capacità di campo. Con *Radical Available Water* (RAW) si intende l'acqua prontamente utilizzabile dalla radice mentre con D_r la profondità cumulativa di evapotraspirazione. Quando D_r è uguale o maggiore a RAW il fenomeno di stress si manifesta tramite la diminuzione del tasso di evapotraspirazione, che continua a diminuire in relazione con il calo di disponibilità idrica nel suolo.

Si rende necessaria l'irrigazione quando le precipitazioni non riescono a coprire il consumo idrico della pianta. È fondamentale irrigare nel momento giusto e nella giusta quantità, in modo da mantenere gli obiettivi di produzione e qualità della coltura senza abusare della risorsa idrica. Questo è possibile calcolando il bilancio idrico della zona radicale in modo giornaliero. L'irrigazione dovrebbe essere eseguita appena prima o nel momento in cui l'acqua del suolo disponibile si esaurisce e non deve essere troppo profonda per evitare la lisciviazione di importanti composti nutritivi e la perdita di acqua negli strati più profondi, non utilizzabile dalla pianta.

1.12 EDDY COVARIANCE

Il metodo *Eddy Covariance* (EC) fornisce misurazioni dei flussi verticali di gas, quantità di moto e calore su aree di varie dimensioni (Burba, 2013). Un flusso può essere definito come un'entità che passa attraverso una superficie definita per un'unità di tempo, e può essere calcolato come la covarianza delle deviazioni verticali istantanee della velocità del vento e deviazioni istantanee dell'entità di interesse, ad esempio il vapore acqueo (Burba & Anderson, 2010). Infatti, si può immaginare il vento come un flusso orizzontale costituito da numerosi vortici (Figura 10). Ogni vortice ha componenti tridimensionali, che comprendono il movimento verticale dell'aria (figura 11) (Burba e Anderson, 2010).

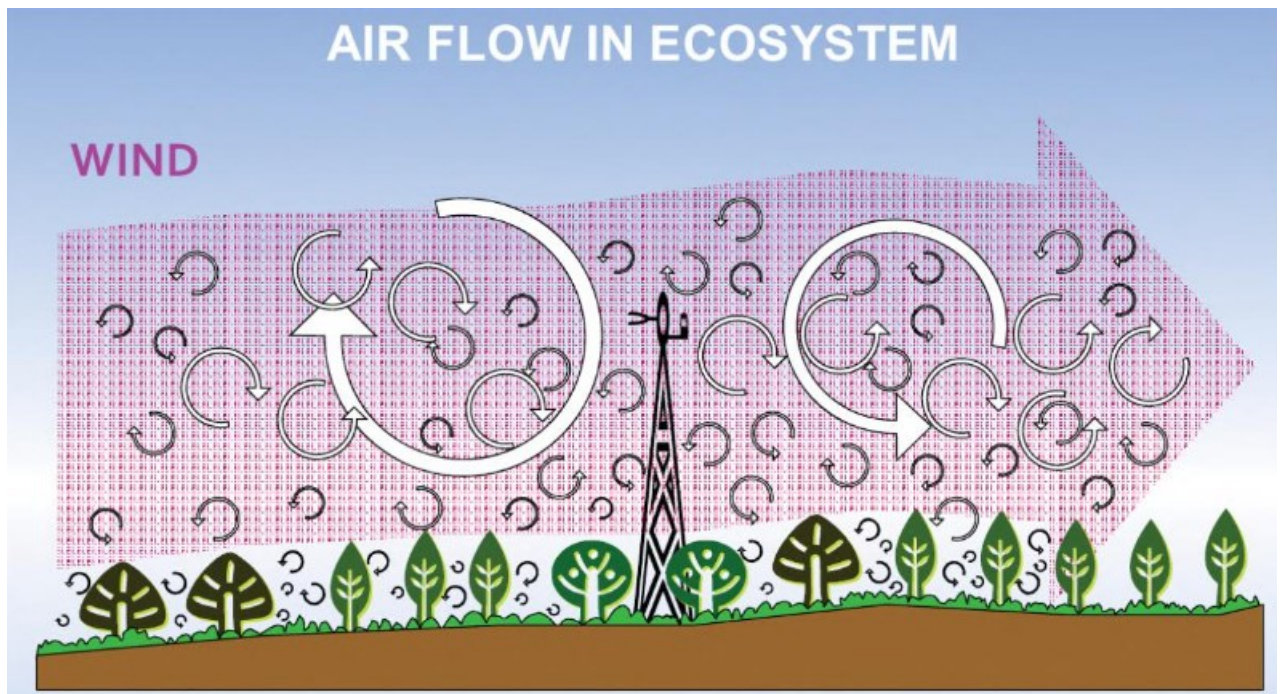


Figura 10, rappresentazione degli eddies nella zona circostante alla torre con gli strumenti (A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements, Burba et Anderson, 2010).

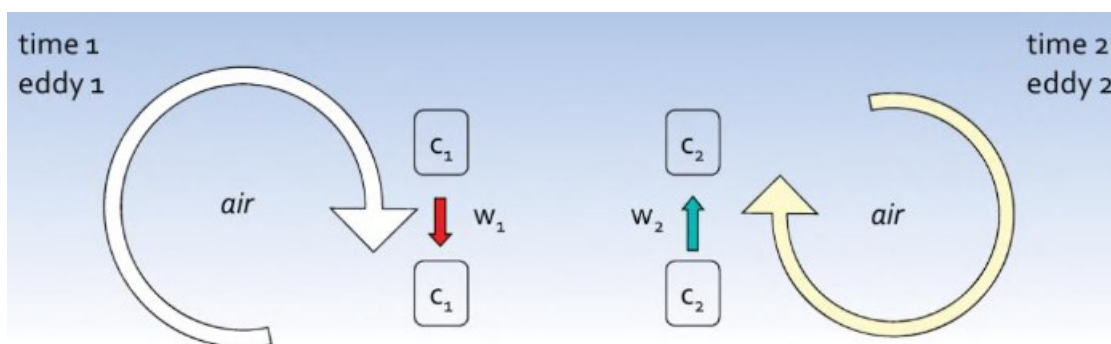


Figura 11, rappresentazione dei movimenti della materia a carico dei vortici (A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements, Burba et Anderson, 2010).

Analizzando la figura 11, si può intuire come al momento 1 il vortice 1 muove la particella d'aria C_1 verso il basso alla velocità w_1 . Nel successivo momento 2, il vortice 2 muove la particella d'aria C_2 verso l'alto a una velocità w_2 . Ogni particella d'aria ha caratteristiche proprie come concentrazione, temperatura ed umidità. Se potessimo misurare queste caratteristiche e la velocità del movimento verticale dell'aria sapremmo lo spostamento verso l'alto o verso il basso del flusso d'aria. Per esempio se sappiamo che in un momento 3 molecole di CO_2 si sono spostate verso l'alto e nell'istante successivo solo 2 molecole di CO_2 tornano verso il basso possiamo affermare che il flusso complessivo, durante questo periodo di tempo è di 1 molecola di CO_2 che si muove verso l'alto. Il principio generale del metodo *Eddy Covariance* si basa su questo ragionamento (Burba e Anderson, 2010).

Il flusso verticale può essere rappresentato come la covarianza della velocità verticale e della concentrazione dell'entità d'interesse misurate ad alta frequenza, almeno 10 Hz. L'aspetto più difficile per l'applicazione della tecnica, riguarda le misure delle variabili di interesse, in quanto le turbolenze sono molto veloci e servono strumenti molto sofisticati, precisi e rapidi nella misura.



Figura 12, anemometro sonico (Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima)

Per la misura della velocità del vento si ricorre all'uso di un anemometro sonico tridimensionale. Ne esistono di vario tipo, in figura 12 è rappresentato un esempio di anemometro sonico tridimensionale omnidirezionale. L'anemometro misura la velocità del suono nell'aria usando una breve raffica di ultrasuoni trasmessi tra due trasduttori. Conoscendo la velocità del suono, il ritardo tra la trasmissione degli ultrasuoni e la ricezione degli stessi può essere ricondotto alla velocità del vento (nota la distanza tra i due trasduttori). La velocità del vento determina la differenza tra la velocità del suono misurata e la velocità del suono nell'aria statica. La velocità del suono nell'aria statica è ben nota e dipende

principalmente dalla temperatura ed in parte anche dall'umidità e dalla miscela dei gas.

Sono necessarie alcune fondamentali assunzioni per l'applicazione del metodo:

- Le misurazioni di un punto possono rappresentare un'area sopravento;
- Le misurazioni avvengono all'interno dello strato limite d'interesse;
- I flussi vengono misurati esclusivamente nell'area di interesse;
- Il flusso è totalmente turbolento, la maggior parte del trasferimento verticale netto è fatto da vortici;
- Il terreno è orizzontale ed uniforme: la media delle fluttuazioni è zero, le fluttuazioni della densità dell'aria, la convergenza e la divergenza del flusso sono trascurabili;
- Gli strumenti devono rilevare cambiamenti molto piccoli a frequenze molto elevate.

Queste assunzioni restano vere nel momento in cui il sito di analisi e gli eventi atmosferici e meteorologici siano adeguati (Burba e Anderson, 2010).

Le concentrazioni dei gas di interesse (ad esempio biossido di carbonio e vapore acqueo) possono essere misurate tramite analizzatori di gas ad infrarosso (IRGA), che oggi giorno risultano avere le peculiarità di precisione e rapidità necessarie per questo tipo di tecnica. Questo tipo di analizzatori utilizzano l'assorbanza nella regione dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico (Burba & Anderson, 2010) per ricavare le concentrazioni dei gas in aria libera.

1.13 SCOPO DELLO STUDIO

L'obiettivo principale di questo studio è la determinazione dell'effettiva evapotraspirazione colturale per il vigneto preso in analisi. Scopo generale dello studio è ricavare dati riguardanti i coefficienti colturali e la resistenza colturale e aerodinamica per la vite nell'area geografica di interesse. Tali parametri sono ricavabili tramite dati ottenuti da strumentazioni molto sofisticate e costose, ovviamente non installabili in tutti i vigneti., Di conseguenza, i risultati di questo studio possono essere utili per stimare l'evapotraspirazione di vigneti limitrofi. Il fine ultimo è quindi quello di fornire informazioni per una stima più accurata delle esigenze idriche per vigneti nell'area del Veneto orientale.

2 MATERIALI E METODI

2.1 SITO DI STUDIO

Il vigneto da cui provengono i dati raccolti tramite la stazione *Eddy Covariance* è situato a Lison di Portogruaro ($45^{\circ}44'25.74''N$, $12^{\circ}45'1.11''E$), località veneziana distante 37 Km da Conegliano, 40 Km da Treviso e 50 Km da Udine.



Figura 13, visione del sito di studio da Google Maps.

2.1.1 IL VIGNETO

La stazione di Lison è allocata nel centro di un vigneto di circa 33 ha in pianura, ad una quota media di circa 5 m slm. La data di impianto risale al 2001, l'orientamento dei filari è 35 – 125 N ed è circondato da altri appezzamenti a vigneto. Le file sono distanziate di 2.2 metri e larghe 0.5 metri; mentre la distanza nell'interfila è 0,9 metri e l'altezza della chioma, a sviluppo completato, è circa 2 metri. Nelle file si pratica l'inerbimento durante tutto l'anno con sfalci regolari durante la stagione vegetativa, mentre il diserbo nel sottofila è effettuato chimicamente per una larghezza di 0.7 metri.

2.1.2 IL CLIMA

Secondo la classificazione di Köppen la zona ricade in un clima subtropicale umido (cfa) caratterizzato da estati molto calde ed inverni rigidi. I dati a cui si farà riferimento per la media storica comprendono un periodo di misurazioni dal 1994 al 2020 e vengono dalla stazione ARPAV di Portogruaro-Lison posta a circa 1 km di distanza dal sito sperimentale. Le temperature medie vanno da un minimo di 3 °C nel mese di gennaio a un massimo di 23.4°C nel mese di luglio; le medie minime raggiungono – 1°C nel mese di gennaio mentre le medie massime arrivano a 29.8°C nel mese di luglio. La media annua è 13.2°C. La piovosità annua si attesta, in media, a 1077.4 mm; i mesi più piovosi sono settembre, ottobre e novembre (oltre 100 mm). Anche i mesi di maggio, giugno, luglio e agosto registrano mediamente oltre 90 mm di pioggia, riconducibile soprattutto a fenomeni temporaleschi che danno apporti assai irregolari nello spazio e nel tempo (Scienza *et al.*, 2004). Lo stress idrico non è quindi la norma in questa zona, sebbene ci possano essere periodi in cui si manifesta a causa dell'irregolarità delle piogge o di una stagione particolarmente secca.

