



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO SCIENZE AGRARIE E FORESTALI
DOTTORATO DI RICERCA IN SISTEMI AGRO-AMBIENTALI
INDIRIZZO IDRONOMIA AMBIENTALE
Settore Scientifico Disciplinare AGR/08

CARATTERIZZAZIONE MULTISCALA DEL SISTEMA SPA PER LA MODELLAZIONE IDROLOGICA DEI CONSUMI EVAPOTRASPIRATIVI EFFETTIVI

Dottorando

Dario Autovino

Coordinatore

Ch.mo Prof. Giuseppe Giordano

Tutors:

Ch.mo Prof. Giuseppe Giordano

Prof. Giuseppe Provenzano

CICLO XXVI

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

Indice

Lista delle figure	IV
Lista delle tabelle	X
Lista dei simboli.....	XII
Lista degli acronimi	XV
Introduzione e obiettivi della tesi.....	1
1. Inquadramento teorico	5
2. Modellazione dei processi nel Sistema SPA alle diverse scale di indagine	9
2.1 Modellazione dell'evapotraspirazione effettiva mediante la risoluzione del bilancio energetico	9
2.1.1 L'equazione di Penman-Monteith	11
2.2 Modellazione dei flussi idrici nel sistema SPA.....	14
2.2.1 Il modello HYDRUS-2D	16
2.2.2 Il modello FAO-56.....	20
3. Tecniche di monitoraggio dei processi di scambio idrico ed energetico nel sistema SPA.....	29
3.1 Misure e monitoraggio a scala locale.....	29
3.2 Monitoraggio a scala territoriale: tecniche di remote sensing a supporto della modellazione degli scambi idrici ed energetici nel sistema SPA.....	46
3.2.1 Sintesi sulle tecniche principali di trattamento digitale delle immagini	48
3.2.2 Il sensore MODIS ed i suoi prodotti.....	52
4. Materiali e metodi	56
4.1 Descrizione dell'area di studio.....	56
4.2 Acquisizione di dati remoti rilevati dal sensore MODIS	59
4.3 Descrizione dell'azienda ed attività di campo	62
4.4 Parametrizzazione del modello HYDRUS-2D.....	71
4.5 Parametrizzazione del modello FAO-56.....	74

4.6	Stima diretta dell'evapotraspirazione effettiva mediante l'uso congiunto dell'equazione di Penman-Monteith e di un modello di resistenza superficiale basato su dati remoti.	75
4.7	Analisi statistica dei dati	77
5.	Risultati e discussione.....	77
5.1.	Caratterizzazione agro-climatica dell'area di studio.....	78
5.2	Validazione del modello HYDRUS-2D.....	93
5.3	Validazione ed applicazione del modello FAO-56	107
5.4	Modello di stima dell'evapotraspirazione effettiva attraverso dati remoti	112
6.	Conclusioni	116
	Bibliografia	118

Lista delle figure

Figura 1.1 - Schematizzazione del Continuo-Suolo-Pianta atmosfera (SPA) ed analogia con un circuito elettrico (ψ_s potenziale idrico del suolo o matriciale = -0.01÷-0,15 MPa; ψ_r : potenziale idrico radicale = -0.1÷-0.5 MPa; ψ_{xr} potenziale idrico xilematico = -0.5÷-1,0 MPa; ψ_{xL} potenziale idrico fogliare = -0.2÷-2.5 MPa; ψ_L potenziale idrico dell'aria = -50÷-100 MPa, R_s = resistenza idraulica suolo; R_r = resistenza idraulica radicale; R_x = resistenza idraulica xilematica; RL = resistenza del mesofillo fogliare; E= ambiente esterno)	5
Figura 1.2 - Rappresentazione schematica dei due principali approcci utilizzati per la schematizzazione del sistema continuo SPA. L'ovale rosso mostra i termini del bilancio energetico, mentre l'ovale blu quelli del bilancio idrologico. La parte sovrapposta indica il termine evapotraspirativo, comune ai due approcci.....	6
Figura 2.1 - Funzione di risposta allo stress idrico (Feddes et al., 1978)	17
Figura 2.2 - Funzione di risposta allo stress idrico del tipo sigmoidale (van Genuchten, 1987)	18
Figura 2.3 - Distribuzione schematica dell'attingimento idrico potenziale, $b(x,z)$ nella zona radicale (da Simunek et al., 2011)	19
Figura 2.4 - Schematizzazione del sistema continuo Suolo Pianta Atmosfera nel modello FAO-56 (Rallo, 2010)	20
Figura 2.5 - Ciclo vegeto-produttivo dei diversi tipi di colture e schematizzazione delle fasi di sviluppo (da Allen et al., 1998)	22
Figura 2.6 - Andamento temporale tipico dei coefficienti colturali (FAO, 1998).....	23
Figura 2.7 - Coefficiente di riduzione della traspirazione dovuto allo stress idrico, K_s , in funzione del contenuto idrico e/o del potenziale matriciale del suolo (da Rallo, 2010)	24
Figura 2.8 - Schematizzazione della funzione di stress per la coltura dell'olivo (da Rallo et al., 2014).....	25

Figura 3.1 - Schematizzazione del bilancio termico per la stima dei flussi linfatici (da Sakuratani, 1984)	30
Figura 3.2 - Schematizzazione del sistema CHPV (http://www.ictinternational.com/casestudies/sfm1-sap-flow-and-small-stems/).....	30
Figura 3.3 - Schematizzazione del sistema di Granier per la misura del flusso di linfa.....	31
Figura 3.4 - Metodo diretto per la misura dello spessore del sapwood	32
Figura 3.5 - Sistema TDR per la misura dei contenuti idrici del suolo	33
Figura 3.6 - Esempio di forme d'onda TDR misurate a tre diversi contenuti idrici usando un Tektronix 1502B e una sonda trifilare di 10 cm di lunghezza.....	34
Figura 3.7 - Configurazione geometrica di sonde TDR e corrispondente distribuzione spaziale del campo elettrico in un piano trasversale alle guide metalliche (da Zegelin et al., 1989)	36
Figura 3.8 - Apparecchi TDR: a) Tektronix 1502C (Tektronix Inc.), TRASE System I (Soil Moisture equipment Corp.), c) Field Scout TDR300 (Spectrum Technologies, Inc), d) TDR100 (Campbell Scientific Inc.).....	38
Figura 3.9 - a) Multiplexer per la gestione di più sonde TDR e Dataloggers b) Campbell CR10X c) Cr1000 per la permutazione e l'immagazzinamento dei dati.....	38
Figura 3.10 - Sensore Diviner-2000 della Sentek.....	41
Figura 3.11 - Schema dell'installazione EC per la misura dei flussi energetici	43
Figura 3.12 - Rappresentazione schematica del processo di trasporto di una quantità scalare "c", per mezzo di vortici. In un certo punto della bassa atmosfera, all'istante t, il vortice 1 sposta un pacchetto di aria verso il basso alla velocità w_1 . In un istante successivo (2), il vortice 2 sposta un altro pacchetto verso l'alto alla velocità w_2 (Burba e Anderson, 2005)	44
Figura 4.1 - Le zone irrigue del sub-comprensorio "Garcia-arancio"	57

Figura 4.2 - Ubicazione delle stazioni climatiche nell'intorno della zona 1/A del comprensorio irriguo Garcia-Arancio	58
Figura 4.3 - Procedura per l'acquisizione dei prodotti MODIS	60
Figura 4.4 - Immagine aerea dell'area di studio, identificazione delle celle della griglia MODIS e localizzazione degli strumenti per il rilevamento dei dati ancillari.....	62
Figura 4.5 - Localizzazione geografica e delimitazione dell'azienda sperimentale "Tenuta Rocchetta"	63
Figura 4.6 - Immagine dell'installazione per la misura dei flussi energetici.....	64
Figura 4.7 - Porzione dell'azienda nella quale sono state effettuare le indagini sperimentali.....	65
Figura 4.8 - Schema di installazione dei pozzetti FDR	67
Figura 4.9 - Procedura utilizzata per la determinazione della densità radicale	68
Figura 4.10 - Procedura utilizzata per l'analisi dell'immagine delle radici selezionate su singoli campioni di suolo con il software ImagePro-Plus	69
Figura 4.11 - Stazione per la misura dei flussi linfatici e vista del datalogger di installazione.....	70
Figura 4.12 - Carota estratta dal tronco con diagramma colorimetrico per la determinazione del sapwood.....	71
Figura 4.13 - Schematizzazione del dominio di moto nel modello di simulazione con l'indicazione dei tubi di accesso della sonda FDR e del sistema di irrigazione, utilizzato nel 2011 (a) e nel 2012 (b)	72
Figura 4.14 - Diagramma di flusso del metodo di stima della resistenza superficiale	76
Figura 5.1 - Andamento dei valori giornalieri della radiazione solare, della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa e della velocità del vento, nel periodo esaminato.....	80

Figura 5.2 - Carta pedologica dell'area oggetto di studio (da Bono et al., 1998).....	82
Figura 5.3 - Mappe di contenuto idrico corrispondenti alla capacità di campo (a) ed al punto di appassimento permanente (b) nella zona irrigua 1/A	83
Figura 5.4 - Carta d'uso del suolo del distretto irriguo 1/A.....	84
Figura 5.5 - Dati giornalieri dell'evapotraspirazione di riferimento e dell'evapotraspirazione effettiva misurata con la tecnica della correlazione turbolenta nel periodo compreso tra il 2009 e il 2014	87
Figura 5.6 - Andamento temporale dei prodotti MODIS: <i>LST</i> (a), albedo (b), <i>NDVI</i> (c) ed <i>ET_e</i> (d) nella cella centrale (n° 5) e corrispondenti valori massimi e minimi rilevati in tutte le 9 celle.....	88
Figura 5.7 - Relazione tra l'indice di area fogliare misurato in campo e l'indice <i>NDVI</i>	90
Figura 5.8 - Andamento temporale degli indici <i>NDVI</i> e <i>LAI</i> (stimato) nel 2009 per la coltura dell'olivo	90
Figura 5.9 - Distribuzione spaziale dell'indice di area fogliare (<i>LAI</i>) in diversi periodi del 2009.....	91
Figura 5.10 - Relazione tra <i>K_c</i> e velocità del vento misurata a 10 m per differenti altezze della coltura e valori del <i>LAI</i> . La linea tratteggiata verticale indica il valore di velocità media nell'area di studio (2.7 m s ⁻¹).....	91
Figura 5.11 - Distribuzione spaziale del coefficiente colturale, <i>K_c</i> , in diversi periodi del 2009.....	92
Figura 5.12 - Curve di ritenzione $\psi(\theta)$ ottenute alle profondità di 0, 30, 60 e 100 cm	93
Figura 5.13 - Udogrammi acquisiti nel 2011 nei pozzetti di misura	96
Figura 5.14 - Udogrammi acquisiti nel 2012 nei pozzetti di misura	97
Figura 5.15 - Distribuzione verticale della densità radicale espressa in termini lunghezza delle radici fini per unità di volume di suolo (<i>RLD</i>), per i profili investigati	98

Figura 5.16 - Distribuzione spaziale del parametro <i>RLD</i> per i sei strati di suolo investigato	98
Figura 5.17 - Mappa della distribuzione spaziale dell'apparato radicale, espressa mediante il parametro <i>RLD</i>	99
Figura 5.18 - Mappa della distribuzione spaziale del parametro di distribuzione radicale $\beta(x,z)$	99
Figura 5.19 - Andamento dell'evapotraspirazione di riferimento e dei flussi traspirativi effettivi dell'olivo nelle stagioni irrigue 2011 e 2012	100
Figura 5.20 - Andamento temporale dei valori misurati e simulati, nella stagione irrigua 2012, del contenuto idrico del suolo in corrispondenza ai 25 punti di controllo. Le simulazioni sono state condotte ipotizzando due distinte funzioni di risposta allo stress idrico della pianta (caso A e caso B)	104
Figura 5.21 - Andamento temporale dei valori di traspirazione effettiva misurata e simulata considerando le due funzioni, sigmoidale (caso A) e lineare (caso B), di risposta allo stress idrico della pianta nel 2011 (a) e 2012 (b). I valori di traspirazione massima, delle precipitazioni e degli apporti irrigui sono altresì indicati.....	105
Figura 5.22 - Traspirazione cumulata simulata dal modello HYDRUS-2D nei due casi esaminati e misurata dai sensori sap flow nel 2011 (a) e nel 2012 (b)	105
Figura 5.23 - Andamento temporale del coefficiente colturale stimato analiticamente (eq. 2.12) o ottenuto sulla base di quelli tabellati per le diverse fasi del ciclo vegetativo, nel periodo 2009-2014.....	107
Figura 5.24 - Evapotraspirazione effettiva misurata e simulata con il modello FAO-56 nel periodo 2009-2014, utilizzando sia i valori dei coefficienti colturali tabellati, che quelli analiticamente determinati.....	108
Figura 5.25 – Variabilità dell'evapotraspirazione effettiva nella zona 1/A in diversi periodi del 2009.....	110

Figura 5.26 - Variabilità spazio-temporale dei contenuti idrici del suolo durante la stagione irrigua 2009 nella zona 1/A	111
Figura 5.27 - Relazione tra la resistenza superficiale, r_c e l'indice termico di vegetazione, VTI . La scala di colori sulla destra indica il giorno giuliano	113
Figura 5.28 - Andamento temporale dei valori misurati e stimati della resistenza superficiale (a) e corrispondenti valori dell'evapotraspirazione effettiva (b) nel periodo 2009-2014. E' altresì indicato l'andamento di ET_e ottenuto dal prodotto MOD16A2	114
Figura 5.29 - Confronto tra i valori misurati di ET_e ed i corrispondenti valori stimati ottenuti con la metodologia proposta ed ottenuti dal prodotto MOD16A2	115

Lista delle tabelle

Tabella 3.1 - Possibili applicazioni del telerilevamento e relativi intervalli spettrali.....	49
Tabella 3.2 - Specifiche tecniche del sensore MODIS	53
Tabella 3.3 - Principali applicazioni del sensore MODIS	54
Tabella 4.1 - Prodotti MODIS considerati nella presente tesi.	59
Tabella 4.2 - Indici utilizzati per le valutazioni statistiche	77
Tabella 5.1 - Precipitazioni totali e altre grandezze meteorologiche medie annue registrate dalle stazioni climatiche della rete SIAS nel periodo 2009-2014	79
Tabella 5.2 - Composizione granulometrica e profondità dei suoli all'interno della zona 1/A	82
Tabella 5.3 - Parametri della curva di ritenzione idrica dei terreni stimati utilizzando il software "ROSETTA" (Schaap et al., 2001)	83
Tabella 5.4 - Uso del suolo nell'area di 3 km * 3 km investigata	85
Tabella 5.5 - Superficie occupata da oliveti, numero di parcelle campionate e superficie totale corrispondente, densità e grado di copertura vegetale per tutte le celle analizzate.....	86
Tabella 5.6 - Consistenza del database di misure di evapotraspirazione effettiva, ET_e , e relativa media ottenute attraverso la tecnica della correlazione turbolenta.....	86
Tabella 5.7 - Parametri del modello di van Genuchten e valori della media geometrica, GM, e del coefficiente di variazione, CV, della conducibilità idraulica per tre distinti valori del potenziale matriciale del terreno.....	94
Tabella 5.8 - Parametri statistici ottenuti considerando, come input del modello, le funzioni di risposta allo stress idrico della pianta di tipo sigmoidale (caso A) e lineare (caso B). N indica il numero di dati utilizzato.....	106