2.1.3 IL SUOLO

L'area rientra nella zona della DOC Lison Pramaggiore, nello specifico nell'area vocazionale 1. Il suolo si è generato dai detriti depositati dal Tagliamento. Questi risultano estremamente calcarei con un contenuto di carbonati intorno al 60%. L'area oggetto d'analisi rientra nella zona più antica nella quale il processo di decarbonatazione è più evidente, che ha contribuito alla formazione di un orizzonte calcico Bk molto sviluppato. La tessitura è prevalentemente limosa e causa difficoltà nel drenaggio dell'acqua. La zona induce una certa precocità su tutte

le varietà. Vista l'elevata disponibilità idrica è attuabile l'inerbimento del vigneto. (ARPA Veneto, I suoli del Lison Pramaggiore)

2.2 STRUMENTI UTILIZZATI

Gli strumenti utilizzati per le misurazioni nel sito oggetto di studio appartengono alla stazione *Eddy Covariance* e verranno di seguito brevemente discussi.

L'anemometro sonico tridimensionale utilizzato (Figura 14), il CSAT3A (Campbell Scientific), misura le tre componenti ortogonali del vento grazie ad impulsi di ultrasuoni che si muovono tra i trasduttori. Si lancia un segnale da un trasduttore all'altro e si confronta tale tempo con quello impiegato da un successivo impulso mandato in senso contrario. Dato che la velocità del suono è regolata dalla temperatura è possibile anche la misurazione della temperatura dell'aria. Questo strumento sfrutta la tecnologia *open path* (percorso aperto) che permette misurazioni molto veloci, senza *time-lag* ma possono riscontrarsi problemi in caso di pioggia o elevata umidità.



Figura 14, anemometro sonico tridimensionale utilizzato (CSAT3A Campbell Scientific, 2021)

Simultaneamente all'anemometro sonico tridimensionale è stato utilizzato un analizzatore *closed path* (IRGA a percorso chiuso), EC115 di Campbell Scientific. Questo sistema richiede che il campione d'aria venga aspirato meccanicamente nella cella in cui avverrà l'analisi mediante una pompa ad alta portata, aumentando così i consumi energetici. Questo tipo di IRGA garantisce misurazioni più accurate rispetto ad uno a circuito aperto. Combinando CSAT3 e EC115 (figura 15) è possibile ottenere dati riguardanti vapore acqueo, CO₂, pressione, temperatura e velocità del vento ad alta frequenza (almeno 10Hz).

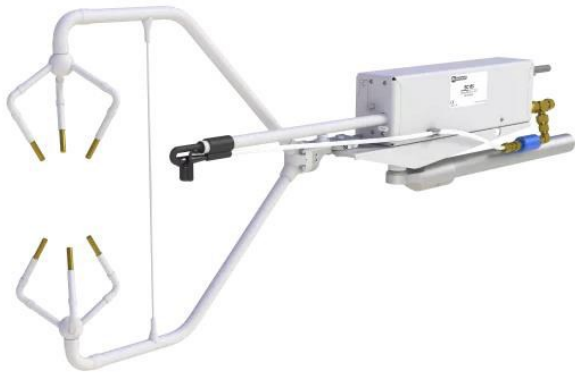


Figura 15 analizzatore a percorso chiuso accoppiato al CSAT3A (EC155 Campbell Scientific, 2021).



Figura 16, radiometro netto (Campbell Scientific, 2021).

Per la misura delle componenti del bilancio energetico (radiazione ad onda corta e onda lunga in entrata, e radiazione ad onda corta riflessa e ad onda lunga in uscita) è stato utilizzato il

radiometro netto CNR4. Lo strumento consiste in una coppia di piranometri, uno verso l'alto e uno verso il basso e una di pirgeometri disposti similmente. I piranometri hanno la funzione di misurare la radiazione ad onda corta mentre i pirgeometri misurano la radiazione ad onda lunga. Sul rilevatore di radiazione ad onda lunga posto sulla faccia superiore, è presente una cupola a menisco che permette un ampliamento della visuale da 150° a quasi 180°, e permette l'allontanamento delle gocce d'acqua dalla superficie.



Figura 17, datalogger per la registrazione e trasmissione di tutte le misurazioni effettuate (CR300, Campbell Scientific).

Al suo interno vengono inoltre integrati due sensori di temperatura (Pt-100 e Termistore) per la correzione delle rilevazioni della radiazione infrarossa per la temperatura del corpo del radiometro. Questi sono posizionati in prossimità dei sensori per la radiazione ad onda lunga allo scopo di accertare che le temperature siano identiche per ogni sensore e che la temperatura sia nota con precisione.



Figura 18, trasmettitore meteorologico, Vaisla.

Gli strumenti dedicati all'EC sono stati installati a 4 metri di altezza, ovvero due metri al di sopra della vegetazione, e le misure sono state effettuate a 10 Hz di frequenza. Le variabili meteo, ovvero pressione atmosferica, temperatura e umidità dell'aria, velocità orizzontale e direzione del vento e precipitazione, sono state misurate tramite un trasmettitore meteorologico WXT520 (Vaisala) (figura 18) posto a 5 m di altezza dal suolo

I dati sono stati raccolti e gestiti in automatico dal *datalogger* Campbell Scientific 3000 (figura 17) e salvati su una scheda di memoria. Successivamente i dati sono stati processati da un *software* per il calcolo finale dei flussi di calore sensibile, latente e CO₂, producendo statistiche finali con una risoluzione temporale di 30 minuti (*EddyPro* di LI-COR Biosciences).

2.3 CALCOLO DEL COEFFICIENTE COLTURALE

In prossimità della stazione *Eddy Covariance* è presente una stazione meteo ARPAV dalla quale derivano i dati relativi alle medie storiche a partire dal 1994 e quelli orari per l'anno 2020.

Per il calcolo dei coefficienti colturali si è reso prima necessario il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento tramite l'equazione di Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) riportata nel paragrafo 1.6. Questa è stata calcolata come somma fra la componente radiativa e quella aerodinamica, in modo tale da poter confrontare i due differenti contributi nel corso dell'anno.

Per il calcolo del VPD sono stati elaborati i dati raccolti dalla stazione meteo ARPAV e si è poi applicata la seguente equazione (Allen *et al.*, 1998):

$$VPD = e_s - e_a \quad \text{Equazione 17}$$

Dove la pressione di vapor saturo, e_s , è stata calcolata come:

$$- e_s = \frac{e^0(T_{MAX}) + e^0(T_{MIN})}{2} \quad \text{Equazione 18}$$

$$- e^0(T_{MAX}) = 0,6108 e^{\left(\frac{17,27 T_{MAX}}{T_{MAX} + 273,3}\right)} \quad \text{Equazione 19}$$

$$- e^0(T_{MIN}) = 0,6108 e^{\left(\frac{17,27 T_{MIN}}{T_{MIN} + 273,3}\right)} \quad \text{Equazione 20}$$

La Pressione di vapore presente, e_a , è stata calcolata usando l'umidità relativa (RH) massima e minima secondo l'equazione:

$$e_a = \frac{\left[\frac{e^0(T_{MAX}) \times RH_{min}}{100} + \frac{e^0(T_{MIN}) \times RH_{max}}{100} \right]}{2} \quad \text{Equazione 21}$$

Tutti i dati della stazione ARPAV sono stati registrati ad un'altezza di 2 metri, mentre la velocità del vento è stata registrata ad un'altezza di 10 metri. Per questo si è resa necessaria la stima del vento ad una altezza di 2m, tramite la seguente correzione (Allen *et al.*, 1998):

$$u_2 = u_h \frac{4,87}{\ln(67,8h - 5,42)} \quad \text{Equazione 22}$$

Dove:

- u_h , velocità del vento all'altezza h [$m s^{-1}$]
- h , altezza a cui avviene la misurazione (10 metri) [m]

La radiazione netta è stata calcolata come differenza tra le radiazioni in entrata e quelle riflesse. Il flusso di calore dal suolo è trascurabile a scala giornaliera o annuale, in quanto il suo integrale in queste scale temporali è prossimo allo 0.

Per derivare il K_c effettivo del vigneto, le misure di evapotraspirazione colturale semi orarie ottenute tramite EC sono state integrate a scala giornaliera ed è stato calcolato il loro rapporto con la ET_0 giornaliera:

$$K_c = \frac{ET_C}{ET_0} \quad \text{Equazione 23}$$

Dove:

- ET_C , evapotraspirazione colturale misurata [$mm \text{ giorno}^{-1}$];
- ET_0 , evapotraspirazione di riferimento [$mm \text{ giorno}^{-1}$].

2.3.1 INTERVALLI DI SVILUPPO FAO

La FAO ha individuato quattro stadi di sviluppo per le coltivazioni denominandoli: *initial stage*, *crop development stage*, *mid-season stage* e *late season stage*. Ad ogni stadio di sviluppo corrisponde un diverso Kc da utilizzare (Kc_{ini}, Kc_{mid} e Kc_{end}) ad eccezione della *crop development stage*, dove il Kc è l'interpolazione tra Kc_{ini} e Kc_{mid}, e del *late season stage*, dove il Kc è l'interpolazione tra Kc_{mid} e Kc_{end}. A seconda della latitudine possono variare i periodi di applicazione e la lunghezza degli stadi di sviluppo di riferimento FAO. Per questo studio sono stati utilizzati gli intervalli per la coltura della vite a medie latitudini. La tabella 1 riporta le finestre temporali suggerite dalla FAO per un totale di 210 giorni. Per quanto riguarda questo studio, in base ai dati analizzati, si è scelto di partire con il germogliamento il 15 aprile e gli intervalli sono stati modificati per seguire l'andamento della stagione, come mostrato nella tabella 1.

		FAO		FAO Modificato	
		Valore	Durata	Periodo	Durata
Kc ini	Initial stage	0.3	30	Dal 15/04 al 14/05	29
	Crop development stage		60	Dal 15/05 al 01/07	46
Kc mid	Mid-season stage	0.7	40	Dal 02/07 al 15/08	45
	Late season stage		80	Dal 16/08 al 31/10	76
Kc end	End season	0.3		01/11	

Tabella 1, Durata degli intervalli di sviluppo FAO con relativi Kc e confronto con intervalli di sviluppo modificati.

2.4 INVERSIONE DELLA FORMULA DI PENMAN-MONTEITH PER LA STIMA DI r_c

Per ricavare i valori giornalieri della resistenza colturale (r_c) è stata invertita la formula di Penman-Monteith (equazione 12). I dati utilizzati per l'inversione sono stati raccolti alla stazione EC di Lison con gli strumenti precedentemente descritti, i valori sono stati calcolati su base semi-oraria e successivamente filtrati e mediati a scala giornaliera.

Grazie all'utilizzo dell'anemometro sonico tridimensionale è stato possibile calcolare la resistenza aerodinamica tramite la formula:

$$r_a = \frac{U}{(U^*)^2} \quad \text{Equazione 24}$$

Dove:

- U, velocità del vento a 2 m [m s⁻¹]
- U*, velocità di attrito derivata dal trasporto di quantità di moto rilevato dall'anemometro [m s⁻¹]

Il calcolo della resistenza aerodinamica attraverso valori empirici, misurati direttamente dalla stazione *Eddy Covariance*, risulta più accurato rispetto al calcolo mediante la formula del profilo logaritmico del vento (equazione 12) (Allen *et al.*, 1998).

I valori così ottenuti di r_a sono stati filtrati per radiazione incidente maggiore di 0, evapotraspirazione maggiore di 0 e r_a inferiore a 100 per eliminare gli *outliers* e misure aberranti.

Il termine Δ (pendenza della curva di saturazione al variare della temperatura) è stato calcolato come segue:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left(0.6108 \cdot e^{\frac{17.27T}{237.3+T}}\right)}{(273.3 + T)^2} \quad \text{Equazione 25}$$

Dove T indica la temperatura media dell'aria.

La costante psicometrica γ è pari a:

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} \quad \text{Equazione 26}$$

Dove:

- C_p , calore specifico dell'aria [MJ kg⁻¹°C⁻¹];
- P, pressione dell'aria [kPa];
- ε , rapporto tra il peso molecolare dell'acqua e il peso molecolare dell'aria secca, ovvero 0.622;
- λ , calore latente di vaporizzazione come da linee guida del quaderno FAO 56 è stato utilizzato un valore fisso di 2.45 MJ Kg⁻¹ (Allen *et al.*, 1998).