Tabella 5.9 - Analisi statistica dell'evapotraspirazione effettiva simulata dal modello
FAO56 utilizzando i coefficienti colturali tabellati e analiticamente determinati ... 109

Tabella 5.10 - Analisi statistica per la valutazione del modello proposto e del
prodotto MOD16A2 115

Lista dei simboli

Simbolo	Descrizione	Unità
$Bias$	Scostamento medio	
c	Velocità di propagazione della luce nel vuoto	$[m\ s^{-1}]$
c_p	Calore specifico dell'aria	$[MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}]$
CR	Rapporto di chiusura	$[-]$
DP	Flusso profondo o drenaggio	$[mm]$
E_e	Evaporazione effettiva dal suolo	$[mm]$
E_m	Evaporazione massima	$[mm]$
$e_s - e_a$	Deficit di pressione di vapore dell'aria	$[kPa]$
ET	Evapotraspirazione	$[mm]$
ET_0	Evapotraspirazione di riferimento	$[mm]$
ET_e	Evapotraspirazione effettiva della coltura	$[mm]$
ET_m	Evapotraspirazione massima della coltura	$[mm]$
EVI	Enhanced Vegetation Index	$[-]$
G_0	Flusso di calore dal suolo	$[MJ\ m^{-2}\ giorno^{-1}]$
H	Flusso di calore sensibile	$[MJ\ m^{-2}\ giorno^{-1}]$
h_{pond}	Altezza di ponding superficiale	$[mm]$
h_{veg}	Altezza della coltura	$[m]$,
I_e	Irrigazione efficace	$[mm]$
k	Costante di von Karman	$[-]$
K_c	Coefficiente colturale	$[-]$
K_{cb}	Coefficiente colturale basale	$[-]$
K_e	Coefficiente evaporativo	$[-]$
K_{ins}	Conducibilità idraulica del suolo insaturo	$[m\ s^{-1}]$
K_s	Coefficiente di stress idrico	$[-]$
K_{sat}	Conducibilità idraulica del suolo saturo	$[m\ s^{-1}]$
LAI	Indice di area fogliare (Leaf Area Index)	$[m^2\ m^{-2}]$
LST	Indice termico di vegetazione	$[-]$
L_t	Superficie di suolo associata al processo traspirativo	$[m]$

L_x	Larghezza della zona radicale	[m]
L_z	Profondità radicale	[m]
MAD	Massima deplezione (Maximum Allowed Depletion)	[mm]
$NDVI$	Normal Difference Vegetation Index	[-]
NSE	Indice di efficienza (Nash-Sutcliffe Efficiency index)	[-]
p	Fattore di deplezione	[-]
$PBias$	Scostamento medio percentuale	[%]
P_e	Precipitazione efficace	[mm]
r_a	Resistenza aerodinamica	[s m ⁻¹]
r_c	Resistenza superficiale	[s m ⁻¹]
$r_{foglia,min}$	Resistenza stomatica minima della singola foglia	[s m ⁻¹]
RH	Umidità relativa dell'aria	[%]
R_l	Radiazione netta a onde lunghe	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
R_l^\uparrow	Flusso di radiazione a onde lunghe emesso dalla superficie	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
R_l^\downarrow	Flusso di radiazione a onde lunghe verso il basso	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
RLD	Lunghezza delle radici fini per unità di volume di suolo	[cm cm ⁻³]
$RMSE$	Root Mean Square Error	
R_n	Flusso di radiazione solare netta	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
RO	Deflusso superficiale	[mm]
R_s	Radiazione solare globale	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
S	Attingimento idrico radicale (sink term)	[s ⁻¹]
S_m	Attingimento idrico radicale massimo	[s ⁻¹]
SR	Simple Ratio	[-]
T_0	Temperatura della superficie	[°C]
T_a	Temperatura dell'aria	[°C]
TAW	Capacità idrica utilizzabile (Total Available Water)	[mm]
T_e	Traspirazione effettiva della coltura	[mm]
T_m	Traspirazione massima della coltura	[mm]
U	Contenuto idrico gravimetrico	[g g ⁻¹]
u_h	Velocità del vento ad altezza h dal suolo	[m s ⁻¹]
V	Densità di flusso traspirativo	[ml cm ⁻² min ⁻¹]
VTI	Indice termico di vegetazione	[-]
X_m	Distanza della massima densità radicale	[m]
z_h	Altezza di misura dell'umidità dell'aria	[m]

z_m	Altezza di misura della velocità del vento	[m]
Z_m	Profondità della massima densità radicale	[m]
z_{oh}	Lunghezza d'attrito per lo scambio di calore	[m]
z_{om}	Lunghezza d'attrito per il trasporto della quantità di moto	[m]
z_r	Profondità dell'apparato radicale	[m]
$\beta(x,z)$	Distribuzione normalizzata dell'attingimento radicale	[m ⁻²]
β_w	Rapporto di Bowen	[-]
γ	Costante psicrometrica	[kPa °C ⁻¹]
Δ	Pendenza della curva della pressione di vapore saturo	[kPa °C ⁻¹]
ϵ	Emissività	[-]
θ	Contenuto idrico volumetrico	[m ³ m ⁻³]
λ	Calore latente di vaporizzazione	[MJ kg ⁻¹]
λE_s	Flusso di calore latente fornito dal suolo	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
λET	Flusso di calore latente	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
λET_c	Flusso di calore latente fornito dalla pianta	[MJ m ⁻² giorno ⁻¹]
λ_s	Conducibilità termica apparente del suolo	[W m ⁻¹ C ⁻¹]
ρ_a	Densità dell'aria a pressione costante	[kg m ⁻³]
ρ_b	Densità apparente del terreno	[kg m ⁻³]
ρ_w	Densità dell'acqua	[kg m ⁻³]
ψ_s	Potenziale matriciale del suolo	[m]
ΔW	Variazione della disponibilità idrica nel suolo	[mm]
α	Albedo	[-]
ϵ	Permittività dielettrica relativa o costante dielettrica	[-]
ν	velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica	[m s ⁻¹]
θ_{cc}	Contenuto idrico corrispondente alla capacità di campo	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{lim}	contenuto idrico per il quale occorre irrigare	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{pa}	Contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento	[cm ³ cm ⁻³]
θ_r	Contenuto idrico residuo	[cm ³ cm ⁻³]
θ_s	Contenuto idrico a saturazione	[cm ³ cm ⁻³]

Lista degli acronimi

Acronimo	Descrizione
SPA	Suolo Pianta Atmosfera
EC	Correlazione turbolenta (Eddy Covariance)
PM	Penman-Monteith
TDR	Riflettometria nel dominio del tempo
FDR	Riflettometria nel dominio delle frequenze
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
VI	Indice di Vegetazione

Introduzione e obiettivi della tesi

L'incremento demografico mondiale degli ultimi decenni ha determinato una crescente richiesta di risorse idriche sia per usi civili ed industriali, che per l'agricoltura. Si stima, infatti, che nel 2030 il progressivo aumento della domanda di risorse idriche determinerà la difficoltà di accesso per circa metà della popolazione del pianeta (WWAP, 2012), soprattutto nelle regioni caratterizzate da climi aridi o semiaridi.

I problemi connessi alla carenza di risorse idriche sono particolarmente rilevanti in agricoltura che, a scala globale, utilizza attualmente il 70% dell'intero utilizzo delle acqua proveniente dai corpi idrici superficiali e sotterranei (WWAP, 2014). L'uso finale di tali risorse (corpi idrici superficiali e sotterranei) riguarda in buona parte, per circa il 50%, il consumo diretto da parte delle colture ed è parzialmente restituito all'atmosfera attraverso i fenomeni di evaporazione dal suolo e traspirazione dalle piante (FAO, 2011).

Quando si parla di consumi idrici delle colture si fa riferimento alla combinazione dei due processi citati, che in genere vengono sintetizzati in un unico termine, rappresentato dall'evapotraspirazione, *ET*, relativa al sistema suolo-pianta.

La conoscenza dell'entità della perdita di acqua per evapotraspirazione, oltre che della sua distribuzione spaziale, interessa svariati campi applicativi, quali ad esempio quelli connessi allo studio del clima a scala globale, alla gestione delle risorse idriche ed al monitoraggio della siccità in agricoltura (Anderson et al., 2012). L'importanza di questa tematica ha, già da diversi decenni, stimolato la comunità scientifica verso lo sviluppo di una serie di diverse metodologie che consentono sia la misura diretta che la modellizzazione dell'evapotraspirazione (Guzinski et al., 2015).

Per quanto riguarda le applicazioni negli ecosistemi agrari, l'approccio scientificamente più comune per analizzare il processo evapotraspirativo si basa sulla schematizzazione del sistema Suolo Pianta Atmosfera (SPA), inteso come un sistema continuo costituito da elementi elementari che in esso interagiscono (suolo, pianta e atmosfera), considerati parte di un unico sistema idraulico che mette in connessione l'acqua presente nel suolo con il vapore acqueo contenuto nell'atmosfera. Lo studio di tale sistema è abbastanza complesso, non soltanto per il notevole numero di variabili che entrano in gioco, ma anche e

soprattutto per i fenomeni di autoregolazione interna che si verificano tra le diverse componenti del sistema stesso.

I metodi più comuni per la stima dei consumi evapotraspirativi nel sistema SPA si basano su approcci di bilancio idrico o energetico o sulla combinazione di entrambi, applicati a domini spaziali ben definiti e che possono riguardare singole piante, parcelle più o meno omogenee o mosaici territoriali più complessi.

I modelli di stima dei consumi evapotraspirativi delle colture che si basano sulla risoluzione del bilancio idrico (o di massa) schematizzano, in generale, tutti i flussi sia “entranti” (precipitazione, apporti irrigui, deflussi, etc.) che “uscenti” (traspirazione, evaporazione, deflusso profondo, etc.) dal sistema. Questi possono includere sub-modelli finalizzati alla simulare la dinamica dell’acqua nel suolo in condizioni insature, il trasporto dei soluti e la crescita delle colture (Droogers, 2000, Ragab, 2002, van Dam et al., 1997, Vanclooster et al., 1994).

Solitamente, nei modelli basati sulla risoluzione del bilancio idrico, la determinazione dell’evapotraspirazione fa riferimento alla cosiddetta ipotesi “big-leaf” dell’approccio di Penman-Monteith (Monteith, 1965), sulla base della quale si considera che il processo evapotraspirativo avvenga da una superficie fogliare “equivalente”, che ricopre uniformemente il suolo. Sulla base di tale ipotesi, l’evapotraspirazione massima di una generica coltura, ET_m , può determinarsi dal prodotto dell’evapotraspirazione della coltura di riferimento per dei coefficienti colturali che, tuttavia, risultano noti soltanto per un numero limitato di specie di interesse agrario. Per quanto concerne l’evapotraspirazione di riferimento, ET_0 , questa rappresenta quel valore di evapotraspirazione che, in un determinato ambiente climatico e geografico, contraddistingue una coltura standard o di “riferimento” mantenuta in assenza di stress idrico (Allen et al., 1998).

Al contrario, i modelli basati sulla risoluzione del bilancio energetico superficiale stimano generalmente il termine evapotraspirativo come valore residuo del bilancio che considera i flussi di energia entranti ed uscenti dalla superficie evapotraspirante (Schmugge et al., 2002), schematizzata mediante l’approccio “big leaf” o attraverso un sistema “dual source”, costituito dal suolo e dalla pianta.

Oltre agli approcci di tipo modellistico, negli ultimi decenni sono stati anche sviluppate alcune tecniche di monitoraggio diretto per la misura dei flussi evapotraspirativi a diverse scale di osservazione. Ad esempio, se alla scala di singola pianta la traspirazione può essere quantificata misurando i flussi linfatici, a scala di parcella l’evapotraspirazione può

essere misurata mediante lisimetri o attraverso le più innovative tecniche micro-meteorologiche.

Tali metodi permettono in generale di ottenere misure localizzate e pertanto non sono idonee a rilevare la variabilità spaziale dei flussi evapotraspirativi, se non attraverso fitte reti di monitoraggio, che tuttavia risultano onerose sia per i costi di installazione che per l'analisi dei dati rilevati. A scala territoriale, un approccio che permette di stimare i flussi evapotraspirativi con una accuratezza adeguata alle pratiche applicazioni, è quello che utilizza misure remote ottenibili da dati telerilevati. Infatti, a differenza delle osservazioni in situ, le acquisizioni da piattaforma satellitare sono intrinsecamente caratterizzate da una certa variabilità e permettono di effettuare stime caratterizzate da elevate frequenze temporali.

In questo contesto, appare chiaro come in funzione della scala spaziale di interesse è necessario fare ricorso ad una caratterizzazione del sistema Suolo Pianta Atmosfera più o meno dettagliata, al fine di poter determinare correttamente i consumi idrici delle colture utilizzando l'approccio modellistico più opportuno.

Nella presente tesi, il sistema Suolo Pianta Atmosfera è stato esaminato considerando differenti scale spaziali e temporali, al fine di esaminare diverse metodologie per la stima dei principali termini del bilancio idrico ed energetico che caratterizzano il sistema stesso. In particolare, a scala di singola pianta, sono state approfondite le potenzialità applicative di un modello di bilancio idrico di massa (HYDRUS-2D) per valutare la variabilità spazio-temporale del contenuto idrico del suolo e la dinamica temporale dei flussi traspirativi effettivi di piante di olivo, soggette a differenti sistemi di distribuzione irrigua.

A scala parcellare lo studio è stato finalizzato a migliorare la stima dei coefficienti colturali, K_c , facendo uso sia di dati climatici che di misure remote. Tale approccio è stato poi integrato con un modello di bilancio agro-idrologico monodimensionale al fine di stimare la variabilità spaziale e temporale dell'evapotraspirazione effettiva all'interno di un comprensorio irriguo oltre che di programmare gli interventi irrigui all'interno dello stesso. E' stata infine messa a punto una metodologia per la stima diretta dell'evapotraspirazione effettiva, utilizzabile anche su ampie superfici, basata sull'applicazione dell'equazione di Penman-Monteith nella quale il termine di resistenza della coltura è calcolato in funzione di un indice termico di vegetazione, ottenuto da dati remoti acquistati dal sensore MODIS.