Avendo ottenuto i parametri intermedi appena descritti è ora possibile procedere col calcolo di r_c semi-oraria tramite l'inversione della formula di Penman-Monteith:

$$r_c = r_a \cdot \left[\left(\frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\lambda E} - \Delta - \gamma \right) \cdot \frac{1}{\gamma} \right] \quad \text{Equazione 27}$$

Dove:

- r_a , resistenza aerodinamica [$s\ m^{-1}$], calcolata come nell'equazione 13;
- Δ , pendenza della curva di vapore saturo al variare della temperatura [$kPa\ ^\circ C^{-1}$];
- R_n , radiazione netta [$W\ m^{-2}$];
- G , flusso di calore sensibile nel suolo [$W\ m^{-2}$];
- ρ , densità dell'aria [$Kg\ m^{-3}$];
- C_p , calore specifico dell'aria [$J\ Kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$];
- $(e_s - e_a)$, VPD [kPa];
- λ , calore latente di vaporizzazione dell'acqua [$MJ\ Kg^{-1}$];
- γ , costante psicrometrica [$kPa\ ^\circ C^{-1}$].

Successivamente i valori di r_c ottenuti sono stati filtrati secondo i seguenti parametri: evapotraspirazione maggiore di 0 e r_c compreso tra 80 e 1000 $m\ s^{-1}$ per escludere eventuali *outliers*. I valori semi-orari così ottenuti sono stati mediati su base giornaliera.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 ANDAMENTO METEO

Il grafico in figura 19 permette di visualizzare alcune variabili meteorologiche misurate durante il periodo marzo-settembre 2020 presso il sito di studio di Lison.

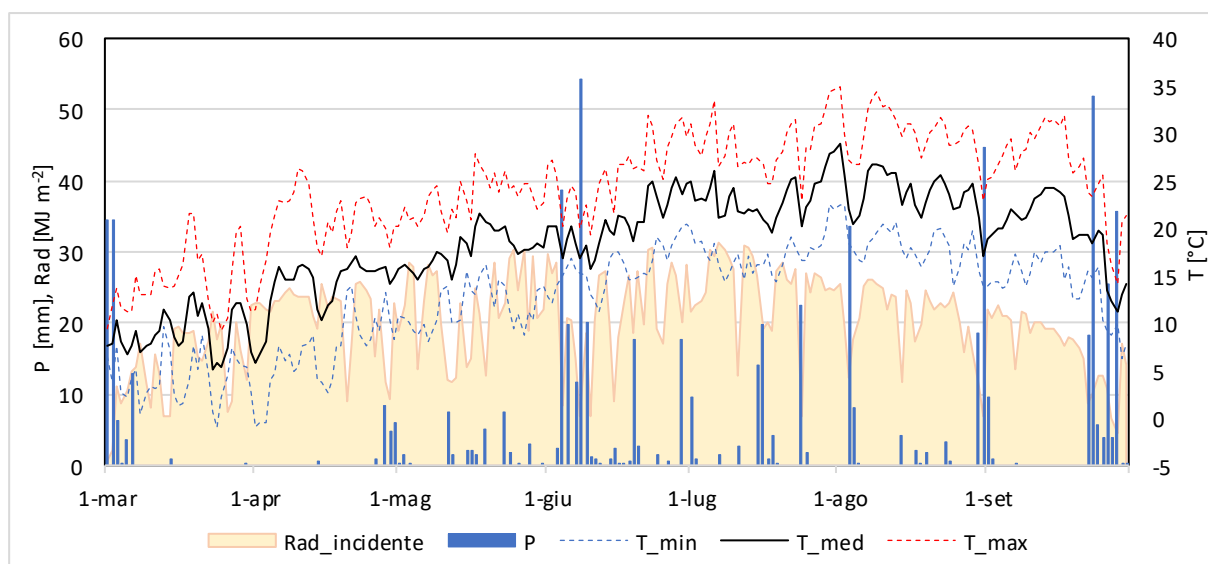


Figura 19, Rappresentazione di variabili meteo per il periodo marzo – settembre 2020 presso la stazione di Lison. P indica le precipitazioni, Rad la radiazione giunta al suolo e T la temperatura.

Si può notare un inizio di stagione con marcati periodi di basse temperature alternate a forti ondate di calore, accompagnato dall'assenza di precipitazioni. Si passa poi ad un maggio più regolare, con ancora poche precipitazioni. È evidente poi una loro concentrazione soprattutto nel mese di giugno, con altri periodi più secchi durante l'estate. La figura 20 mostra più nel dettaglio le anomalie di precipitazione da marzo a settembre.

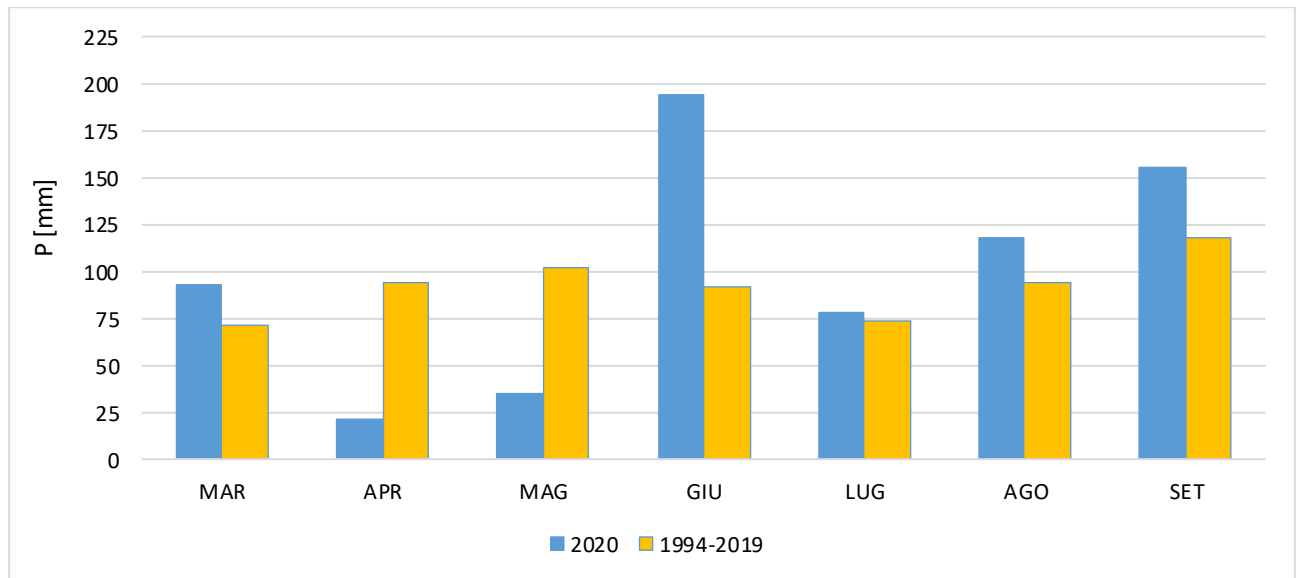


Figura 20, confronto della piovosità mensile nel periodo marzo – aprile tra il 2020 e la media storica (1994-2019).

Le colonne blu rappresentano le precipitazioni avvenute nel 2020 mentre le colonne gialle rappresentano la media storica dal 1994 al 2019. Nel mese di giugno sono caduti 193.6 mm quando mediamente ne sono caduti 91.8 mm. Inoltre i giorni piovosi sono stati 14 contro una media di 8.

Una conseguenza diretta dell'elevato numero di eventi piovosi è la minor radiazione giunta sulla superficie terrestre nel mese di giugno come evidenziato dal focus in figura 21.

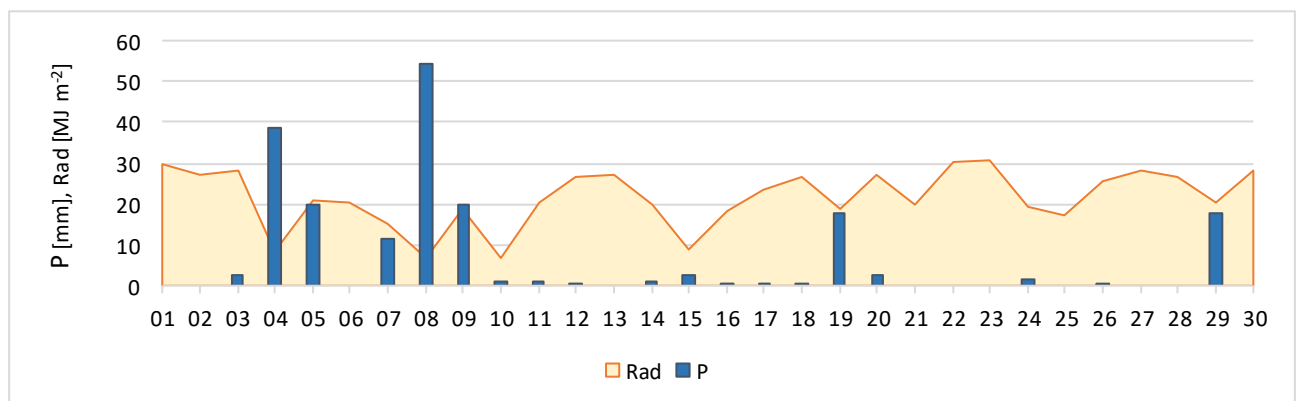


Figura 21, dettaglio di radiazione ed eventi piovosi nel mese di giugno 2020.

L'area gialla delimitata da una linea rossa indica i MJ m⁻² di radiazione giunti sulla superficie terrestre mentre le barre blu i mm di pioggia, per ogni giorno. Si nota come in corrispondenza delle piogge la radiazione sia sempre più bassa. Giorni con radiazione bassa ma assenza di precipitazioni sono imputabili alla copertura nuvolosa che non ha dato luogo ad eventi piovosi. Per quanto riguarda le temperature si fa riferimento alle figure 19, 22 e 23. A livello annuale la media è stata di 13.7 °C, rispetto a una media annua di 13.2 °C. Le temperature massime (figura 19) indicano un'annata mediamente più calda, tranne per il periodo giugno-luglio. Molti mesi superano la media storica anche di oltre 2°C. Un'eccezione importante è rappresentata da giugno le cui temperature massime sono 1.5 °C più basse della media e ciò è facilmente spiegato dai numerosi fronti freddi che hanno causato le abbondanti manifestazioni temporalesche, quindi minor numero di giorni di sole ed elevate precipitazioni, di cui si è parlato sopra. L'andamento delle anomalie di T e le precipitazioni, hanno quindi portato ad un inizio di stagione secco e con temperature instabili, dove alcuni fronti freddi hanno portato ad importanti notti fredde fino a metà aprile.

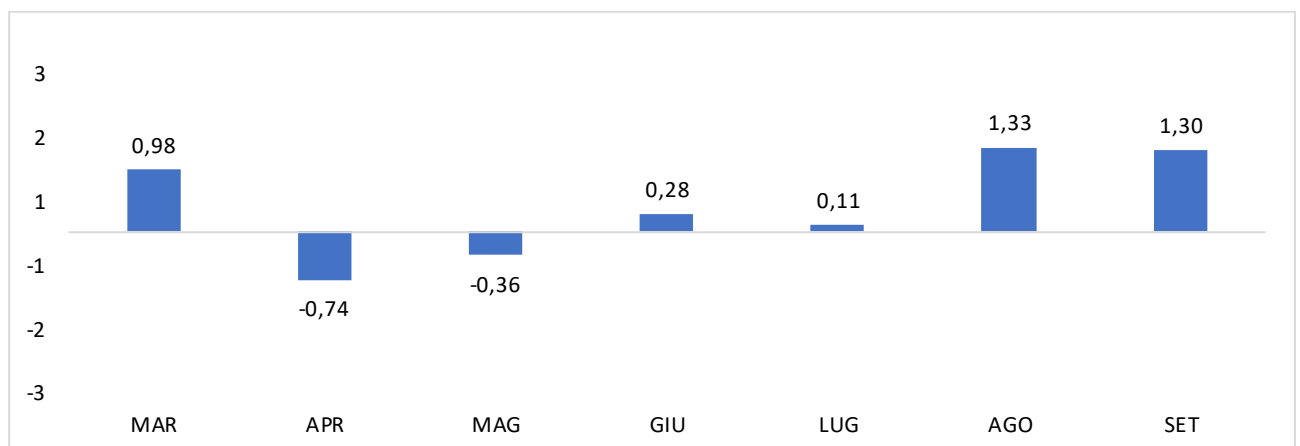


Figura 22, anomalie di temperatura minima per il 2020.

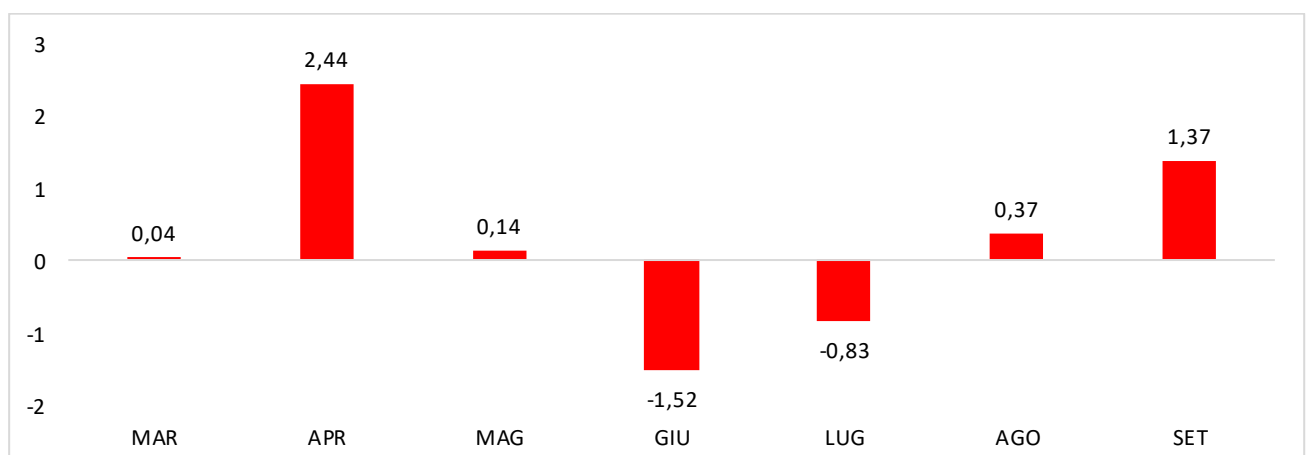


Figura 23, anomalie di temperatura massima per il 2020.

Tra fine marzo e la seconda decade di aprile sono stati registrati valori nettamente sotto la media e prossimi agli 0°C, con un ultimo evento il 16 aprile dove la T minima dell'aria ha raggiunto i 2.6°C. Questi fenomeni, come spiegato in seguito, avranno un impatto sull'inizio della stagione vegetativa. Come già descritto, successivamente l'annata è continuata con un maggio nella media ed un giugno piuttosto freddo e piovoso.

La figura 24 evidenzia la relazione tra precipitazioni ed umidità del suolo misurata a 20 cm. Va evidenziato il drastico abbassamento di umidità del suolo, fino al punto di appassimento per questo terreno (circa 30%), che va da inizio aprile a fine maggio, conseguente alla carenza di precipitazioni in primavera.

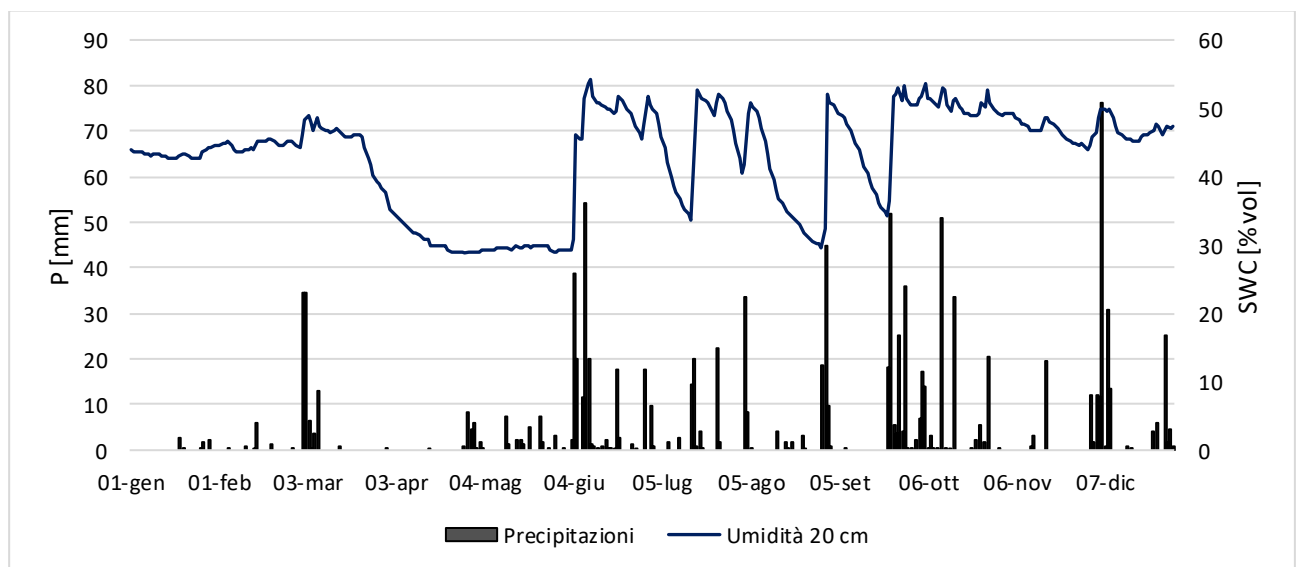


Figura 24, relazioni tra umidità del terreno (SWC) e piogge (P).

Come illustrato nella sezione “materiali e metodi” è stato calcolato il VPD trasformando il dato da semi orario a giornaliero per tutto il 2020. Dalla figura 25 è possibile notare come il VPD non abbia un aumento del tutto regolare, ma riflette l'andamento altalenante delle temperature e precipitazioni descritto in precedenza. Si vede un drastico aumento con l'inizio di aprile, con valori normalmente raggiunti in estate, e seguono dei repentini cali a maggio e soprattutto a giugno a causa delle precipitazioni e abbondante disponibilità d'acqua. L'andamento torna consono al periodo con l'inizio di luglio per poi calare a settembre, dove ancora abbiamo un picco positivo, e arrivare ai valori minimi con la fine dell'anno.

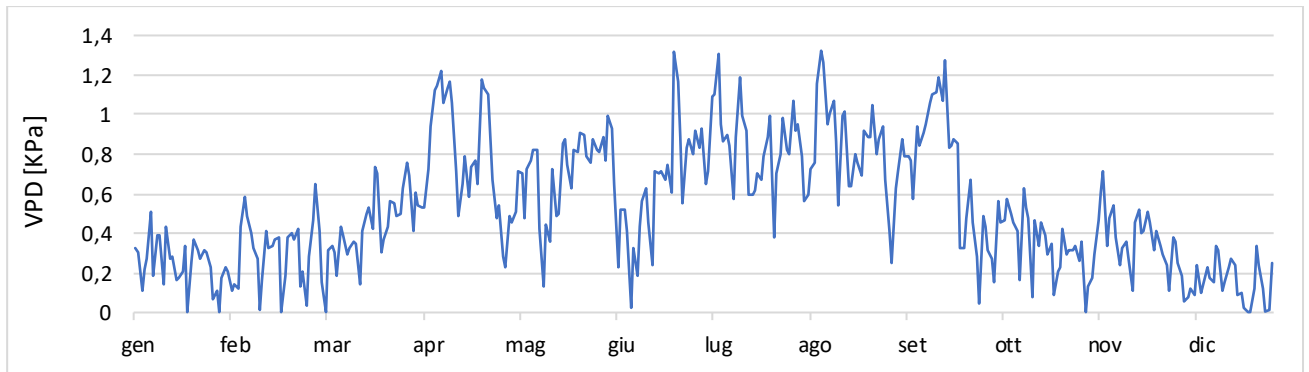


Figura 25, andamento annuo del VPD.

3.2 EVAPOTRASPIRAZIONE REALE DEL VIGNETO

Nella figura 26 vengono rappresentate le precipitazioni giornaliere, l'evapotraspirazione di riferimento, l'evapotraspirazione misurata e la temperatura media giornaliera. Notiamo come il periodo tra marzo e aprile coincida con l'innalzamento dell' ET_0 , la quale raggiunge il suo picco il 23 giugno con un valore di $6.4 \text{ mm giorno}^{-1}$. La fase di crescita è però contraddistinta da repentine discese soprattutto nelle prime settimane di giugno a causa di inusuali eventi piovosi di cui si è parlato in precedenza. Fino ad agosto i valori di ET_0 restano elevati ma con l'inizio di settembre inizia una fase calante che si concretizzerà con l'inizio di ottobre. Da questo momento in poi i valori restano bassi fino a raggiungere i minimi tipici del periodo invernale.

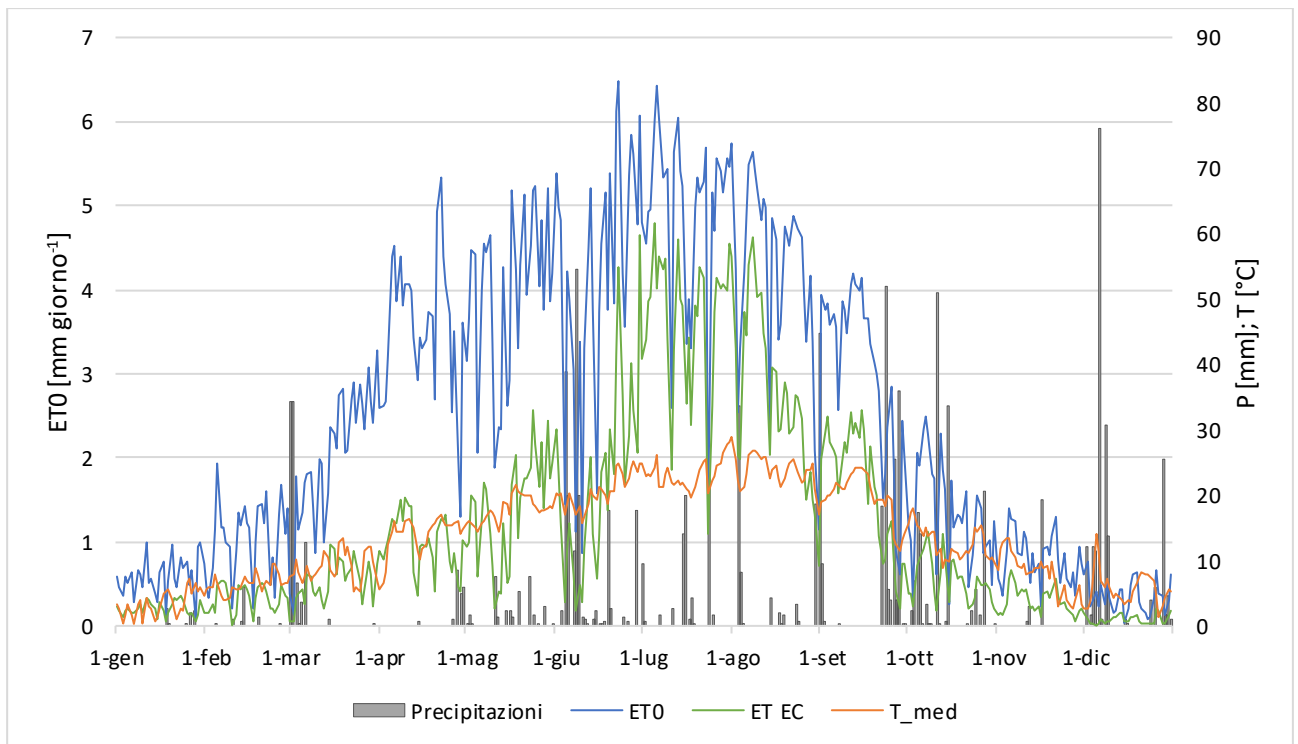


Figura 26, le barre grige mostrano gli eventi piovosi in mm, la riga azzurra indica l' ET_0 e la linea arancione la temperatura media.

Nella figura 26 è mostrata in verde l'evaporazione colturale reale (ETc) del vigneto oggetto di studio, misurata con la tecnica *Eddy Covariance*. Correttamente, risulta essere più bassa rispetto ad ET_0 . Il massimo viene raggiunto in data 5 luglio con un valore di $4.8 \text{ mm giorno}^{-1}$ (figura 26). Si può notare un inizio di stagione altalenante, dove ad aprile si alternano periodi con ETc più o meno intensa, un leggero incremento all'inizio di maggio a cui segue un consistente calo a giugno coerente con le condizioni meteo descritto in precedenza. Durante il resto dell'estate torna a valori nella norma, per poi calare con l'inizio di settembre.

Il grafico 27 mostra la scomposizione in componente radiativa ed aerodinamica dell'ETc, calcolate grazie all'estrapolazione di r_c ed r_a dai dati di evapotraspirazione misurati. La componente aerodinamica è quasi sempre preponderante a causa dell'altezza e della scabrosità della coltura che aumentano il moto turbolento nella *canopy* rispetto alla coltura di riferimento, quest'ultima molto più bassa e omogenea.

Infatti, la componente radiativa dell' ET_0 (figura 28) è quasi sempre maggiore rispetto alla parte aerodinamica perché la superficie di riferimento è un prato con un'altezza e caratteristiche omogenee che riducono l'incidenza dei vortici d'aria e quindi il peso della componente aerodinamica, mentre tutta l'energia in entrata può essere utilizzata dalla coltura di riferimento per la traspirazione essendo questa un tappeto erboso omogeneo ed in comfort idrico.