Tale procedura può essere considerata una valida alternativa per la stima della variabilità spaziale dell'evapotraspirazione effettiva e conseguentemente dei fabbisogni irrigui a scala

regionale, laddove siano presenti reti di monitoraggio a terra dei parametri climatici di base.

La validazione dei diversi approcci modellistici applicati o messi a punto è stata effettuata sia a livello di singola pianta che alle scale di indagine più ampie, con riferimento ad un esteso database di misure sperimentali di contenuti idrici del suolo, di flussi traspirativi monitorati attraverso misuratori di flusso linfatico (Sap-flow), nonché dei flussi evapotraspirativi acquisiti mediante la tecnica della correlazione turbolenta.

1. Inquadramento teorico

Lo studio delle relazioni di scambio idrico negli ecosistemi agrari si basa sul concetto di sistema continuo Suolo Pianta Atmosfera, SPA, proposto per la prima volta da Philip nel 1966.

Secondo tale schematizzazione la pianta viene considerata come un sistema idraulico continuo, che mette in connessione l'acqua presente nel suolo con il vapore acqueo contenuto nell'atmosfera. L'attingimento radicale, così come il flusso idrico che attraversa la pianta, è influenzato dalla richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera, dalle caratteristiche idrauliche del suolo, oltre che dalle resistenze esercitate dall'interfaccia suolo-radice e tra la superficie fogliare e l'atmosfera.

Per lo studio delle relazioni idriche esistenti tra le componenti del continuo Suolo-Pianta-Atmosfera è utile l'analogia con un circuito elettrico schematizzata in figura 1.1, secondo la quale il flusso idrico nella pianta è descritto attraverso un insieme di resistenze, in serie o in parallelo, che collegano elementi del sistema a diverso potenziale.

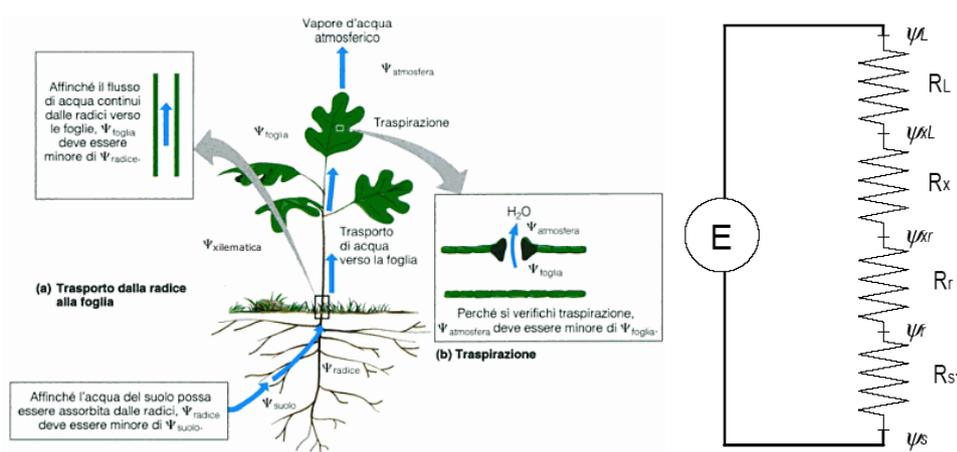


Figura 1.1 - Schematizzazione del Continuo-Suolo-Pianta atmosfera (SPA) ed analogia con un circuito elettrico (ψ_s potenziale idrico del suolo o matriciale = $-0.01 \div -0,15$ MPa; ψ_r : potenziale idrico radicale = $-0.1 \div -0.5$ MPa; ψ_{xr} potenziale idrico xilematico = $-0.5 \div -1,0$ MPa; ψ_{xL} potenziale idrico fogliare = $-0.2 \div -2.5$ MPa; ψ_L potenziale idrico dell'aria = $-50 \div -100$ MPa, R_s = resistenza idraulica suolo; R_r = resistenza idraulica radicale; R_x = resistenza idraulica xilematica; R_L = resistenza del mesofillo fogliare; E = ambiente esterno)

Il movimento dell'acqua nella pianta è infatti governato da regole analoghe a quelle che definiscono i flussi di corrente elettrica, così come descritti dalla legge di Ohm. Il gradiente di potenziale idrico nel sistema SPA determina il movimento dell'acqua attraverso la pianta, da punti del sistema a maggiore potenziale idrico ad altri, caratterizzati da minore potenziale.

Le relazioni idriche che avvengono all'interno del sistema SPA possono essere studiate utilizzando schematizzazioni basate o sul principio di conservazione della massa (bilancio idrologico) o sul principio di conservazione dell'energia (bilancio energetico), i cui termini sono mostrati in figura 1.2. Le suddette schematizzazioni sono interconnesse e possono essere anche utilizzate congiuntamente al fine di determinare la variazione nel tempo di una o più variabile tra quelle descritte per la schematizzazione del processo di scambio idrico.

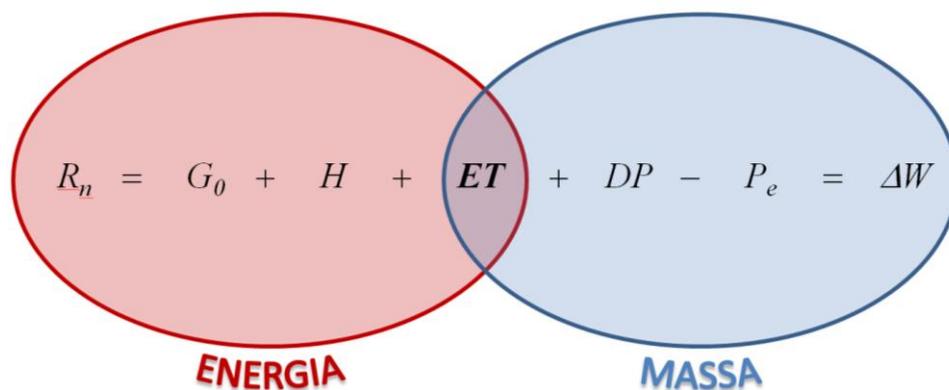


Figura 1.2 - Rappresentazione schematica dei due principali approcci utilizzati per la schematizzazione del sistema continuo SPA. L'ovale rosso mostra i termini del bilancio energetico, mentre l'ovale blu quelli del bilancio idrologico. La parte sovrapposta indica il termine evapotraspirativo, comune ai due approcci

Il bilancio idrologico nel sistema SPA consente di valutare la variazione nel tempo della disponibilità idrica nel suolo (ΔW), attraverso la risoluzione del bilancio idrico tra i flussi entranti (precipitazione netta, P_e , irrigazione, I) e quelli uscenti e diretti in atmosfera (evapotraspirazione, ET) e negli strati profondi del suolo (drenaggio, DP).

Nel bilancio energetico la radiazione netta proveniente dall'atmosfera (R_n) viene in minima parte trasferita nel suolo (G_0), mentre la maggior parte si trasforma in calore sensibile (H) e calore latente o evapotraspirazione, (λET), che attraversa la generica superficie (suolo/canopy) con la quale è schematizzato il sistema SPA.

Appare chiaro come l'evapotraspirazione o flusso di calore latente, sia il termine in comune ad entrambi gli approcci che sono stati ampiamente utilizzati, in alcuni casi in modo congiunto, per mettere a punto procedure e schemi modellistici finalizzati alla stima dell'evapotraspirazione effettiva, ET_e , del sistema SPA.

Nell'approccio di tipo energetico l'evapotraspirazione effettiva ET_e , è dedotta come termine residuo del bilancio energetico, attraverso la stima dei termini R_n , H e G_0 . I modelli che si basano sull'equazione del bilancio energetico utilizzano in genere due diverse schematizzazioni: la prima, conosciuta come "one-source" o "big leaf" (Monteith, 1965) considera la vegetazione come una superficie omogenea e semitrasparente nella quale i fenomeni di evaporazione del suolo e traspirazione delle piante vengono considerati congiuntamente. La seconda impostazione conosciuta come "two-layer" o "two-source", considera invece i due suddetti fenomeni separati attraverso una partizione tra flussi energetici nel suolo e flussi energetici nella sola canopy (Shuttleworth e Wallace, 1985).

Anche i modelli di bilancio idrologico si possono suddividere in due categorie: la prima, di tipo semplificato ipotizza che il sistema SPA sia costituito da un unico serbatoio in cui i termini del bilancio idrico vengono descritti attraverso schematizzazioni semplici e spesso basate su equazioni empiriche; l'altra categoria si basa invece su una schematizzazione più complessa che utilizza le leggi a base fisica per lo studio dei flussi idrici nei sistemi insaturi accoppiate a equazioni o modelli che descrivono l'attingimento radicale nel suolo. In entrambi i casi, l'evapotraspirazione effettiva viene solitamente calcolata a partire dal valore dell'evapotraspirazione di riferimento riferita ad un prato stabile di erba medica o festuca, alto 12 cm che ricopre interamente la superficie del suolo e mantenuto in condizioni di rifornimento idrico ottimale, utilizzando dei coefficienti colturali tabellati, che vanno corretti per tenere conto dell'effettivo contenuto idrico del suolo.

Nella prima categoria di modelli di bilancio idrico nel sistema SPA rientra ad esempio, il modello di simulazione presentato nel quaderno FAO 56 (Allen et al., 1998), mentre nella seconda categoria rientrano i modelli tipo HYDRUS-2D/3D, SWAP, ACRUS, etc., che risolvono in termini numerici ed in modo integrato le complesse espressioni analitiche che descrivono i processi di scambio idrico tra suolo, pianta e bassa atmosfera.

Oltre allo sviluppo modellistico, nell'ultimo decennio si è registrato anche un rinnovato impulso verso le tecniche di misura locale o di pieno campo dei flussi di evapotraspirazione. Nell'ultimo decennio il progresso nello sviluppo di nuovi sensori biofisici e delle tecniche micrometeorologiche (come misuratori di flusso linfatico, correlazione turbolenta e scintillometri ecc.) ha offerto l'opportunità di ottenere una diretta

misura dell'evapotraspirazione a differenti scale spaziali. In particolare le strumentazioni più recenti (Bowen Ratio, correlazione turbolenta, Scintillometri, ecc.) si basano su misure di gradienti e/o fluttuazioni dei termini della diffusione turbolenta (temperatura, umidità, concentrazioni di vapore, flusso di calore sensibile, ecc.) direttamente correlate al flusso di evapotraspirazione. Le suddette tecniche di misura richiedono una preventiva analisi delle caratteristiche di stazionarietà spaziale dei movimenti atmosferici (ventosità e fetch) nonché dell'omogeneità ed estensione della canopy che caratterizza il sito di misura, al fine di determinare, con precisione, l'area di interesse a cui associare il dato misurato.

Tali osservazioni sono tuttavia rappresentative di una scala locale e non permettono la misura (se non ad alti costi) alle scale spaziali più ampie, a causa dell'eterogeneità della superficie terrestre e della natura dinamica del processo di trasferimento di massa e di energia (Su 2002).

Alla scala territoriale, l'unico approccio possibile per stimare *ET* con un ragionevole grado di precisione è basato sull'uso di dati rilevati da remoto (Guerschman et al., 2009) che possono essere utilizzati per una completa caratterizzazione delle proprietà biofisiche del manto vegetale da utilizzare nelle applicazioni modellistiche.

2. Modellazione dei processi nel Sistema SPA alle diverse scale di indagine

2.1 Modellazione dell'evapotraspirazione effettiva mediante la risoluzione del bilancio energetico

Nell'ipotesi di considerare trascurabili il flusso di energia orizzontale dovuto ai fenomeni di avvezione, la quantità di energia immagazzinata nella chioma e nell'aria e l'energia utilizzata per la fotosintesi, l'equazione del bilancio energetico di una generica superficie si scrive:

$$R_n - G_0 - H - \lambda ET = 0 \quad (2.1)$$

nella quale R_n [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$] rappresenta il flusso della radiazione solare netta, G_0 [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$] il flusso di calore dal suolo, H [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$] il flusso di calore sensibile, e λET [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$] il flusso di calore latente, che rappresenta l'aliquota di energia utilizzata per l'evaporazione superficiale e per i processi di traspirazione della pianta.

Per convenzione, il termine R_n si considera positivo quando la radiazione è diretta verso la superficie, mentre G_0 , H e λET si considerano positivi quando sono in direzione uscente dalla superficie. L'equazione 2.1, rappresenta il principio di conservazione dell'energia applicato all'intero sistema SPA; da essa è possibile stimare l'evapotraspirazione effettiva mediante il classico approccio "residuale" che consente di ottenere, a partire dall'equazione 2.1, la seguente espressione:

$$ET = \frac{R_n - G_0 - H}{\lambda} \quad (2.2)$$

La radiazione solare netta R_n , ossia l'aliquota disponibile alla superficie al netto delle perdite dovute alla riflessione, è il risultato complessivo del bilancio radiativo su una

superficie che considera sia la componente a onde corte (lunghezze d'onda tra 0.3 e 2.5 μm), sia quella ad onde lunghe (lunghezze d'onda tra 3 e 100 μm).

Risulta pertanto:

$$R_n = (R_{se} - R_{su}) + (R_{le} - R_{lu}) \quad (2.3)$$

in cui R_{se} e R_{su} [MJ m^{-2} giorno $^{-1}$] rappresentano rispettivamente la densità di flusso radiativo ad onde corte entrante ed uscente, mentre R_{le} e R_{lu} [MJ m^{-2} giorno $^{-1}$], indicano gli analoghi flussi ad onde lunghe. Indicando con α l'albedo di superficie e ricorrendo alla legge di Stefan-Boltzmann per il calcolo R_{le} e R_{lu} , la (2.3), può essere riscritta nella seguente forma:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{se} + \epsilon_0(\epsilon' \sigma T_a^4 - \sigma T_0^4) \quad (2.4)$$

in cui ϵ' [-], indica l'emissività apparente dell'atmosfera, ϵ_0 [-], l'emissività della superficie, σ [$\text{MJ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4}$ giorno $^{-1}$], la costante di Stefan-Boltzmann, mentre T_a e T_0 [$^\circ\text{K}$], rappresentano rispettivamente la temperatura dell'aria e della superficie.