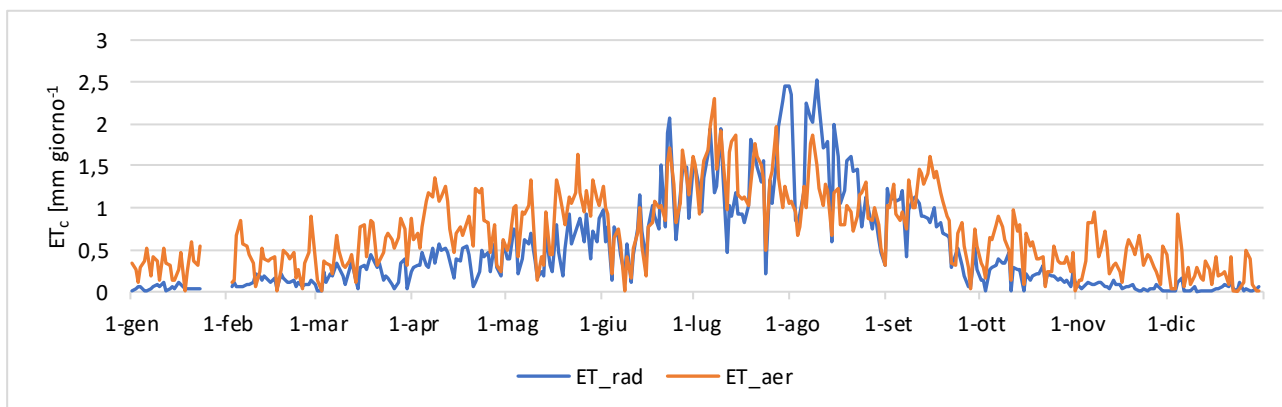


Figura 27, evapotraspirazione reale misurata del vigneto oggetto di studio ripartita in componente radiativa e aerodinamica.

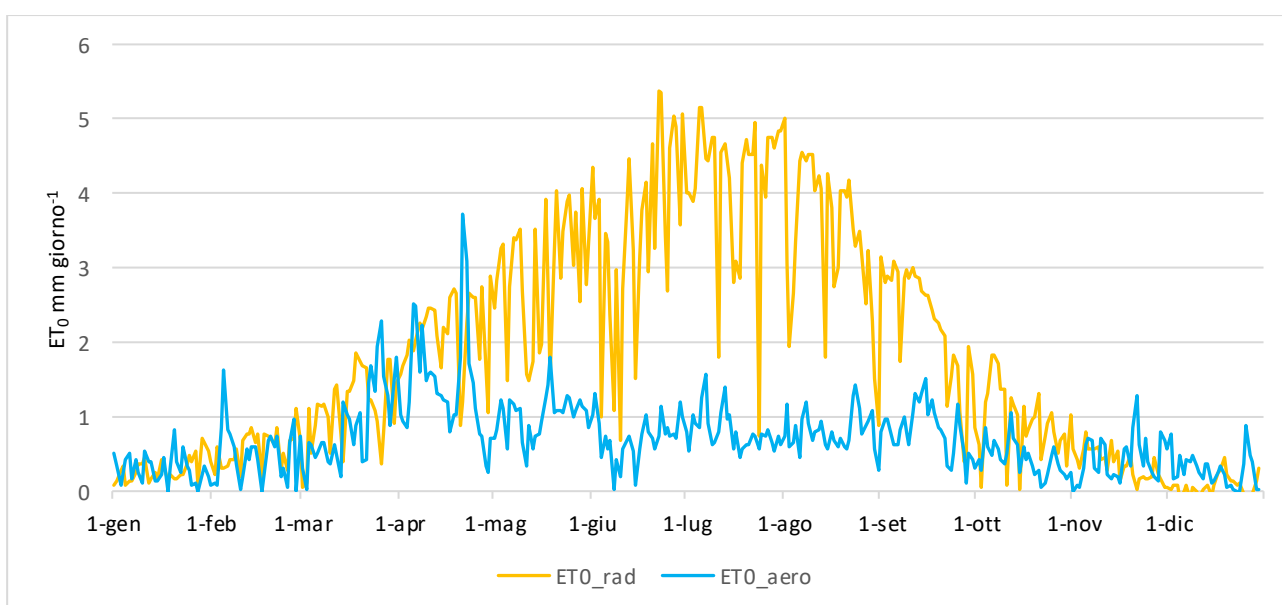


Figura 28, evapotraspirazione di riferimento ET_0 ripartita in componente radiativa e aerodinamica.

Si nota che l'ET, nonostante l'andamento irregolare, inizia ad aumentare vistosamente ad aprile. A causa delle condizioni meteorologiche sopracitate (paragrafo 3.1) a inizio giugno c'è un importante calo ma con l'ultima decade di giugno e l'inizio di luglio i valori tornano nella norma. Per tutto luglio e buona parte di agosto i valori sono nella norma, tra 4 e 5 mm. Con l'inizio di settembre l'ET inizia a calare fino a raggiungere valori tipicamente autunno-invernali.

3.3 STIMA DEI COEFFICIENTI CULTURALI

La figura 29 riporta l'andamento dei diversi Kc analizzati. I pallini blu indicano i valori dei rapporti giornalieri ET_c/ET_0 . Chiaramente i valori giornalieri fluttuano molto, e raggiungono valori minimi e massimi a seconda delle condizioni della giornata. Per una analisi più chiara e

lineare, è stata prodotta la loro media mobile, su 15 giorni, identificata dalla linea blu del grafico in figura 29. Nei primi mesi dell'anno i valori si aggirano attorno allo 0.3. L'andamento del rapporto ET_c/ET_0 evidenzia come quella del 2020 sia stata una stagione piuttosto particolare. È evidente come il meteo instabile, le ondate di basse T e le scarse precipitazioni da inizio anno abbiano ritardato l'inizio della stagione vegetativa e abbiano mantenuto basso il tasso di evapotraspirazione fino ad inizio estate. Infatti, con l'inizio della primavera i valori stentano a salire a causa di alcune ondate di freddo e della bassissima disponibilità d'acqua citata in precedenza. Con l'inizio di maggio sembra esserci una risalita che però viene interrotta da un meteo avverso delle prime settimane di giugno, quando la disponibilità d'acqua è elevata ma il fattore limitante è l'energia in arrivo. Al miglioramento delle condizioni meteo, repentinamente si arriva a valori elevati, oltre lo 0.7, fino a raggiungere un rapporto medio massimo il 4 agosto con 0.77. Da questo momento inizia una forte decrescita che, in modo ondulatorio a causa dell'alternanza del meteo, ci riporta a valori prossimi a 0.3 tipici dell'ultima parte dell'anno.

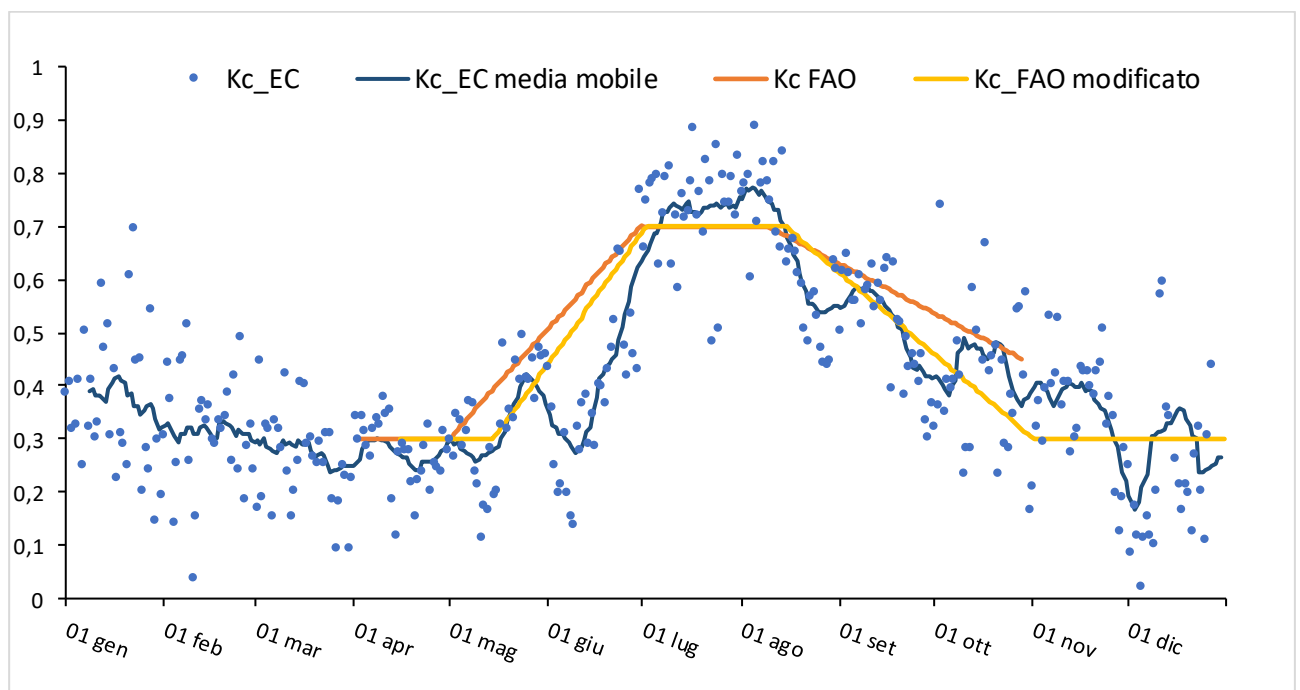


Figura 29, andamenti dei diversi Kc a confronto tra loro.

Come si evince dalla figura 29, l'andamento di Kc_FAO modificato è più simile a Kc_EC rispetto a Kc_FAO standard. L'utilizzo del Kc_FAO porterebbe ad una sovrastima ad inizio e fine stagione. Al contrario l'utilizzo del Kc_FAO modificato è più vicino alla realtà rappresentata da Kc_EC.

Grazie alla tecnica dell'EC è stato possibile calcolare direttamente i rapporti ET_c/ET_0 giornalieri dal quale sono stati derivati i K_c quindicinali e mensili da confrontare con i coefficienti standard suggeriti dalla FAO. Nella tabella 2 troviamo K_{c_EC} calcolato come rapporto tra ET_0 ed ET_{EC} e i valori K_c di riferimento indicati nel quaderno FAO56. In quest'ultimo viene consigliato di modificare i periodi di applicazione dei K_c di riferimento in base alle reali condizioni del vigneto per una determinata zona. La media dei rapporti ET/ET_0 per i periodi modificati, ha portato ai valori di K_c FAO modificato. I periodi selezionati per l'applicazione dei K_c sono stati ottenuti mediante l'utilizzo della figura 29, in cui si nota l'andamento effettivo del K_c .

- Fase di inizio, dal 15 aprile al 14 maggio;
- Fase di sviluppo, dal 15 maggio al 1° luglio;
- Fase di mezzo, dal 2 luglio al 15 agosto;
- Fase finale, dal 16 agosto al 31 ottobre.

	ET	ET ₀	K _c _EC	K _c _FAO	K _c _FAO modificato	K _c _FAO range
Aprile	0.99	3.53	0.28	0.30	0.30	0.45-0.50
Maggio	1.39	3.93	0.34	0.41	0.34	0.55-0.65
Giugno	1.63	4.19	0.39	0.61	0.56	0.6-0.75
Luglio	3.66	4.96	0.74	0.70	0.70	0.6-0.75
Agosto	2.74	4.23	0.65	0.67	0.68	0.6-0.75
Settembre	1.60	3.08	0.52	0.58	0.54	0.6-0.75

Tabella 2, valori medi di ET misurata e di ET₀, confronto tra i diversi valori di K_c calcolati.

In tabella 2 vengono presentate le medie mensili per i K_c ottenuti direttamente dai rapporti ET/ET_0 , confrontati con le medie mensili dei K_c FAO utilizzati nel periodo. Si può vedere come i K_c FAO modificati si discostino leggermente dai FAO standard a causa dei diversi periodi di applicazione e si avvicinino maggiormente ai K_c calcolati rispetto agli standard. Inoltre, in questo particolare anno, K_c ottenuti direttamente dai rapporti ET/ET_0 risultano spesso lontani anche dai K_c _FAO presentati come range.

I coefficienti ottenuti direttamente dai rapporti ET/ET_0 calcolati per gli stessi periodi dei del metodo FAO utilizzati ($K_{cini} = 0.3$; $K_{cmid} = 0.7$; $K_{cend} = 0.3$) risultano essere: $K_{cini} = 0.28$; $K_{cmid} = 0.73$; $K_{cend} = 0.4$.