Il termine G_0 che compare nell'equazione 2.1, rappresenta il flusso di calore trasferito dalla superficie del suolo verso gli strati sottostanti a causa dei gradienti verticali di temperatura. Il suo valore ad un determinato livello di profondità, z , può essere desunto attraverso la legge di Fourier per la conduzione di calore in un mezzo omogeneo:

$$G_{(z)} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (2.5)$$

nella quale λ_s [$\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$] è la conducibilità termica apparente del suolo e $\partial T_s / \partial z$ [$^\circ\text{C m}^{-1}$] esprime il gradiente verticale di temperatura nel suolo. Quest'ultimo può assumere valori positivi o negativi a seconda che ci sia in corso un riscaldamento o un raffreddamento della superficie. La conducibilità termica è strettamente legata alle condizioni di umidità del suolo poiché l'aria presente nei pori, che è uno scarso conduttore di calore, viene sostituita dall'acqua che è invece un buon conduttore.

Il termine H che compare nell'equazione 2.1 rappresenta il flusso di calore sensibile scambiato tra il suolo e lo strato d'aria a contatto, conseguente ai gradienti termici. Seguendo uno schema ormai classico della micrometeorologia, con riferimento allo strato

limite dell'atmosfera più prossimo alla superficie, H può essere espresso in funzione del gradiente termico tra la superficie e lo strato più basso dell'atmosfera:

$$H = \frac{\rho_a c_p}{r_a} \delta T_a \quad (2.6)$$

nella quale ρ_a [kg m^{-3}] è la densità media dell'aria a pressione costante, c_p [$\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$] è il calore specifico dell'aria, r_a [s m^{-1}] è la resistenza aerodinamica, T_a [$^\circ\text{C}$] è la temperatura dell'aria. Sulla base delle equazioni 2.4, 2.5 e 2.6, è quindi possibile stimare l'evapotraspirazione effettiva attraverso l'equazione 2.2.

2.1.1 L'equazione di Penman-Monteith

La modellazione dei flussi energetici basati sull'approccio "big-leaf" prende spunto dalle basi teoriche sviluppate da Penman (1948) per superfici caratterizzate da un'interfaccia umida superficie-atmosfera (specchio liquido).

L'equazione di Penman-Monteith, a cui si perviene risolvendo in maniera semplificata l'equazione generale del bilancio energetico di una generica superficie schematizzata come "big-leaf" e caratterizzata da due termini di resistenza (aerodinamica e superficiale), è data dalla seguente espressione:

$$ET = \frac{\Delta (R_n - G_0) + 86400 c_p \rho_a \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\lambda \Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (2.7)$$

nella quale ET [mm giorno^{-1}] è l'evapotraspirazione da una superficie vegetata, λ [MJ kg^{-1}] è il calore latente di vaporizzazione, Δ [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$] è la pendenza della curva della pressione di vapore saturo, R_n [$\text{MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$] rappresenta il flusso della radiazione netta, G_0 [$\text{MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$] è il flusso di calore dal suolo, $e_s - e_a$ [kPa] è il deficit di pressione di vapore dell'aria, γ [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$] è la costante psicrometrica dell'aria e, infine, r_c e r_a [s m^{-1}] sono rispettivamente la resistenza superficiale e la resistenza aerodinamica.

La stima della resistenza superficiale dipende da vari fattori quali la radiazione solare incidente, il deficit di pressione di vapore ed il contenuto idrico del suolo. In condizioni ottimali di pieno soddisfacimento idrico e per superfici vegetate che ricoprono

uniformemente il suolo, il valore di r_c assume un valore minimo, $r_{c,min}$, che può essere stimato mediante la seguente espressione (Szeicz e Long, 1969; Jensen et al., 1990):

$$r_{c,min} = \frac{r_{foglia,min}}{LAI_{eff}} \quad (2.8)$$

nella quale $r_{foglia,min}$ [$s\ m^{-1}$] rappresenta il valore minimo della resistenza stomatica di una singola foglia, e LAI_{eff} [$m^2\ m^{-2}$] rappresenta quella frazione dell'indice di area fogliare, LAI , che partecipa effettivamente ai processi evapotraspirativi.

La resistenza aerodinamica r_a che compare nelle equazioni 2.6 e 2.7 può essere stimata utilizzando la seguente espressione proposta da Monteith ed Unsworth (1990).

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - h_{veg}}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - h_{veg}}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_h} \quad (2.9)$$

nella quale z_m e z_h [m] rappresentano rispettivamente le altezze di misura della velocità del vento e dell'umidità dell'aria, h_{veg} [m] è l'altezza della coltura, z_{om} [m] e z_{oh} [m] sono i termini che governano il trasferimento della quantità di moto e lo scambio di calore, k [-] è la costante di von Karman, pari a 0.41, mentre u_h [$m\ s^{-1}$] è la velocità del vento misurata ad un'altezza h dal suolo.

Allen et al. (1998) hanno proposto la cosiddetta equazione "FAO 56 Penman-Monteith" che permette di calcolare l'evapotraspirazione di riferimento, ET_0 , espressa in $mm\ giorno^{-1}$, riferita a una coltura "standard". Tale coltura corrisponde ad un prato stabile in condizioni di pieno soddisfacimento idrico e caratterizzato da un'altezza di 0.12 m, una resistenza superficiale, r_c , pari a $70\ s\ m^{-1}$ e un valore costante di albedo, α , pari a 0.23.

Introducendo tali valori nell'equazione 2.7, Allen et al. (1998) hanno ricavato la seguente equazione:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G_0) + \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (2.10)$$

nella quale T_a [$^{\circ}C$] rappresenta la temperatura media dell'aria ed u_2 [$m\ s^{-1}$] è la velocità del vento rilevata ad un'altezza di due metri dal suolo.

Sulla base delle ipotesi fatte, il metodo FAO 56 Penman-Monteith può essere semplicemente applicato utilizzando variabili esclusivamente meteorologiche, rilevate ad un'altezza dal suolo di 2 m.

Nei casi in cui l'equazione 2.10 è utilizzata per stime di ET_0 a scala giornaliera, il flusso G_0 , può considerarsi prossimo a zero.

La definizione di evapotraspirazione di riferimento consente di calcolare il valore di evapotraspirazione massima, ET_m , per una generica coltura in condizione di disponibilità idrica ottimale attraverso l'utilizzo dei coefficienti colturali K_c :

$$ET_m = K_c ET_0 \quad (2.11)$$

Il concetto di coefficiente colturale, K_c , introdotto da Jensen nel 1968, è stato successivamente sviluppato da altri ricercatori (Doorenbos e Pruitt, 1975, 1977; Burman et al., 1980a, Burman et al., 1980b; Allen et al., 1998, Allen e Pereira 2009). Una completa rassegna è stata proposta da Allen et al. (1998) nel quaderno FAO-56, in cui i valori del suddetto coefficiente sono stati tabellati per numerose colture agrarie. In generale il coefficiente K_c aumenta all'aumentare della superficie fogliare traspirante e quindi dall'inizio del ciclo colturale, fino al periodo di massimo sviluppo.

Un approccio che permette la stima della variabilità spaziale e temporale dei coefficienti colturali è quello proposto da D'Urso et al. (1999), sulla base dell'uso congiunto di dati remoti ed informazioni di tipo climatico. Tale approccio si basa in particolare sulla determinazione teorica del K_c dato dal rapporto tra l'evapotraspirazione massima della coltura ET_m , ricavata dalla formulazione di Penman-Monteith, imponendo un valore minimo di resistenza superficiale relativo ad una certa coltura e l'evapotraspirazione della coltura di riferimento, ET_0 , anch'essa calcolata mediante l'approccio di Penman-Monteith. I valori di K_c sono ottenuti sulla base della seguente espressione:

$$K_c = \frac{ET_m}{ET_0} = \frac{\left[\Delta (R_{n,c} - G_0) + c_p \rho_a \frac{(e_s - e_a)}{r_{a,c}} 86400 \right] [\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)]}{\left[0.408 \Delta (R_n - G_0) + \gamma \frac{900}{T_a + 273.3} u_2 (e_s - e_a) \right] \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{c,min}}{r_{a,c}} \right) \right]} \quad (2.12)$$

nella quale $R_{n,c}$ [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$] rappresenta la radiazione solare netta della coltura considerata, $r_{a,c}$ [s m^{-1}] rappresenta la resistenza aerodinamica della coltura considerata e

$r_{c,min}$ [s m⁻¹] rappresenta la resistenza superficiale minima della generica coltura in condizioni di assenza di stress idrico.

Un diverso approccio per la stima dell'evapotraspirazione effettiva consiste nel ricavare sperimentalmente o per via teorica valori rappresentativi del parametro r_c che compare nell'equazione di Penman-Monteith, PM, (equazione 2.7). In particolare, nel caso di disponibilità di misure dirette di evapotraspirazione effettiva, il termine r_c può essere esplicitato dalla stessa equazione 2.7:

$$r_c = r_a \left\{ \left[\left(\frac{\Delta (R_n - G_0) + c_p \rho_a \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{ET_e \lambda} - \Delta \right) \frac{1}{\gamma} \right] - 1 \right\} \quad (2.13)$$

La conoscenza dei valori sperimentali di r_c può consentire l'identificazione di relazioni semplificate con altre variabili agro-meteorologiche facilmente ottenibili, in modo da permettere, in ambienti analoghi dal punto di vista climatico, la stima indiretta dell'evapotraspirazione effettiva.

2.2 Modellazione dei flussi idrici nel sistema SPA

Il bilancio idrico di massa nel sistema SPA viene solitamente applicato sulla base di due principali tipologie di modellizzazione: una, più completa e a base fisica, in cui si applicano le equazioni del moto dell'acqua nei sistemi insaturi, e un'altra, di tipo semplificato, nel quale il sistema è assimilato ad un semplice serbatoio.

Nel primo caso gli scambi idrici nell'interfaccia suolo-pianta vengono in genere dedotti risolvendo le equazioni di Richards (Richards, 1931, Celia et al., 1990) sia in forma monodimensionale che tridimensionale e utilizzando modelli semplificati per la stima dell'attingimento radicale. Seguono questa impostazione i modelli agro-idrologici HYDRUS (Simunek et al., 1999, Simunek et al., 2011) e SWAP (van Dam et al., 1997). Seguendo questa impostazione è possibile simulare in termini differenziali le componenti del bilancio idrico ed in particolare la variazione della disponibilità idrica del suolo, ΔW , in un intervallo di tempo, Δt :

$$\Delta W = \int_0^z [\theta(z, t + \Delta t) - \theta(z, t)] dz \quad (2.14)$$

in cui $\theta_{(z,t)}$ rappresenta il contenuto idrico alla profondità z e al tempo t .

La stesura di un bilancio idrologico comporta ovviamente la conoscenza dell'andamento temporale delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione di riferimento, oltre che l'identificazione delle condizioni al contorno inferiore e superiore nel corso della simulazione. Nel caso di flussi idrici monodimensionali, l'equazione generale del bilancio riferita ad un intervallo di tempo Δt si può scrivere nella seguente forma:

$$(P \pm DP - E_e - T_e) = \Delta h_{pond} + \int_0^z [\theta(z, t + \Delta t) - \theta(z, t)] dz \quad (2.15)$$

in cui P [mm] è la precipitazione, DP [mm] è il flusso attraverso il contorno inferiore, E_e [mm] è l'evaporazione effettiva dal suolo, T_e [mm] è la traspirazione effettiva e h_{pond} [mm] è l'altezza di ponding superficiale.

Con riferimento all'impostazione di tipo semplificato invece, il suolo è schematizzato come un serbatoio di capacità massima, TAW , definita "capacità idrica utilizzabile". Inoltre sono trascurati i processi di attingimento radicale e si usano formulazioni semplificate per la stima della traspirazione effettiva della pianta, T_e , e dell'evaporazione effettiva dal suolo, E_e . In questa impostazione i termini del bilancio idrico sono considerati come semplici flussi che entrano ed escono del serbatoio nell'intervallo di tempo considerato e pertanto l'equazione di bilancio può essere scritta nella seguente forma:

$$\Delta W = (P_e + I_e - T_e - E_e \pm DP) \quad (2.16)$$

nella quale si indica con ΔW [mm] la variazione del contenuto d'acqua nel volume di suolo occupato dalle radici, con P_e [mm] l'aliquota di pioggia che si infila nel suolo (pioggia efficace), con I_e [mm] l'acqua fornita con l'irrigazione che si infila nel suolo (irrigazione efficace), con E_e [mm] l'evaporazione effettiva dal suolo, con T_e [mm] la traspirazione effettiva della coltura e con DP [mm] il flusso idrico (percolazione profonda o apporto di falda) che attraversa il limite inferiore del volume considerato.

2.2.1 Il modello HYDRUS-2D

Il modello HYDRUS-2D (Simunek et al., 1999) permette di simulare il movimento dell'acqua, la conduzione del calore ed il trasporto dei soluti nei mezzi porosi saturi e insaturi. Nella modellazione del flusso idrico nel suolo il modello è in grado anche di simulare l'attingimento idrico radicale.

Il modello considera il flusso "Darciano" bidirezionale isotermico dell'acqua, in un mezzo poroso rigido e insaturo. Su queste ipotesi il movimento dell'acqua viene simulato attraverso la risoluzione numerica dell'equazione di Richards modificata utilizzando un schema a elementi finiti bidimensionale:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ins} \left(K_{ij}^A \frac{\partial \psi_s}{\partial x_j} K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (2.17)$$

nella quale θ [cm³ cm⁻³] è il contenuto idrico volumetrico del suolo, ψ_s [cm] è il potenziale matriciale, S [s⁻¹] è il termine di attingimento idrico radicale (sink term), x_i [cm] sono le coordinate spaziali (i=1,2), t [s] è il tempo, K_{ij}^A [-] sono i termini di un tensore di anisotropia adimensionale K^A , e K_{ins} [cm s⁻¹] è la funzione di conducibilità idraulica insatura data da:

$$K_{ins}(h, x, z) = K_{sat}(x, z) K_{rel}(h, x, z) \quad (2.18)$$

nella quale K_{rel} [cm s⁻¹] è la conducibilità idraulica relativa e K_{sat} [cm s⁻¹] è la conducibilità idraulica satura del terreno. Il tensore K_{ij}^A dell'equazione 2.17 è utilizzato in mezzi anisotropi. Per mezzi isotropi invece, la diagonale principale del tensore K_{ij}^A è costituita da termini pari a uno, mentre tutti gli altri termini risultano pari a zero.

Il termine di attingimento idrico radicale (sink term), S , che compare nell'equazione 2.17 rappresenta il volume idrico estratto dalla pianta, da un volume di suolo unitario, nell'unità di tempo.

Non considerando gli effetti dovuti allo stress osmotico, Feddes et al. (1978) hanno definito il termine S come:

$$S(h) = K_s(\psi) S_m \quad (2.19)$$

nella quale la funzione di risposta allo stress idrico $K_s(\psi)$ [-] è una funzione adimensionale del potenziale matriciale ($0 \leq K_s(\psi) \leq 1$), e S_m [s^{-1}] rappresenta l'attingimento idrico massimo (figura 2.1). Come si può notare, l'attingimento idrico è assunto pari a zero quando il terreno è prossimo alla saturazione (punto di anaerobiosi, ψ_1) come pure, per $\psi < \psi_4$ (punto di appassimento permanente). Per valori del potenziale matriciale del terreno compresi tra ψ_2 e ψ_3 l'attingimento viene assunto pari al massimo ($K_s=1$), mentre per valori compresi tra ψ_3 e ψ_4 l'attingimento si riduce linearmente al diminuire del potenziale matriciale.

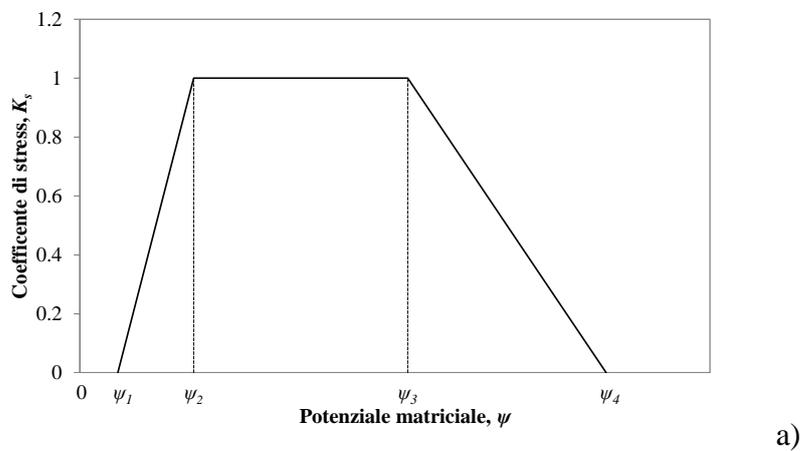


Figura 2.1 - Funzione di risposta allo stress idrico (Feddes et al., 1978)

Per descrivere la funzione di risposta allo stress idrico, van Genuchten (1987) ha proposto una funzione di tipo sigmoideale (figura 2.2), rappresentata dalla seguente equazione:

$$K_s(\psi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{\psi_{50}}\right)^{P_3}} \quad (2.20)$$

nella quale si è indicato con ψ_{50} [cm] il valore di potenziale matriciale in corrispondenza del quale l'assorbimento radicale si riduce del 50% in condizioni di stress osmotico trascurabile e P_3 [-] è un parametro sperimentale.

Differentemente dalla formulazione di Feddes et al. (1978), il modello proposto da van Genuchten non considera la riduzione di traspirazione che si determina quando il terreno è in condizioni di contenuto idrico prossimo alla saturazione. Tale ipotesi risulta verosimile

quando le condizioni prossime alla saturazione si verificano per periodi relativamente brevi.

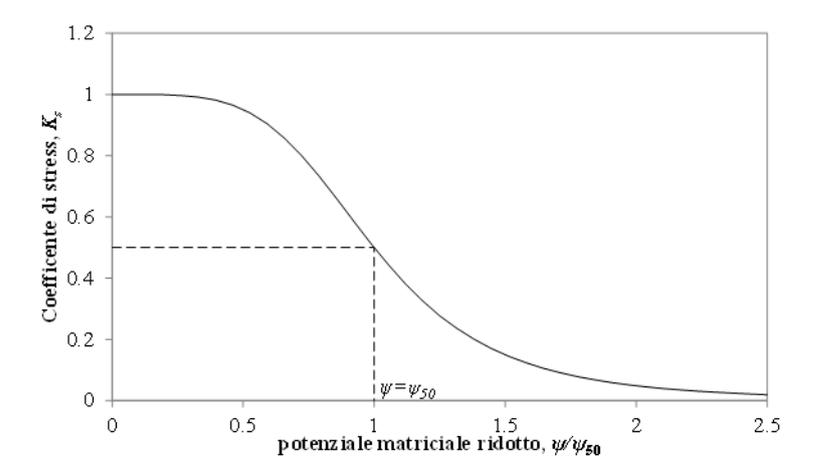


Figura 2.2 - Funzione di risposta allo stress idrico del tipo sigmoideale (van Genuchten, 1987)

Nei casi in cui il massimo attingimento idrico si manifesta secondo uno schema di moto bidimensionale, il termine di attingimento radicale massimo, S_m , può essere calcolato come:

$$S_m = \frac{1}{L_x L_z} L_t T_m \quad (2.21)$$

nella quale T_m [cm s^{-1}] è la traspirazione massima, L_x ed L_z [cm] rappresentano la larghezza e la profondità dell'apparato radicale, mentre L_t [cm] è la larghezza della superficie del suolo associata al processo traspirativo. Nei casi in cui risulta $L_x=L_t$, il termine S_m risulta pari a T_m/L_z .

L'equazione 2.21 può essere generalizzata introducendo una distribuzione disuniforme dell'attingimento idrico massimo in una zona radicale di arbitraria forma (Vogel, 1987):

$$S_m = b(x, z) L_t T_m \quad (2.22)$$

nella quale $b(x, z)$ è la distribuzione normalizzata dell'attingimento radicale [cm^{-2}]. Questa funzione descrive la variazione spaziale dell'attingimento massimo S_m nella zona radicale (figura 2.3) ed è ottenuta sulla base della funzione di distribuzione radicale $b'(x, z)$ e del volume di suolo, Ω_R , occupato dalle radici:

$$b(x, z) = \frac{b'(x, z)}{\int_{\Omega_R} b'(x, z) d\Omega} \quad (2.23)$$

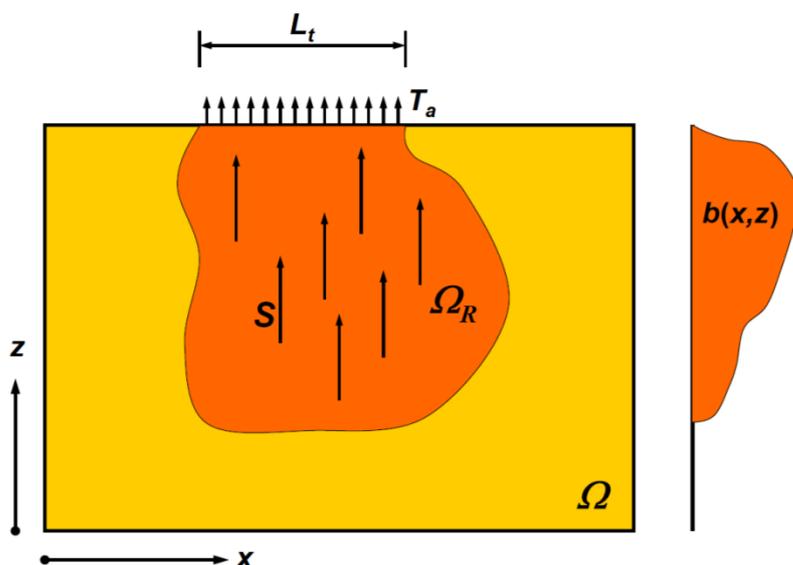


Figura 2.3 - Distribuzione schematica dell'attingimento idrico potenziale, $b(x,z)$ nella zona radicale (da Simunek et al., 2011)

La normalizzazione della funzione di attingimento radicale fa sì che l'integrale della funzione $b(x,z)$ sull'intero dominio di moto risulti pari all'unità.

$$\int_{\Omega_R} b(x, z) d\Omega = 1 \quad (2.24)$$

Risolvendo il sistema costituito dalle equazioni 2.18 e 2.20 ed esplicitando per T_m , si ottiene:

$$\frac{1}{L_t} \int_{\Omega_R} S_m d\Omega = T_m \quad (2.25)$$

La distribuzione dell'attingimento radicale effettivo può essere ottenuta sostituendo l'equazione 2.18 nella 2.15:

$$S(h, x, z) = K_s(\psi, x, z) b(x, z) L_t T_m \quad (2.26)$$

Pertanto, la traspirazione effettiva, T_e , risulta dall'integrazione della 2.24:

$$T_e = \frac{1}{L_t} \int_{\Omega_R} S d\Omega = T_m \int_{\Omega_R} K_s(\psi, x, z) b(x, z) d\Omega \quad (2.27)$$

Nel modello HYDRUS-2D, la funzione di distribuzione spaziale dell'apparato radicale è schematizzata mediante il modello proposto da Vrugt et al. (2001):

$$\beta(x, z) = \left[\left(1 - \frac{z}{Z_m} \right) \right] \left[\left(1 - \frac{x}{X_m} \right) \right] e^{-\left(\frac{p_z}{Z_m} |z^* - z| + \frac{p_x}{X_m} |x^* - x| \right)} \quad (2.29)$$

nella quale Z_m e X_m [cm] rappresentano rispettivamente la massima profondità e la massima estensione dell'apparato radicale, mentre p_z [-], p_x [-], x^* [cm] e z^* [cm] sono parametri empirici. I valori di p_z , e p_r assumono un valore pari ad uno rispettivamente per $z > z^*$ e $x^* > x$.

2.2.2 Il modello FAO-56

Nel modello FAO-56 (Allen et al., 1998), il volume di suolo nel quale si verificano i processi di attingimento radicale viene schematizzato da un serbatoio, la cui capacità dipende dalla profondità dell'apparato radicale della coltura e dalle caratteristiche idrauliche del suolo (figura 2.4). In particolare, la variazione nel tempo dell'acqua disponibile nel volume di suolo interessato dall'apparato radicale è simulata attraverso una funzione di esaurimento.

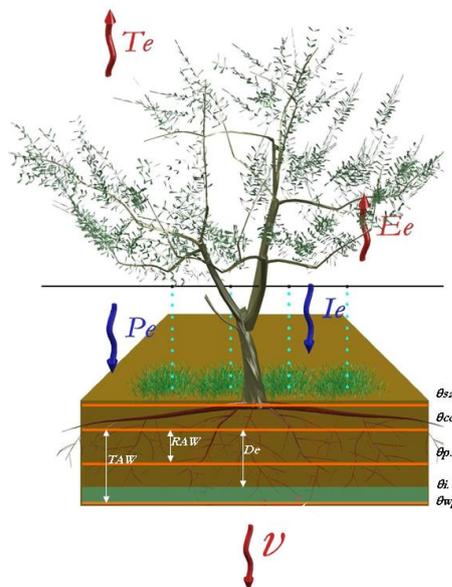


Figura 2.4 - Schematizzazione del sistema continuo Suolo Pianta Atmosfera nel modello FAO-56 (Rallo, 2010)

Tutti i flussi in entrata ed uscita dal serbatoio sono riferiti ad una superficie unitaria e vengono espressi in mm; la scala temporale di simulazione è in generale quella giornaliera. La variazione dell'acqua disponibile, espressa in termini di deplezione nel giorno i -esimo, $D_{r,i}$ [mm] viene descritta dalla seguente equazione:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i + RO_i - I_i - CR_i + ET_{e,i} + DP_i \quad (2.30)$$

nella quale si è indicato con $D_{r,i}$ e $D_{r,i-1}$ [mm] l'entità della deplezione riferita al giorno i -esimo ed al precedente, con P_i [mm] l'altezza di precipitazione, con RO_i [mm] il deflusso superficiale, con $I_{e,i}$ [mm] l'irrigazione efficace, cioè la quantità di acqua che a seguito di un intervento irriguo si infiltra nel suolo, con CR_i [mm] l'apporto idrico per risalita capillare da falda sotterranea, con $ET_{e,i}$ [mm] l'evapotraspirazione effettiva della coltura e infine con DP_i [mm] la perdita di acqua per percolazione.

Il dominio della funzione di deplezione è compreso tra zero, quando il suolo presenta un contenuto idrico corrispondente alla capacità di campo, ed un valore massimo che corrisponde all'acqua totale disponibile, TAW , dato dalla seguente relazione:

$$TAW = 1000(\theta_{cc} - \theta_{pa})z_r \quad (2.31)$$

avendo indicato con θ_{cc} [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] il contenuto idrico alla capacità di campo, con θ_{pa} [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] il contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento e con z_r [m] la profondità delle radici.

La componente traspirativa massima, T_m , di una coltura viene calcolata come una frazione, K_{cb} , della evapotraspirazione ET_0 della coltura di riferimento in condizioni standard:

$$T_m = K_{cb} ET_0 \quad (2.32)$$

Nella documentazione ufficiale del modello FAO-56 (Allen et al., 1998), il valore del coefficiente colturale basale, K_{cb} , è stato proposto per le diverse fasi vegetative di numerose colture di interesse agrario. I valori proposti sono in generale riferiti ad ambienti sub-umidi caratterizzati, nel periodo di crescita della coltura, da un minimo giornaliero di umidità relativa dell'aria, RH_{min} , del 45% e da una velocità del vento a due metri dal suolo, u_2 , pari a 2 m s^{-1} . Pertanto, qualora si operi in ambienti diversi da quello di riferimento, si deve eseguire una correzione dei valori di K_{cb} tabulati, mediante la seguente espressione:

$$K_{cb} = K_{cb(tab)} + [0.04 (u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h_{veg}}{3} \right)^{0.3} \quad (2.33)$$

nella quale $K_{cb(tab)}$ [-] rappresenta il coefficiente basale tabulato, u_2 [$m\ s^{-1}$] la velocità del vento a 2 metri dal suolo, RH_{min} [%] il valore medio dell'umidità minima relativa dell'aria durante il periodo di crescita ed h_{veg} [m] l'altezza della coltura. I valori del coefficiente K_{cb} variano nel corso del ciclo vegeto-produttivo della coltura considerata, poiché durante tale ciclo si modificano le condizioni di copertura del suolo, l'altezza della pianta e l'estensione dell'area fogliare.

Il ciclo vegetativo di una generica coltura viene in generale suddiviso in quattro periodi, ognuno di ampiezza variabile in funzione delle specie (figura 2.5).