Il valore cumulato di ET_0 , per l'intera stagione è di 732 mm, il mese col consumo idrico maggiore è stato luglio con 154 mm. L'ET ha avuto un inizio lento, con un aprile in cui sono

stati consumati solo 29 mm, ma anche in questo caso il culmine è stato raggiunto in luglio con 112 mm. È seguita una fase calante fino ai 50 mm di settembre. Complessivamente l'ET stagionale è stata di 374 mm.

3.4 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA AERODINAMICA

La figura 30 riporta i valori di resistenza aerodinamica calcolati tramite EC. I dati sono stati raccolti su base semi-oraria, successivamente sono stati filtrati e mediati giornalmente ottenendo anche le relative deviazioni standard. I pallini rappresentano la resistenza aerodinamica di ogni singolo giorno mentre la linea arancione è una media mobile su 5 giorni, infine le barre di errore grige sono la deviazione standard associata ad ogni giornata.

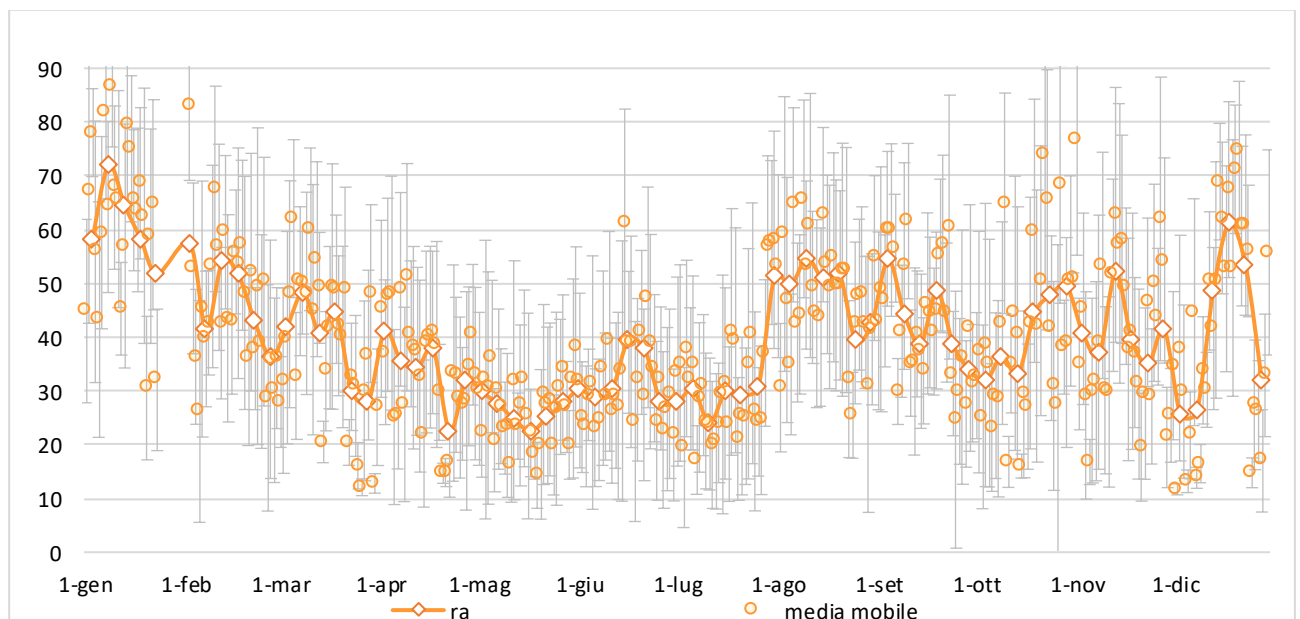


Figura 30, andamento annuo della resistenza aerodinamica.

Si nota come tra aprile e agosto i valori siano piuttosto bassi. Infatti la media è circa a 30 s m^{-1} mentre nei restanti mesi è 45 s m^{-1} .

Questo può essere conseguenza della stabilità aerodinamica del periodo, rispetto altre parti dell'anno. Si può notare come la variabilità giornaliera della resistenza aerodinamica ha gli stessi ordini di grandezza della variabilità durante l'anno.

3.5 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA CULTURALE

Mediante l'inversione della formula di Penman-Monteith sono stati ricavati i valori relativi alla resistenza culturale (figura 31) per ogni mezz'ora. Come nel caso precedente i valori puntuali sono stati filtrati e mediati a scala giornaliera e quindicinale. Si può notare una generale

tendenza in diminuzione con l'avanzare della stagione vegetativa fino a un minimo di 213 s m⁻¹ registrato il 21 luglio. Il massimo è stato registrato ad inizio stagione, il 24 aprile con 572 m s⁻¹, con un secondo picco a metà maggio.

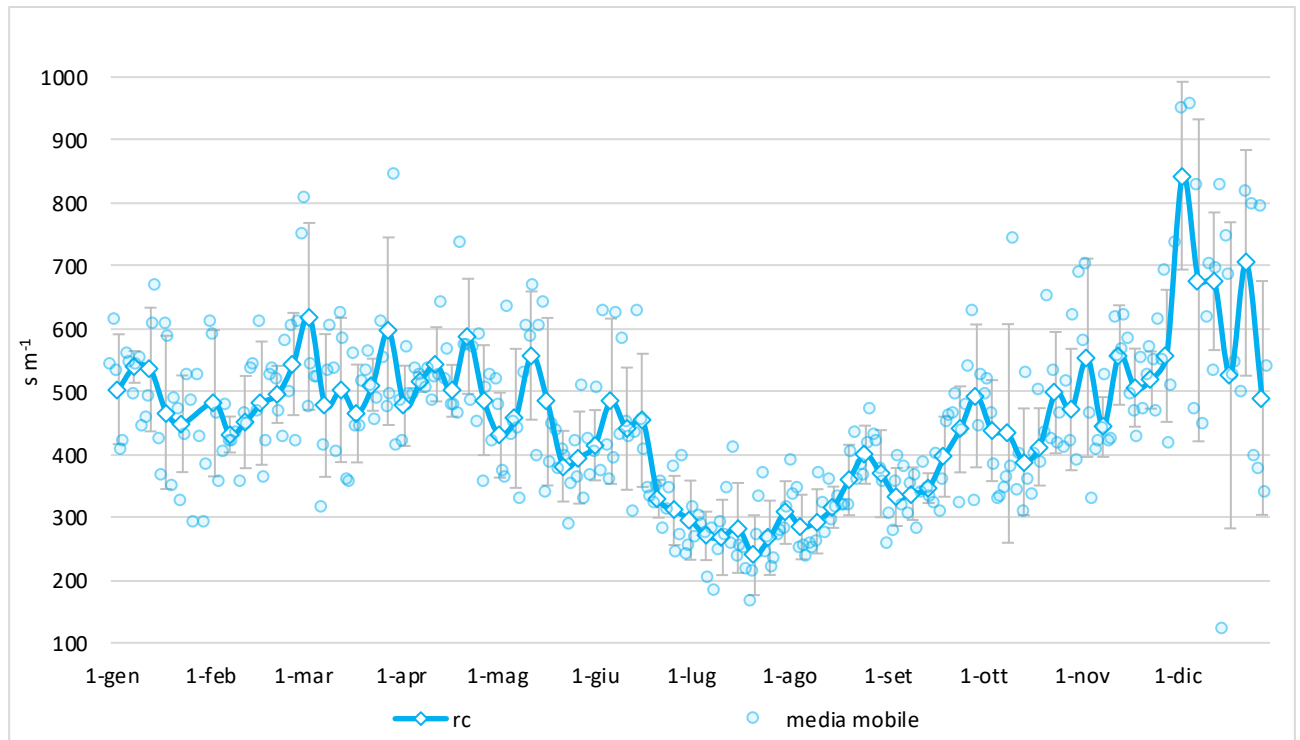


Figura 31, andamento della resistenza colturale.

La figura 32 mostra la scomposizione di r_c nella sua componente diurna e notturna. Emerge una stagionalità piuttosto evidente per la componente diurna (r_c media diurna nel periodo estivo: 350 s m⁻¹, nel periodo autunno/inverno: 494 s m⁻¹), che influenza l'andamento di r_c media giornaliera descritto sopra. La componente notturna al contrario mostra importanti differenze tra un giorno e l'altro ma durante l'anno non ha variazioni significative (r_c media notturna nel periodo estivo: 590 s m⁻¹, nel periodo autunno/inverno: 588 s m⁻¹). Questo è consistente con quanto ci si può aspettare, infatti durante la notte l'evapotraspirazione è essenzialmente nulla mentre il processo di traspirazione e il relativo controllo stomatico sono fenomeni diurni.

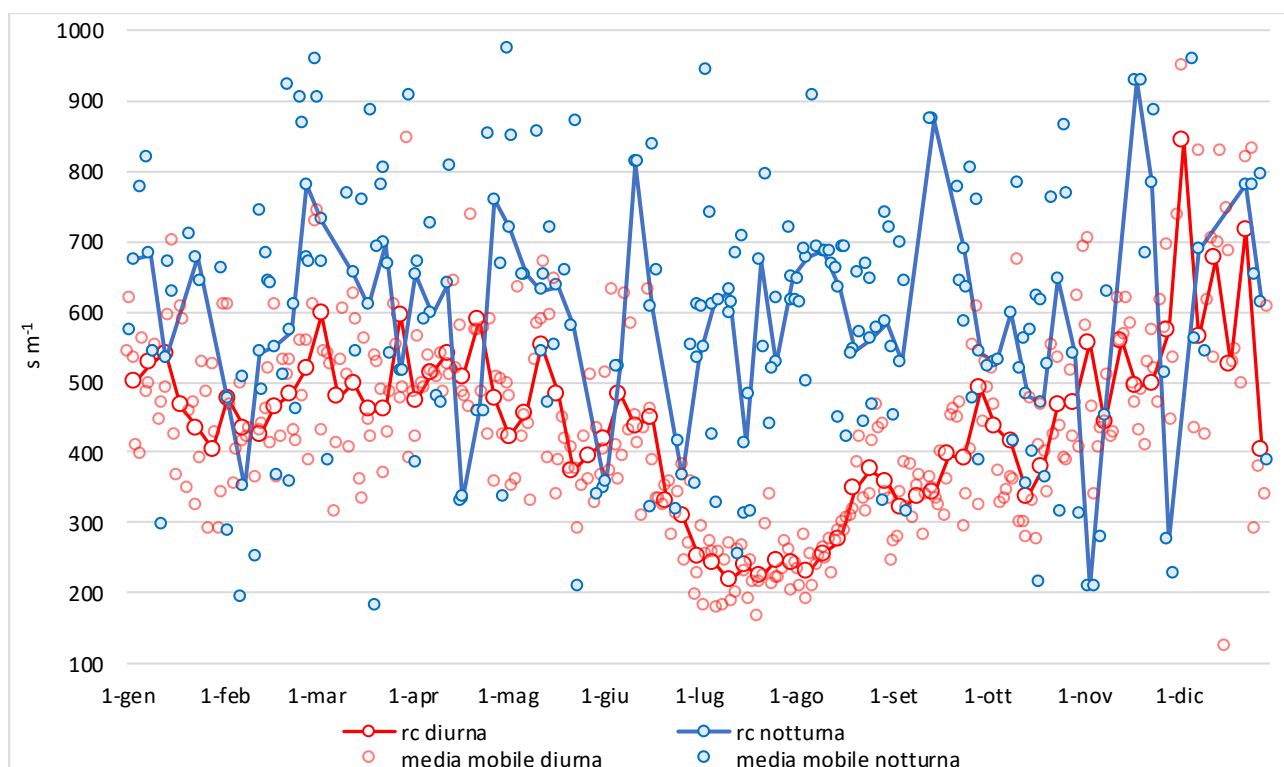


Figura 32, r_c diurna e notturna durante l'anno.

Nella figura 33 è rappresentata una linea blu che indica l'umidità del terreno, una linea verde che indica la resistenza culturale e in nero le colonne che indicano le precipitazioni. Periodi poco piovosi contraddistinti da bassa umidità del suolo coincidono con picchi della resistenza culturale. Ciò è particolarmente evidente tra aprile e maggio dove le piogge sono assenti mentre a giugno vediamo come l'elevata umidità del terreno implichi la minima resistenza culturale del periodo. Anche durante minimi di umidità estivi si può notare l'aumento di r_c , ad esempio ad inizio e fine agosto. Si può quindi affermare che la resistenza culturale ha una tendenza inversamente proporzionale alle precipitazioni e al contenuto idrico del suolo. Infatti, le condizioni di stress idrico favoriscono la produzione di acido abscissico che stimola la chiusura degli stomi. In questo modo aumenta la resistenza al rilascio di vapore in atmosfera e si riduce la quantità d'acqua traspirata.