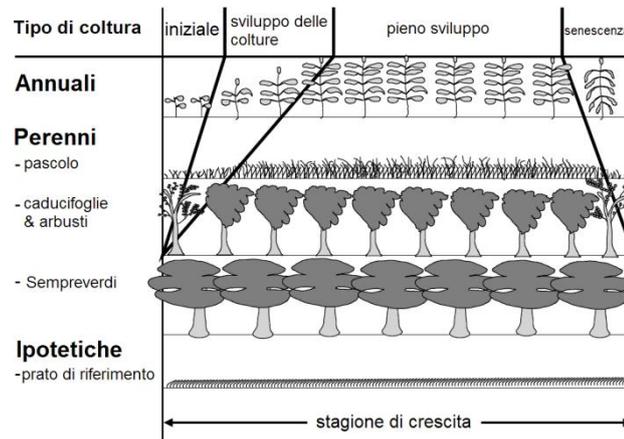


Figura 2.5 - Ciclo vegeto-produttivo dei diversi tipi di colture e schematizzazione delle fasi di sviluppo (da Allen et al., 1998)

Nel periodo iniziale, quando la copertura vegetale è minore o uguale al 10% della superficie del suolo, la componente evaporativa prevale su quella traspirativa ed il valore di K_{cb} è modesto. Nel periodo di sviluppo della coltura aumenta la copertura del suolo, l'evaporazione diminuisce, la traspirazione tende a diventare la componente predominante del processo evapotraspirativo e, pertanto, il valore di K_{cb} cresce. Nel periodo intermedio, K_{cb} raggiunge il suo valore massimo, per diminuire progressivamente nella fase finale, a maturazione avvenuta. Attraverso l'identificazione della durata delle singole fasi di sviluppo della coltura è possibile costruire l'andamento di K_{cb} . Di conseguenza sulla base delle informazioni suggerite dalla FAO riguardo i valori dei K_{cb} e le durate delle singole fasi del ciclo di sviluppo per ogni specie di interesse agrario, è possibile, attraverso un

processo di linearizzazione, costruire dei diagrammi dove vengono riportati gli andamenti temporali dei coefficienti di consumo traspirativi K_{cb} . Tale procedura può essere tradotta matematicamente dall'equazione:

$$K_{cb,i} = K_{cb_prev} + \left[\frac{N_j - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cb_next} - K_{cb_prev}) \quad (2.34)$$

nella quale $K_{cb,i}$ [-] rappresenta il coefficiente colturale di base al giorno i-esimo, K_{cb_prev} e K_{cb_next} [-] sono i valori dei coefficienti relativi corrispondenti rispettivamente agli stadi precedente e successivo rispetto a quello considerato, N_j [giorni] rappresenta il numero di giorni trascorsi dal periodo iniziale, $\sum(L_{prev})$ [giorni] è la sommatoria delle durate di tutti gli stadi precedenti a quello considerato e L_{stage} [giorni], la durata dello stadio di sviluppo considerato. La figura 2.6 riporta l'andamento temporale tipico dei valori dei coefficienti colturali, K_c .

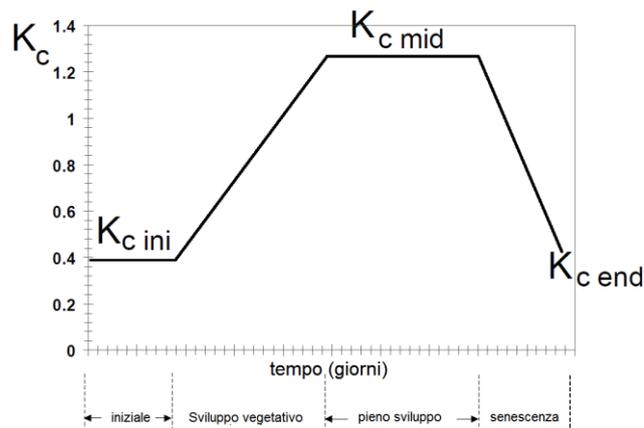


Figura 2.6 - Andamento temporale tipico dei coefficienti colturali (FAO, 1998)

Per esprimere la dipendenza della traspirazione dal contenuto idrico del suolo, il modello FAO-56 utilizza un coefficiente di stress idrico, K_s , il cui valore varia linearmente da zero a uno in funzione del contenuto idrico. La traspirazione effettiva, T_e , si ottiene semplicemente come prodotto tra la traspirazione massima, T_m , e il coefficiente di stress idrico, K_s :

$$T_e = K_s T_m \quad (2.35)$$

Il legame tra K_s ed il contenuto idrico θ del terreno è spesso considerato lineare, come mostrato in figura 2.7, nella quale è pure indicata la relazione tra i valori di K_s e quelli del potenziale matriciale ψ ottenuti considerando la curva di ritenzione idrica del suolo.

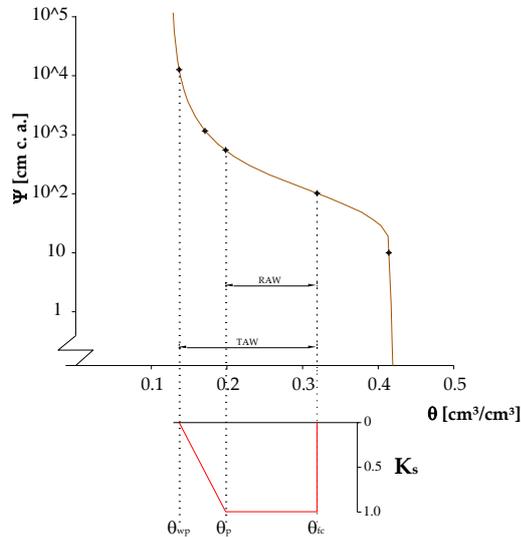


Figura 2.7 - Coefficiente di riduzione della traspirazione dovuto allo stress idrico, K_s , in funzione del contenuto idrico e/o del potenziale matriciale del suolo (da Rallo, 2010)

Numericamente, il calcolo del coefficiente di stress, K_s , richiede la definizione del cosiddetto fattore di deplezione, p , ovvero la frazione dell'acqua disponibile totale (TAW) che la pianta può assorbire prima che riduca i consumi traspirativi come conseguenza dei fenomeni di stress idrico:

$$K_s = \frac{TAW - D_i}{(1 - p)TAW} \quad (2.36)$$

nella quale D_i [mm] indica l'ammontare della deplezione al giorno i -esimo. Il parametro p , tabulato nel quaderno FAO 56, è specifico della coltura considerata e può essere ottenuto empiricamente, osservando la dipendenza degli indici di stress dal contenuto idrico relativo del suolo. Per esempio, considerando come indice di stress il rapporto tra la traspirazione reale e quella massima, il valore di umidità, θ_p , al di sotto del quale tale rapporto risulta inferiore all'unità, rappresenta quel contenuto idrico di riferimento che consente di valutare il fattore di deplezione p . In realtà, la capacità delle radici di estrarre acqua dal terreno non dipende solo dal contenuto di umidità, ma anche dall'energia potenziale posseduta dall'acqua presente nel suolo e quindi, in ultima analisi, dalle caratteristiche fisiche del

suolo. Per tenere conto di tale circostanza, nel quaderno FAO 56 viene suggerito di ridurre tali coefficienti per i suoli con tessitura fine, e maggiorarli per quelli a tessitura grossolana. Un'altra correzione che è possibile eseguire sul fattore p è quella relativa alle diverse condizioni di domanda atmosferica che si verificano in ambienti diversi rispetto a quelli dove sono stati ottenuti i valori di riferimento. La FAO suggerisce in tal caso relazioni di tipo lineari che legano il fattore p all'evapotraspirazione massima della coltura, oltre che al valore tabellare, p_{tab} .

$$p = p_{tab} + 0.04 (5 - ET_m) \quad (2.37)$$

Recentemente con riferimento alla coltura dell'olivo, Rallo et al., (2014), hanno proposto di modificare la funzione di stress implementata nel modello FAO-56, in modo da tenere in conto della resistenza della coltura alle condizioni di deficit idrico del suolo. L'andamento del coefficiente di stress K_s in funzione della deplezione relativa è stato schematizzato mediante una funzione convessa, caratteristica delle piante xerofile (figura 2.8).

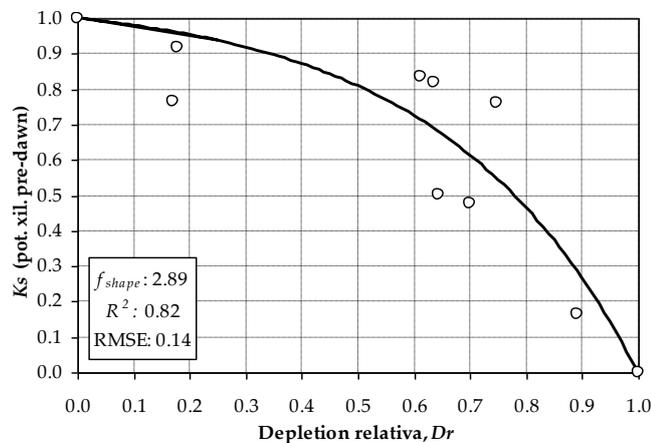


Figura 2.8 - Schematizzazione della funzione di stress per la coltura dell'olivo (da Rallo et al., 2014)

In tale schematizzazione lo stato idrico del suolo viene espresso in termini di deplezione relativa, D_{rel} , ottenuta normalizzando i valori di deplezione rispetto ad un massimo, corrispondente ad un valore della riserva idrica (p_{low} , TAW) e un minimo, per il quale la riserva idrica vale (p_{upper} , TAW). Il coefficiente di deplezione, p_{low} , che individua lo zero della deplezione relativa e che segna il passaggio alla condizione di stress idrico dell'olivo, viene calcolato a partire da un valore di contenuto idrico critico θ_p ($\theta_p = 0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

individuato con l'ausilio di dati sperimentali (Rallo e Provenzano, 2013). Il coefficiente di deplezione, p_{upper} , individua la massima condizione di stress che non coincide necessariamente con il valore di contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento. In particolare, il limite inferiore del contenuto idrico del suolo θ_{min} corrispondente alla condizione di stress massimo, tiene conto dell'abilità della pianta ad estrarre acqua dal suolo (Ratliff et al., 1983), la quale può essere limitata, oltre che da una risposta fisiologica, anche da una bassa densità radicale (Lacape et al., 1998). Tale valore di solito corrisponde a un potenziale matriciale del terreno superiore a quello solitamente assunto per valutare il punto di appassimento, poiché, al di sotto di una certa profondità, la densità delle radici diviene il fattore limitante per l'estrazione dell'acqua dal suolo (Pellegrino et al., 2004). Al contrario, in certi casi, tale valore può risultare inferiore al punto di appassimento, soprattutto negli strati superficiali come conseguenza della perdita di acqua per evaporazione (Pellegrino et al., 2004). Per la sua determinazione in campo si considera il minimo contenuto idrico del suolo misurato ad ogni profondità durante la stagione di crescita colturale così come suggerito da Pellegrino et al., (2006).

Dal punto di vista analitico, il tratto della funzione che descrive la condizione di stress è del tipo:

$$K_s = 1 - \frac{e^{D_{rel} f_{s-shape}} - 1}{e^{f_{s-shape}} - 1} \quad (2.38)$$

nella quale $f_{s-shape}$ è un parametro di forma che stabilisce la concavità ($f_{s-shape} < 0$), la convessità ($f_{s-shape} > 0$) o la linearità ($f_{s-shape} = 0$) della funzione di stress della coltura.

Data la natura empirica dei parametri richiesti dai modelli esaminati, risulta necessaria la loro calibrazione sito-specifica in modo da tener conto, oltre che del tipo di pianta, anche delle condizioni climatiche e pedologiche dell'ambiente in cui si opera.

La componente di evaporazione massima, E_m , viene calcolata moltiplicando il coefficiente evaporativo K_e (determinato in funzione delle condizioni di umidità del suolo) all'evapotraspirazione di riferimento ET_0 :

$$E_m = K_e ET_0 \quad (2.39)$$

Il calcolo del coefficiente K_e può essere effettuato ricercando il minimo delle due seguenti espressioni:

$$K_e = \min\{K_r(K_{c_max} - K_{cb}); f_{ew}K_{c_max}\} \quad (2.40)$$

Tralasciando la procedura di calcolo, piuttosto articolata e laboriosa, viene riportata soltanto una breve descrizione dei termini che compaiono nell'equazione 2.37. Il termine K_r [-] è un coefficiente adimensionale di riduzione, K_{c_max} [-] è il valore massimo della somma $K_{cb}+K_e$ che normalmente segue una pioggia o un adacquamento, che si assume pari a 1 nei periodi immediatamente successivi ad una pioggia o a un intervento irriguo e decresce fino a zero quando il suolo è secco, K_{cb} [-] rappresenta il coefficiente colturale basale ed infine f_{ew} [-] è la frazione di suolo bagnata e non coperta dalla vegetazione, dalla quale proviene la maggior parte dell'evaporazione.

L'uso del modello FAO nella gestione dell'irrigazione (scheduling) richiede in fase preliminare l'impostazione sia del valore del contenuto idrico medio del suolo che identifica il momento di intervento irriguo, che il volume idrico da fornire nel corso di ciascun adacquamento. Il momento d'intervento irriguo viene individuato fissando dei valori soglia relativi ad un parametro denominato MAD (Management Allowed Depletion, Merriam, 1966). Il MAD, dal punto di vista computazionale simile al fattore di deplezione p , indica la frazione massima dell'acqua disponibile totale che può essere estratta dal suolo, prima che venga suggerito di irrigare:

$$MAD = \frac{(\theta_{cc} - \theta_{lim})}{\theta_{cc} - \theta_{pa}} \quad (2.41)$$

nella quale θ_{lim} [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$] rappresenta il valore del contenuto idrico del suolo in corrispondenza del quale occorre procedere con l'irrigazione. I valori del parametro MAD dipendono quindi, oltre che dalle costanti idrologiche del suolo, θ_{cc} e θ_{pa} , anche da un valore limite inferiore assunto quale soglia inferiore del contenuto idrico medio del suolo, θ_{lim} . Tale contenuto idrico limite assume valore diverso o uguale al valore critico θ_p , in funzione del tipo di gestione dell'irrigazione che si vuole effettuare. In particolare, nel caso in cui $\theta_{lim} \geq \theta_p$ l'irrigazione consente il mantenimento di un ecosistema umido e la totale assenza di stress idrico, mentre se $\theta_{lim} < \theta_p$ l'irrigazione è gestita in condizioni di prevalente stress idrico. Pertanto è possibile impostare un valore $\theta_{lim} > \theta_p$, quando ci si trova a gestire

l'irrigazione in contesti dove vigono vincoli ambientali, ad esempio quello di mantenere un'area naturale umida, $\theta_{lim}=\theta_p$ quando si vuole intervenire con l'adacquamento prima che la pianta entri nella fase di stress e $\theta_{lim}<\theta_p$ quando l'irrigazione viene gestita in regime di stress idrico, sia esso controllato o meno. Quest'ultima condizione rientra nei casi più frequenti di gestione irrigua delle colture arboree in ambiente mediterraneo, soprattutto in quei contesti nei quali il momento di intervento irriguo è fissato attraverso una semplice analisi visiva dei primi sintomi di stress della pianta. Il *MAD* pertanto include un significato di tipo economico-gestionale molto variabile da zona a zona, e dipendente principalmente dal tipo di risultato produttivo che l'agricoltore vuole conseguire, nonché da fattori logistici quali la quantità e la disponibilità di acqua nell'intera stagione irrigua. L'algoritmo proposto nel quaderno FAO-56 consente di programmare l'irrigazione prima che la pianta entri nella fase di stress ($\theta_{lim}=\theta_p$). Tale ipotesi non è adatta all'ambiente mediterraneo, per il quale si verificano frequentemente condizioni di carenza idrica, che inducono le colture a condizioni di stress idrico. Riguardo la quantità d'acqua da somministrare ad ogni irrigazione, è possibile scegliere tra due opzioni, a seconda se si vuole riportare l'umidità del suolo alla capacità di campo, oppure intervenire con un prestabilito volume di adacquamento.

3. Tecniche di monitoraggio dei processi di scambio idrico ed energetico nel sistema SPA

3.1 Misure e monitoraggio a scala locale

La misura dei flussi traspirativi di una pianta può essere indirettamente effettuata monitorando talune grandezze correlate al flusso linfatico. Tali tecniche permettono la stima dei flussi idrici della pianta senza perturbarne l'equilibrio (Jones, 2004). La misura dei flussi linfatici è strettamente correlata all'attività traspirativa della pianta e, conseguentemente, alla conduttanza stomatica.

Il flusso di linfa nei vasi capillari del fusto di una pianta può essere generalmente misurato secondo tre diversi approcci basati rispettivamente sul bilancio termico, sulla velocità degli impulsi di calore e sulla dissipazione termica (Smith et al., 1996).

Il primo metodo si basa sul bilancio dei flussi di calore misurati in una sezione di tronco continuamente riscaldata ed isolata termicamente. Il sistema è costituito da un riscaldatore flessibile largo pochi centimetri che è avvolto attorno al tronco e rivestito da uno strato di sughero, uno di schiuma ed uno di alluminio (figura 3.1). Nel rivestimento di sughero sono incluse due termocoppie che consentono di misurare il gradiente di temperatura radiale tra la parte interna ed esterna del riscaldatore e due termocoppie idonee a misurare il gradiente di temperatura assiale lungo la parte del tronco al di sotto e sopra la sezione riscaldata (Sakuratani, 1984, Smith et al., 1996). L'applicazione dell'equazione di bilancio termico permette quindi di determinare i flussi linfatici, in quanto questi tendono a dissipare calore per convezione.

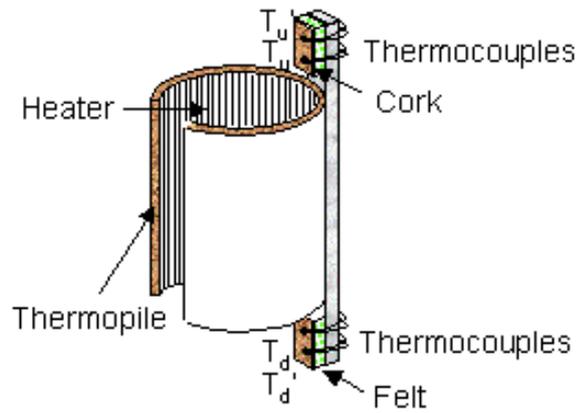


Figura 3.1 - Schematizzazione del bilancio termico per la stima dei flussi linfatici (da Sakuratani, 1984)

Il metodo basato sulla velocità dell'impulso di calore compensato (CHPV), proposto da Marshall (1958), si basa sulla misura della velocità ideale di un impulso di calore della durata di 1-2 secondi rilasciato nel flusso linfatico da parte di un riscaldatore lineare. La velocità è calcolata attraverso la misura del tempo necessario affinché gli aghi di una termocoppia, installata a monte ed a valle rispetto ad un elemento riscaldatore, raggiungano la stessa temperatura (figura3.2). Quattro coppie di sensori termici sono generalmente installate in corrispondenza di ciascun quarto di tronco, in modo da ricostruire in dettaglio i profili di flusso linfatico.

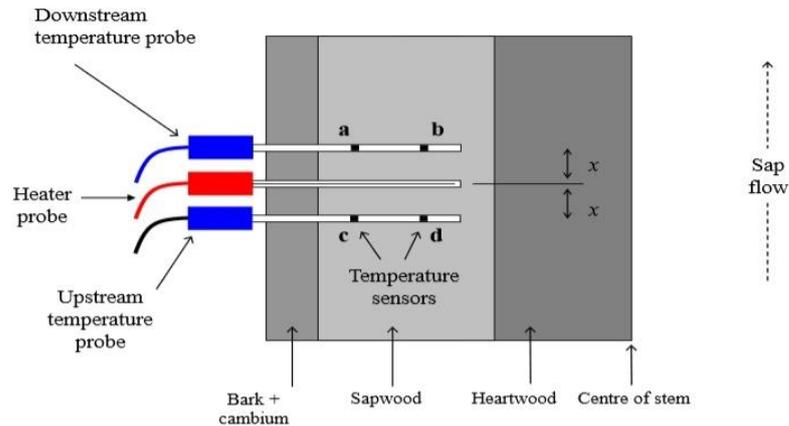


Figura 3.2 - Schematizzazione del sistema CHPV (<http://www.ictinternational.com/casestudies/sfm1-sap-flow-and-small-stems/>)

La velocità, corretta attraverso dei coefficienti empirici determinati da Green e Chlotier (1988) è quindi trasformata, sulla base di parametri dendrometrici, in densità di flusso di linfa e quest'ultima integrata sull'area conduttiva per ottenere la portata oraria del flusso

linfatico. Maggiori dettagli sul sistema CHPV sono riportati da Green e Chlotier (1988), Fernandez et al. (2001), Giorio e Fragnito (2002) e Giorio et al. (2002).

Il metodo basato sulla dissipazione termica (TDP) proposto da Granier (1985) utilizza sensori, costituiti da una coppia di aghi, ciascuno contenente una termocoppia, avvolti con un rivestimento resistivo, come schematizzato in figura 3.3.

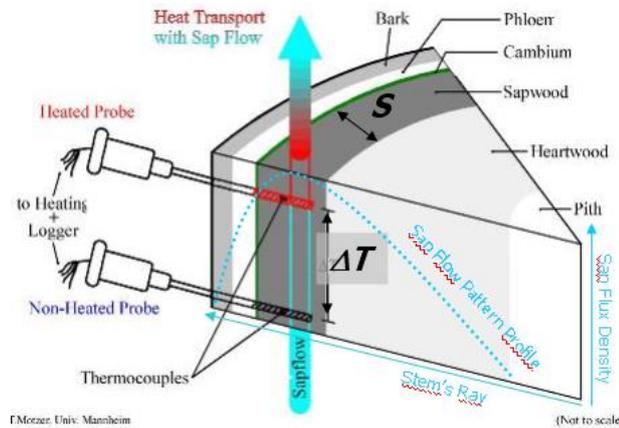


Figura 3.3 - Schematizzazione del sistema di Granier per la misura del flusso di linfa

La differenza di temperatura, ΔT , che si genera tra il sensore superiore (costantemente riscaldato) e quello inferiore (che registra la temperatura del legno) rappresenta un indice dell'attività traspirativa della pianta, espressa come densità di flusso, V [$\text{ml cm}^{-2} \text{min}^{-1}$], secondo l'equazione (Granier, 1987):

$$V = 0.714 \left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T} - 1 \right)^{1.231} \quad (3.1)$$

nella quale ΔT_{max} [$^{\circ}\text{C}$] rappresenta il valore massimo giornaliero raggiunto dal differenziale termico, coincidente con la condizione di assenza di flusso. La determinazione del termine ΔT_{max} risulta aleatoria in virtù della sua variabilità conseguente alle modificazioni delle proprietà fisiche della matrice in cui il flusso si propaga. Solitamente la condizione di assenza di flusso è raggiunta durante le ore notturne. Tuttavia alcuni studi hanno messo in evidenza come anche durante le ore notturne esiste una certa attività traspirativa, come conseguenza dei processi di redistribuzione (Sakuratani et al., 1999; Burgess et al., 2000) e di immagazzinamento dell'acqua all'interno degli organi della pianta (Lu et al., 1995; Goldstein et al., 1998). Questa attività traspirativa notturna è ampiamente diffusa in molte

specie e la quantità di acqua persa può variare dal 5 al 30% dell'ammontare giornaliero (Snyder et al., 2003; Ford et al., 2004; Ludwig et al., 2006). La necessità di determinare il valore di ΔT_{max} ad ogni applicazione nasce anche in relazione alla forte dipendenza con il cosiddetto effetto di contatto sonda-legno, dipendente a sua volta sia dalle caratteristiche strutturali della sonda che da proprietà del legno quali la conduttività termica, influenzata dal contenuto idrico. Molti autori si sono dedicati alla messa a punto di procedure per la determinazione della condizione di assenza di flusso. Green et al. (2003) hanno proposto di identificare tale condizione attraverso la media dei valori misurati subito prima dell'alba, durante un intervallo di sette giorni. Lu et al. (2004) propongono invece di individuare tale condizione attraverso l'analisi di regressione effettuata su una serie di dati di ΔT_{max} misurata durante un periodo di 10 giorni.

I flussi traspirativi istantanei della pianta, Q_r [ml min^{-1}], si ottengono moltiplicando la densità di flusso, V , per la superficie conduttiva S_c [cm^2], che è funzione dello spessore del sapwood e del diametro del fusto della pianta.



Figura 3.4 - Metodo diretto per la misura dello spessore del sapwood

Essa può essere determinata in diversi modi: un metodo diretto ampiamente usato, consiste nell'analizzare per via colorimetrica una carota di legno estratta dal tronco con l'ausilio del succhiello di Pressler (figura 3.4). La misura dello spessore del sapwood è quindi effettuata mediante un calibro. I flussi traspirativi, T_e [mm giorno^{-1}], si ottengono integrando a scala giornaliera i flussi istantanei e tenendo conto dell'area di interesse della pianta, A .

La strumentazione per il monitoraggio dello stato idrico del suolo è disponibile da qualche tempo, ma lo sviluppo recente della sensoristica in generale, ha consentito la proposizione di nuove metodologie e protocolli che rendono le misure più semplici e meno costose. I più moderni sensori di misura hanno il vantaggio della continuità di acquisizione, della possibilità di automatizzare le misure ed elaborare i dati, nonché di realizzare reti di monitoraggio per la misura su ampie scale territoriali.

La determinazione del contenuto d'acqua del suolo può essere eseguita mediante la misura di grandezze direttamente o indirettamente correlate al contenuto idrico. I metodi diretti comportano l'estrazione dell'acqua dal suolo e la determinazione della quantità estratta. I metodi indiretti si basano invece sulla misura di proprietà fisiche o chimiche del mezzo poroso (es., costante dielettrica, conducibilità elettrica, capacità termica, contenuto di atomi di idrogeno), che sono influenzate dall'acqua presente nel terreno.

Per la misura diretta del contenuto idrico, il metodo gravimetrico rappresenta quello più utilizzato per determinare la percentuale di acqua sul peso secco, U [g g^{-1}], o sul peso umido di un campione di terreno. Per determinare la percentuale in volume (θ) è necessario tenere conto della massa volumica apparente del terreno:

$$\theta = U \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (3.2)$$

nella quale ρ_b [g cm^{-3}] e ρ_w [g cm^{-3}] rappresentano rispettivamente la massa volumica apparente del terreno e dell'acqua.

Tra i metodi indiretti, la Riflettometria nel Dominio del Tempo (TDR) e della frequenza (FDR) sono quelli più utilizzati, attesa la possibilità di misura in continuo (Robinson et al., 2008). La tecnica TDR prevede che un generatore di impulsi invii un segnale elettromagnetico ad una sonda interrata costituita, nella configurazione più usuale, da due o più conduttori metallici paralleli, come mostrato in figura 3.5 (Ferré e Topp, 2002).

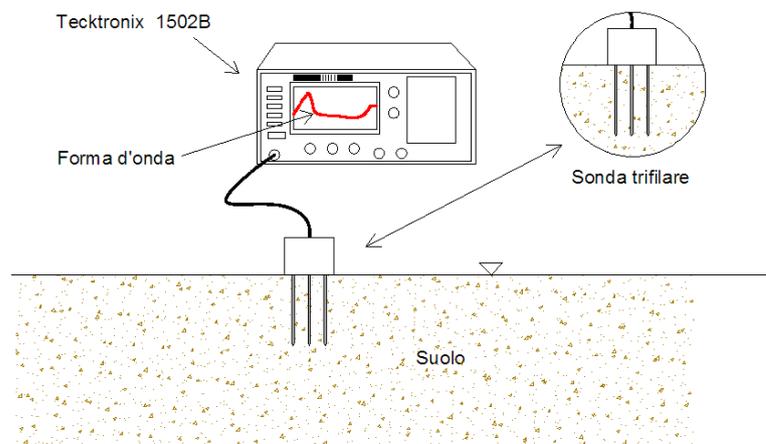


Figura 3.5 - Sistema TDR per la misura dei contenuti idrici del suolo

La velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica, v , è legata alle proprietà dielettriche del suolo secondo la relazione:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (3.3)$$

nella quale c [m s^{-1}] è la velocità di propagazione della luce nel vuoto ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) e ϵ [F m^{-1}] è la permittività dielettrica relativa o costante dielettrica, cioè il rapporto tra la permittività, ϵ_n , nel mezzo considerato e quella nel vuoto, ϵ_0 ($\epsilon = \epsilon_n \epsilon_0^{-1}$ con $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$). Considerato il suolo come un sistema in cui coesistono una fase solida (particelle di suolo), una liquida ed una gassosa, le sue proprietà dielettriche dipendono dalla combinazione delle proprietà delle singole fasi costituenti. Tuttavia, a causa della natura dipolare delle sue molecole, l'acqua presenta valori della costante dielettrica notevolmente maggiori ($\epsilon \approx 80$ a 20° C) rispetto all'aria ($\epsilon = 1$) e alla fase solida del suolo ($\epsilon = 3 \div 7$). Il valore misurato della costante dielettrica del sistema trifase prende il nome di costante dielettrica apparente, ϵ_b , e consente di determinare indirettamente il contenuto idrico del suolo in termini volumetrici.

L'impulso di tensione inviato dal generatore TDR, una volta entrato nella sonda interrata nel suolo, subisce ripetute riflessioni ed attenuazioni, per cui la forma d'onda, restituita su un display, assume l'andamento caratteristico schematicamente mostrato in figura 3.6.