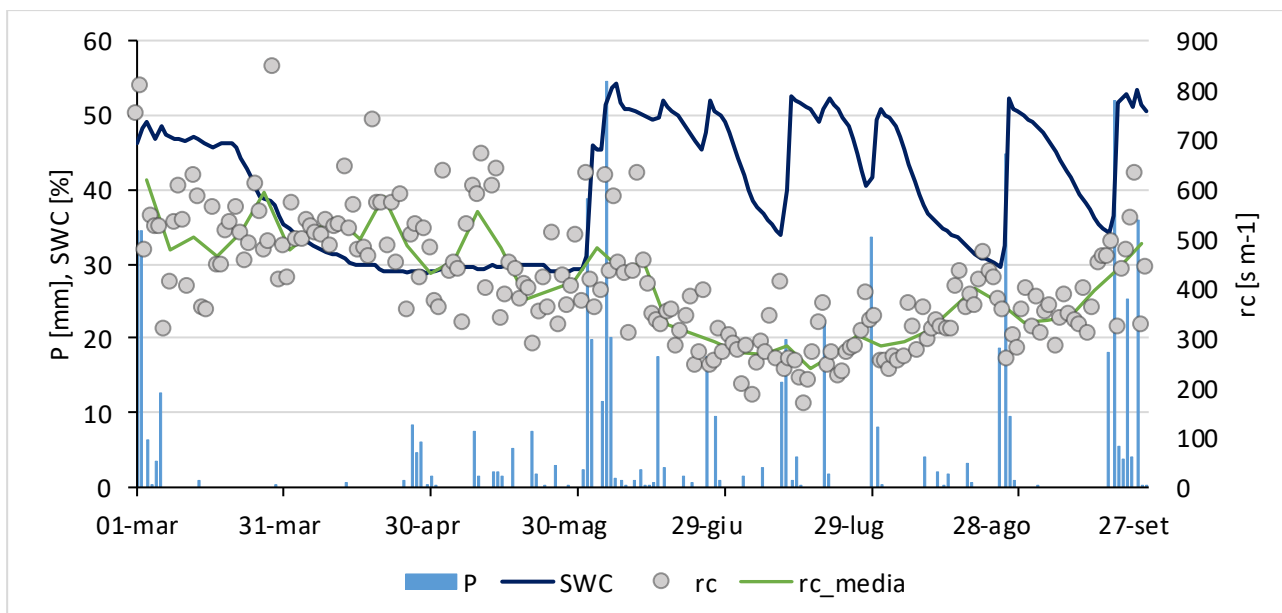


Figura 33, relazione tra precipitazioni, umidità del suolo a 20 cm e resistenza culturale.

3.6 CONFRONTO DELL'ET_c CALCOLATA CON METODO *ONE-STEP* E *TWO-STEP*

In figura 34 sono indicati i valori di evapotraspirazione culturale misurata con la tecnica EC e dell'evapotraspirazione culturale calcolata servendosi del metodo *one-step* - utilizzando valori di r_c e r_a quindicinali ($ET_{c_rc_15gg}$) e mensili ($ET_{c_rc_mese}$) - e metodo *two-step* con K_c FAO modificati. Fino alla seconda decade di giugno il metodo *one-step* si discosta di poco dai valori ottenuti con EC. Da fine giugno a inizio agosto invece si può notare una sottostima, mentre il *two step* rimane piuttosto coerente con le misure.

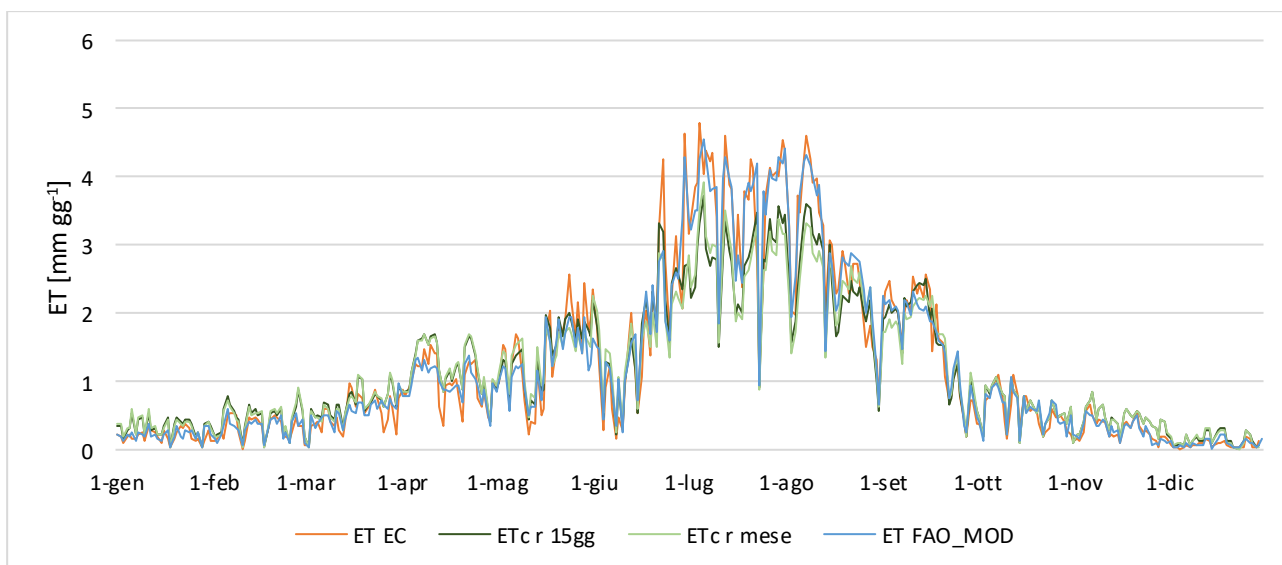


Figura 34, confronto tra ET_c misurata (ET_{EC}), calcolata tramite metodo *one-step* con parametri quindicinali (ET_{rc_15gg}) e mensili (ET_{rc_mese}) e *two-step* (ET_{Kc_mod}).

Dai grafici in figura 35 si può notare come le stime di ET restituiscano degli ottimi coefficienti di correlazione rispetto le misure. Per quanto riguarda il metodo *one-step* si nota come la pendenza della retta di tendenza confermi la sottostima, ma comunque l' R^2 rimane superiore a 0.87. Nel caso del *two-step* invece si ottengono R^2 leggermente minori, 0.86 per i Kc modificati e 0.8 per gli standard, e si può notare una maggiore dispersione dei punti rispetto il *one-step*, ma con una retta di tendenza che conserva una pendenza più vicina alla linea 1:1.

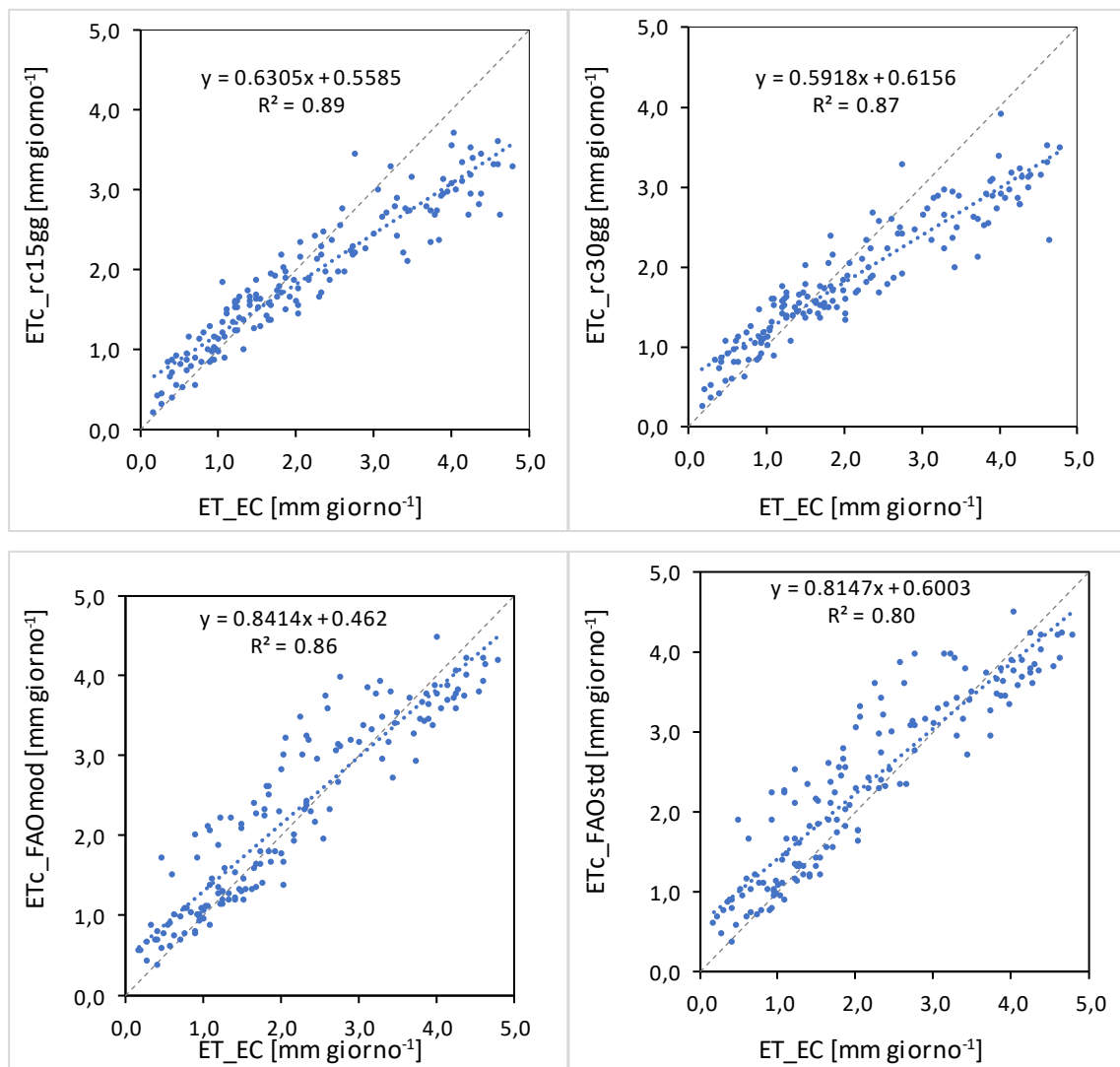


Figura 35, correlazione tra valori di ET misurati con EC ed ET stimata con parametri di r_c quindicinali (in alto a sinistra) e mensili (in alto a destra) e tramite Kc FAO modificati (in basso a sinistra) e FAO standard (in basso a destra). Valori di ET giornalieri da aprile ad agosto, linea 1:1 in grigio tratteggiato.

I valori cumulati di ET ottenuti tramite gli approcci *one-step* e *two-step* sono stati confrontati con l'evapotraspirazione reale ottenuta mediante EC, a scala quindicinale e mensile (figure 36 e 37).

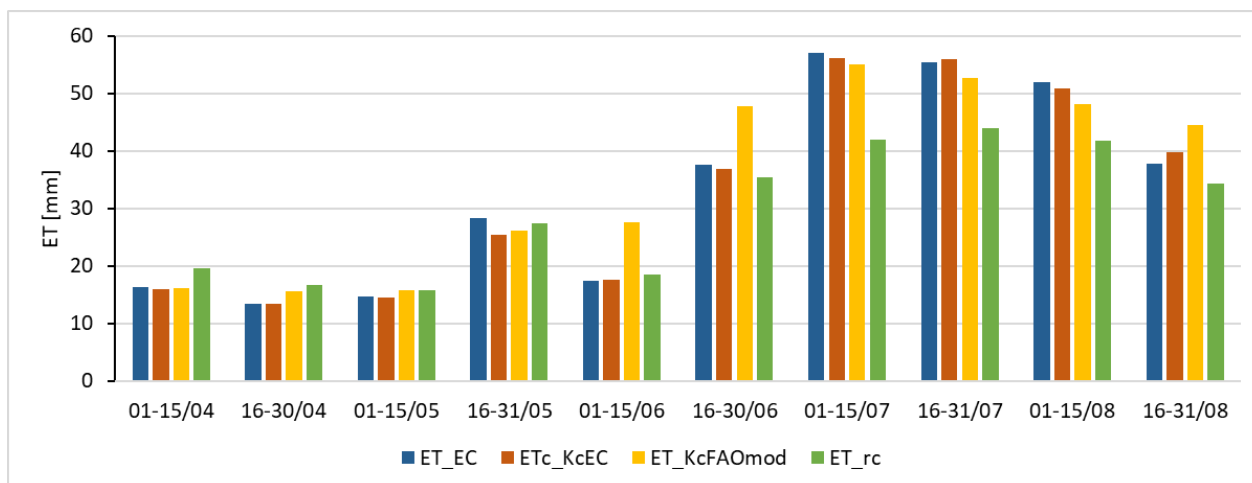


Figura 36, evapotraspirazione cumulata quindicinale misurata (ET_EC) e stimata tramite media dei Kc ottenuti dalle misure EC (ET_KC_EC), metodo two-step (ETc_KcFAOmod) e metodo one-step (ETc_rc).

La figura 33 mostra i valori di evapotraspirazione cumulati ogni 15 giorni misurata (ET_EC) e stimata tramite media dei rapporti ET/ET₀ ottenuti dalle misure EC (ET_KC_EC), metodo *two-step* (ETc_KcFAOmod) e metodo *one-step* (ETc_rc). La figura 34 propone i valori di evapotraspirazione mensile per le stesse variabili.

Chiaramente, i valori di ET stimati tramite le medie dei rapporti ET/ET₀ (tabella 2) sono quelli che si avvicinano di più alle misure reali, essendo delle medie dei valori calcolati direttamente dalle misure.

Si può osservare che l'approccio *one-step* produce una sottostima piuttosto rilevante a luglio ed agosto mentre invece il metodo FAO standard sovrastima l'intero mese di giugno.

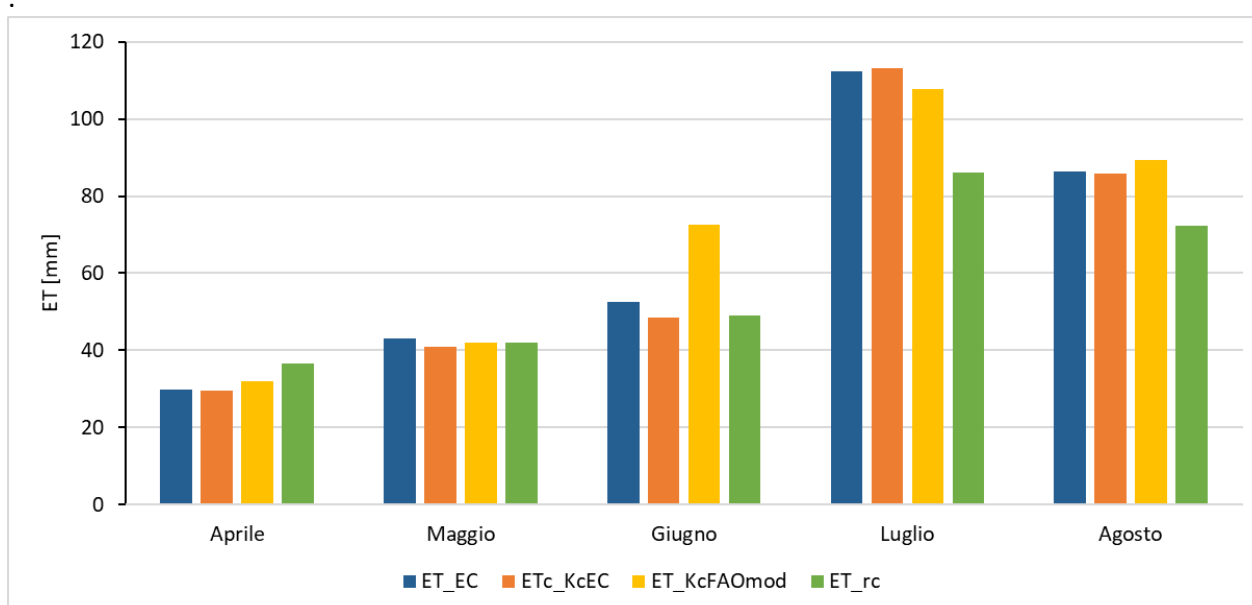


Figura 37, evapotraspirazione cumulata mensile.

In particolare, la figura 36 evidenzia come il metodo *one-step* restituisca una sovrastima ad aprile di circa il 23% e una sottostima di circa 23% a luglio e del 17% ad agosto, rispetto all'ET_EC. Utilizzando il metodo *two-step* con i Kc modificati per le condizioni locali, si ottengono stime più vicine alle misure, con sovrastime del 7% in aprile e del 38% in giugno. Utilizzando invece i Kc FAO standard avremmo avuto delle sovrastime del 7%, 16% e 47% rispettivamente ad aprile, maggio e giugno.

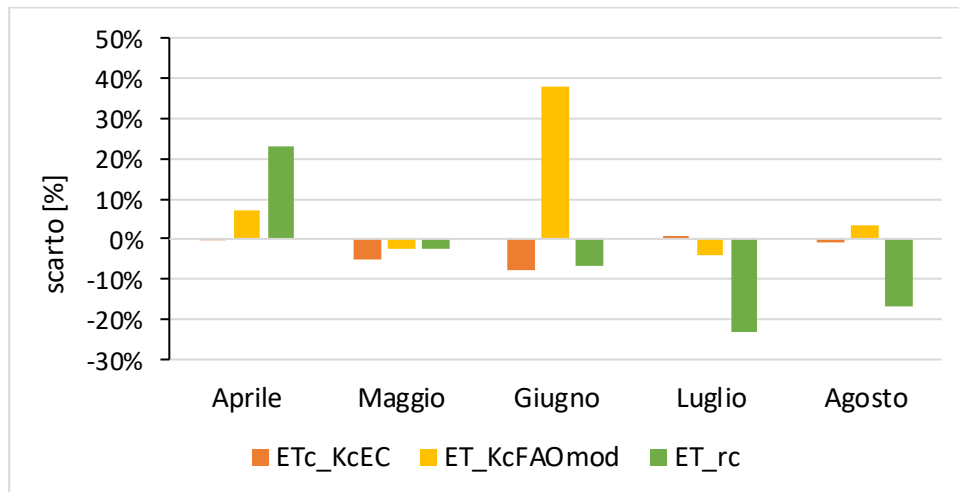


Figura 36, variazione percentuale rispetto a ET_EC.

Infine, a scala stagionale, ovvero da aprile ad agosto, i valori di ET cumulati sono stati di circa 356 mm, 343 mm e 286 mm per le stime ottenute tramite metodo *two-step* con FAO standard e modificato e *one-step*, rispetto al cumulato stagionale misurato di 324 mm circa. Questo si traduce in una totale sovrastima del 10% e 6% per i due metodi *two-step* e una sottostima del 12% circa per il metodo *one-step*.

4 CONCLUSIONI

Nel recentissimo periodo è cresciuto esponenzialmente l'interesse per un'adeguata tutela delle risorse idriche, anche in agricoltura. Lo scopo di questa ricerca è principalmente quello di fornire indicazioni per un uso efficiente di tali risorse al fine di ottenere vantaggi dal punto di vista ambientale ma anche economico. Nonostante ciò, ad oggi, sono ancora poche le ricerche in tale ambito, soprattutto per lo scarso utilizzo della tecnica *Eddy Covariance*.

Durante la disamina di questo studio sono stati presentati due metodi per la stima dell'evapotraspirazione: il metodo *one-step* e il metodo *two-step*. Il metodo *two-step* consiste

nel calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0), quest'ultima poi moltiplicata per un coefficiente colturale (K_c). I K_c utilizzati sono stati ottenuti tramite tre diverse alternative: estrapolati dai valori di evapotraspirazione reale della coltura misurati tramite *Eddy Covariance*, quelli proposti dalla FAO (Allen *et al.*, 1998) tal quale e quelli FAO con periodi di applicazione modificati in base alle caratteristiche del sito.

I risultati migliori chiaramente sono stati ottenuti tramite l'utilizzo dei K_c calcolati direttamente dalle misure EC. Anche l'approccio FAO modificato ha dato buoni risultati, con una sovrastima totale sulla stagione di circa il 6% e un R^2 di circa 0.86 rispetto le misure giornaliere di ET stagionali, mentre il FAO standard si è rivelato il meno adatto alle condizioni del sito di studio.

Una volta modulati in maniera corretta i periodi di applicazione, quindi, i K_c presentati dalla FAO sono risultati essere coerenti con i K_c calcolati direttamente dalle misure sugli stessi periodi. Il periodo dove si è discostato di più dalle misure è stato giugno 2020 con una sovrastima del 38%.

Il metodo *one-step* è più complesso da utilizzare in quanto richiede la conoscenza della resistenza colturale della coltura, che molto spesso non è disponibile e va estrapolato da misure dirette di ET. Di norma il metodo *one step* è più preciso rispetto il *two-step*, ma in questo studio l'approccio *one-step* ha manifestato problemi nei mesi di luglio e agosto. Sul totale della stagione questo metodo ha avuto una sottostima di circa il 12%, e un R^2 stagionale di circa 0.89 (r_c calcolata a scala quindicinale). A livello mensile le performance peggiori sono state sovrastima ad aprile, luglio ed agosto (+23%, -23% e -17% circa).

Il calcolo della resistenza colturale e la sua separazione di valori diurni e notturni hanno dimostrato come la spiccata stagionalità presentata sia essenzialmente modulata durante il giorno (r_c media diurna nel periodo estivo: 350 s m^{-1} , nel periodo autunno/inverno: 494 s m^{-1}). Al contrario, la resistenza colturale notturna ha variazioni molto elevate tra un giorno e l'altro ma si dimostra costante l'anno (circa 590 s m^{-1}).

Inoltre, è stato sottolineato il rapporto tra contenuto idrico del suolo e la variazione del parametro di resistenza colturale, rendendo questo parametro molto importante ai fini modellistici e per gli studi relativi a stress idrico e utilizzo oculato della risorsa idrica in agricoltura.

In questo studio è stato osservato un consumo irriguo da aprile a settembre di 374 mm da parte del vigneto, con un picco nel mese di luglio in cui l'ET ha raggiunto la quota di 112 mm.

In particolare il consumo maggiore è stato nella fase centrale del mese, con un picco massimo il 5 luglio con un valore di 4.8 mm giorno .

Il particolare andamento meteo dell'anno ha sicuramente influito sulle performance di entrambi i metodi di stima. Da un lato, l'utilizzo dei Kc FAO ha permesso di avere stime piuttosto buone anche se, in condizioni meteo molto al di fuori della media come nel mese di giugno 2020, risultano perdere di capacità predittiva. Il metodo *one-step*, normalmente più attinente a quelle che sono le condizioni di campo, ha dimostrato di avere anch'esso delle carenze. Infatti, in particolari situazioni la scomposizione di r_a e r_c risulta essere critica e la ricomposizione di ET non riesce a ricostruire il quadro reale in modo preciso.

5 BIBLIOGRAFIA

ALLEN ET AL., 2006, *A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. Agricultural Water Management 81.*

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M., 1998, *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper (Vol. 56).*

ARPA Sardegna, 2021.

ARPA Veneto, 2021.

Burba, G., 2013. *Eddy covariance method.* (R. Nelson, Ed.). LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska.

BURBA G. AND ANDERSON D., 2010, *A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications. LI-COR Biosciences.*

CMCC, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, 2021.

IPCC, *Climate Change 2021, The physical science basis* (Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Anna Pirani, Sarah L. Connors Clotilde Péan, Yang Chen, Leah Goldfarb, Melissa I. Gomis, J.B.Robin Matthews, Sophie Berger, Mengtian Huang, Ozge Yelekçi, Rong Yu, Baiquan Zhou, Elisabeth Lonnoy, Thomas K. Maycock, Tim Waterfield, Katherine Leitzell, Nada Caud).

JENSEN, M. E., BURMAN, R. D. AND ALLEN, R. G., 1990, *Evapotranspiration and Irrigation Water*

Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers, New York.

MONTEITH, J. L. (1981). *Evaporation and surface temperature. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(451), 1–27.

Regione Veneto ALLEGATO B alla Dgr n. 2240, 2046.

SCIENZA, A., TONINATO, L., ZAPPATA, A., MARIANI, L., FAILLA, O., MARANGON, A., ... ZAMARCHI, P. (2004). *La zonazione della DOC Lison-Pramaggiore Manuale d'uso del territorio.* (Veneto Agricoltura, Ed.). Veneto Agricoltura.

ZOTARELLI Lincoln, DUKES Michael D., ROMERO Consuelo C., MIGLIACCIO Kati W., and MORGAN Kelly T., 2009, *Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method).*

6 SITOGRAFIA

https://www.arpa.veneto.it/bollettini/storico/Mappa_2020_TEMP.htm?t=RG

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/climatologia/dati/estate-2020>

<https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm#Contents>

<http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/notetecniche/nota1/index.asp>