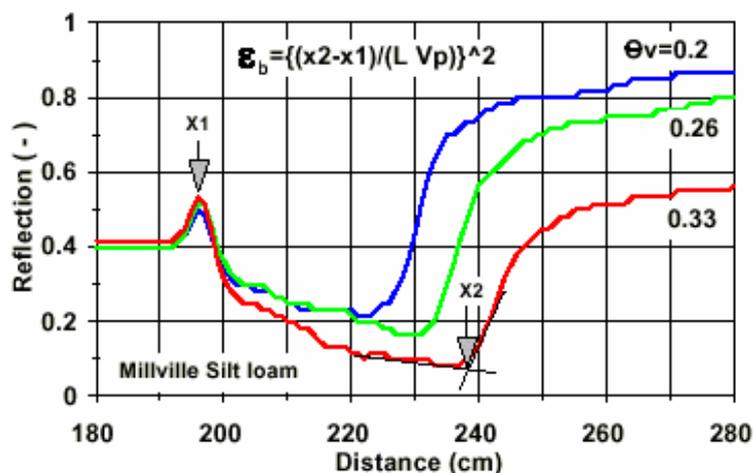


Figura 3.6 - Esempio di forme d'onda TDR misurate a tre diversi contenuti idrici usando un Tektronix 1502B e una sonda trifilare di 10 cm di lunghezza

Le caratteristiche della forma d'onda sono rappresentate da due riflessioni che corrispondono alle variazioni di impedenza che si verificano all'ingresso del segnale nel suolo (x_1) e alla fine della sonda (x_2). Nota la lunghezza, L [m], della sonda, la velocità di propagazione del segnale, v , è data da:

$$v = \frac{2L}{\Delta t} \quad (3.4)$$

nella quale Δt è la differenza tra i tempi che il segnale emesso dallo strumento impiega per percorrere, in andata e ritorno, la linea dall'estremità iniziale (x_1) a quella terminale (x_2) della sonda. Sostituendo la (3.3) nella (3.4) si ricava la seguente relazione per la determinazione della costante dielettrica apparente del terreno:

$$\varepsilon_b = \left(\frac{c\Delta t}{2L} \right)^2 \quad (3.5)$$

Amato et al. (1993), basandosi sulle distanze assolute dei due punti di riflessione, hanno proposto la seguente espressione:

$$\varepsilon_b = \left(\frac{x_2 - x_1}{Lv_p} \right)^2 \quad (3.6)$$

nella quale x_1 e x_2 , rappresentano rispettivamente il primo e il secondo punto di riflessione del segnale, L è la lunghezza della sonda infissa nel suolo e v_p è una frazione della velocità di propagazione, assunta pari a 0.66 nel caso si utilizzi come generatore di impulsi un Tektronix 1502 e pari a 1 per il TDR 100 della Campbell.

Conoscendo ε_b è possibile risalire al contenuto idrico mediante un approccio puramente empirico attraverso l'uso di modelli concettuali (Roth et al., 1990). Un'espressione empirica molto conosciuta in ambito idrologico è quella proposta da Topp et al. (1980) che, utilizzando suoli di differente tessitura (da franco-sabbiosa ad argillosa), ha individuato un'equazione di calibrazione, definita "universale", che lega la costante dielettrica apparente, ε_b , al contenuto idrico volumetrico del suolo:

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_b - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_b^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon_b^3 \quad (3.7)$$

Nello stesso studio è inoltre stata verificata l'indipendenza di ε_b dalla temperatura, nel range, 10-36 °C, per valori di massa volumica apparente, compresi tra 1.14 a 1.44 g cm⁻³.

La buona performance dell'equazione universale di Topp è stata ampiamente confermata da indagini condotte su suoli di differente tessitura (Roth et al., 1990; Nadler et al., 1991; Topp et al., 1982; Dasberg e Hopmans, 1992). Altre ricerche hanno però evidenziato che la suddetta relazione tende a sovrastimare il contenuto idrico nei suoli organici (Roth et al., 1990; Herkelrath et al., 1991) e a sottostimarli in quelli con un elevato contenuto d'argilla (Dasberg e Hopmans, 1992; Dirksen e Dasberg, 1993).

L'architettura delle sonde TDR è un argomento aperto in letteratura (Robinson et al., 2003). I requisiti maggiormente richiesti per una sonda TDR sono rappresentati dalla capacità delle stesse di minimizzare le attenuazioni del segnale e, al contempo, di garantire un contatto completo tra le guide metalliche e le particelle di suolo al momento dell'infissione. La presenza di sacche d'aria a contatto con la sonda, oltre a creare delle vie di flusso preferenziale per l'acqua e soluti, riducono artificialmente il valore di ε_b (Baker e Lascano, 1989). Per tali motivi, le sonde di tipo bifilare o trifilare mostrate in figura 3.7 sono di gran lunga le più utilizzate.

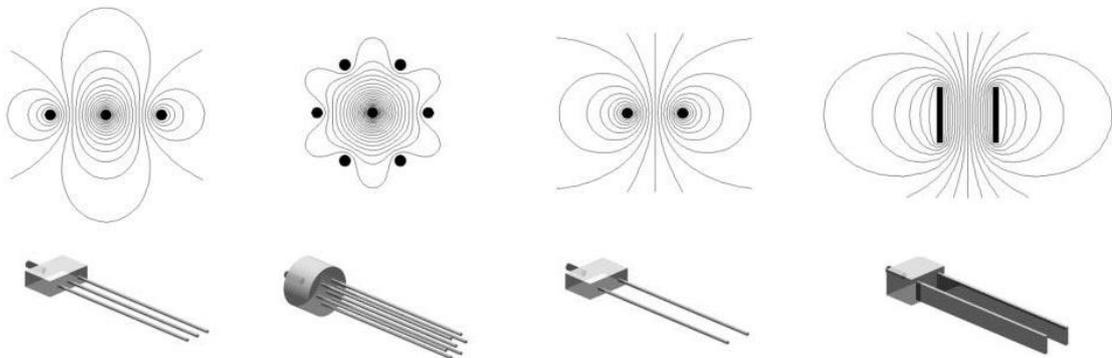


Figura 3.7 - Configurazione geometrica di sonde TDR e corrispondente distribuzione spaziale del campo elettrico in un piano trasversale alle guide metalliche (da Zegelin et al., 1989)

Oltre che dalla configurazione geometrica, la precisione delle misure dipende anche dalla lunghezza della sonda. Sonde di lunghezza inferiore a 0.10 m, specialmente in suoli molto secchi, possono condurre ad errori rilevanti nella stima del contenuto idrico (± 0.037 cm³ cm⁻³) a causa dell'incertezza nella determinazione dei punti di riflessione e quindi di Δt (Heimovaara, 1993). La lunghezza massima della sonda dipende dall'entità di attenuazione

del segnale che può rendere difficile la determinazione della seconda riflessione, soprattutto nei suoli argillosi e/o caratterizzati da elevata salinità. In pratica, la sonda dovrebbe comunque garantire un'ampiezza del segnale riflesso pari almeno al 10% di quella del segnale incidente (Dalton e van Genuchten, 1986). In ogni modo, l'esperienza conduce a ritenere più indicate, per le applicazioni di campo, sonde di lunghezza compresa fra 0.15 e 0.30 m.

Per quanto concerne invece l'interdistanza tra le linee conduttrici, si deve tenere in conto che all'aumentare di tale distanza aumenta il volume di suolo esplorato, ma di contro si determina una perdita di risoluzione del segnale TDR (Topp e Davis, 1985). Inoltre, il campo elettrico tende a concentrarsi in corrispondenza delle guide metalliche. Le misure di ϵ_b possono, in tal caso, risentire di disuniformità locali dovute a sacche di aria o acqua a contatto con le guide ("effetto pelle"). Per ridurre la concentrazione di energia elettromagnetica nelle vicinanze delle guide metalliche e, quindi, esplorare volumi di suolo maggiori, il diametro dei conduttori dovrebbe essere non inferiore a 1/10 della loro spaziatura (Knight, 1992). In termini generali, per misure di campo si possono utilizzare barrette metalliche di 4-6 mm di diametro, poste ad una distanza di 0.04-0.06 m. Per misure di laboratorio, in condizioni di maggiore omogeneità del mezzo poroso, le dimensioni delle guide possono essere ridotte, ma in ogni caso è opportuno che il loro diametro sia una decina di volte maggiore della dimensione media delle particelle che costituiscono il suolo (Santini, 1997).

Il volume di suolo effettivamente esplorato dal segnale elettromagnetico è di forma tanto più complessa quanto più eterogeneo è il suolo nel quale sono infisse le guide. Tuttavia, come si può rilevare dalla figura 3.7, il volume di misura tende ad essere più confinato con le sonde trifilari che con quelle bifilari (Zegelin et al., 1989). Topp e Davis (1985) hanno suggerito che il volume di suolo campionato da una sonda bifilare corrisponde all'incirca ad un cilindro di diametro pari a 1.4 volte l'interdistanza tra i conduttori e di altezza pari alla loro lunghezza. Successivamente, Baker e Lascano (1989) hanno verificato in laboratorio che la zona di influenza "effettiva" è approssimativamente di forma ellittica o rettangolare. In particolare, è stato osservato che una sonda con interdistanza dei conduttori di 50 mm esplora, nella direzione trasversale, una superficie pari a circa 20 x 65 mm².

Il sistema di misura della costante dielettrica apparente nel mezzo poroso, ϵ_b è costituito da un generatore di impulsi e al quale si collega una o più sonde. In commercio esistono diversi sistemi TDR utilizzabili per la determinazione del contenuto idrico del suolo e di altri mezzi porosi, alcuni dei quali rappresentati in figura 3.8.



Figura 3.8 - Apparecchi TDR: a) Tektronix 1502C (Tektronix Inc.), TRASE System I (Soil Moisture equipment Corp.), c) Field Scout TDR300 (Spectrum Technologies, Inc), d) TDR100 (Campbell Scientific Inc.)

Per automatizzare il sistema di misura e per poter effettuare misure contemporanee con più di una sonda è possibile accoppiare un multiplexer e un datalogger (figura 3.9). Il multiplexer ha la funzione di gestire l’acquisizione simultanea dei segnali provenienti da più sonde su altrettanti canali, mentre il datalogger gestisce la permutazione di ciascun canale e provvede al trasferimento dei dati al computer.

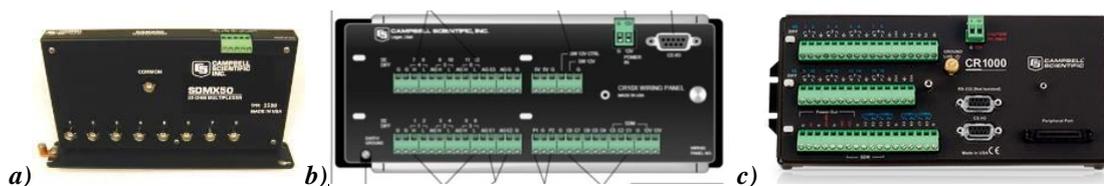


Figura 3.9 - a) Multiplexer per la gestione di più sonde TDR e Dataloggers b) Campbell CR10X c) Cr1000 per la permutazione e l’immagazzinamento dei dati

Nelle installazioni di campo le sonde possono essere infisse in posizione verticale, orizzontale o obliqua rispetto al piano di campagna. Nel caso di installazioni permanenti, soprattutto in suoli argillosi, bisogna tener conto che l’infissione verticale può favorire la formazione di crepacciature che possono determinare vie preferenziali per il bagnamento e l’essiccamento degli strati sottostanti, nonché per la crescita delle radici. In generale, modeste deviazioni rispetto al parallelismo delle barrette metalliche non influiscono sull’accuratezza della misura (Noborio, 2001). Tuttavia, specie in suoli con elevata coesione, è consigliabile utilizzare delle maschere che consentano di mantenere equidistanti le barrette durante l’infissione.

Un’altra tecnica di misura indiretta del contenuto idrico del suolo che utilizza le proprietà dielettriche del sistema è quella che utilizza la riflettometria nel dominio delle frequenze (Frequency Domain Reflectometry, FDR). Il suolo è considerato come parte di un

capacitore, in cui i dipoli nel mezzo dielettrico si allineano sotto l'azione di un campo elettrico, diventando polarizzati.

Le sonde di capacità permettono di determinare la costante dielettrica apparente del suolo (ε_b) che, come detto, è fortemente dipendente dal contenuto idrico. Più alto è il contenuto idrico del suolo, maggiore è il valore della costante dielettrica e minore è la frequenza misurata dal sensore (Williams et al., 2003). In altri termini, le sonde capacitive usano la parte di suolo che circonda gli elettrodi come il dielettrico di un condensatore in cui i dipoli elettrici, costituiti dalle molecole dell'acqua contenuta nel suolo, si polarizzano in risposta al campo elettrico imposto. Fissata la frequenza e la configurazione dell'elettrodo, la relazione tra la costante dielettrica ε_b e la capacità totale, C , è data da:

$$C = g_f \varepsilon_b \quad (3.8)$$

nella quale g_f è una costante geometrica legata alla configurazione dell'elettrodo (dimensione, forma, e distanza tra gli elettrodi).

La frequenza di oscillazione del campo elettrico, F , per fissato valore dell'induttanza L del circuito, dipende soltanto dalla capacità del condensatore formato dal sistema elettrodi-suolo:

$$F = (2\pi\sqrt{L C})^{-1} \quad (3.9)$$

Misurato F è possibile ricavare θ , nota che sia la specifica relazione di calibrazione, valida per ciascun tipo di suolo:

$$F = f(\theta) \quad (3.10)$$

La frequenza di oscillazione è proporzionale solo al rapporto tra i volumi di aria e di acqua contenuti nell'unità di volume di suolo. Questa frequenza, così misurata, viene registrata nel datalogger, come *count*. I *counts* vengono poi elaborati mediante un'equazione di normalizzazione per ottenere una frequenza scalata. La procedura di normalizzazione mette in relazione la frequenza rilevata dal sensore nel suolo, F_s , con quelle rilevate in aria, F_a , e in acqua, F_w , consentendo così di ottenere la frequenza scalata (SF):

$$SF = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (3.11)$$

La normalizzazione è importante perché ogni sensore risponde in modo diverso in aria e in acqua. Inoltre, tale operazione permette di rendere confrontabili le misure effettuate in periodi diversi, quando vengono utilizzate due o più sonde nello stesso suolo ovvero quando due o più sensori sono collegati ad uno stesso datalogger.

Il valore di SF è poi convertito in contenuto idrico, θ , sulla base dell'equazione di calibrazione, rappresentata dal legame funzionale $\theta(SF)$.

Gli Autori hanno mostrato che alle frequenze comprese tra 100 e 150 MHz, gli effetti descritti sono sufficientemente ridotti e non è necessario operare a frequenze ancora più alte, che rendono molto più difficile la realizzazione del circuito.

Paltineau e Starr (1997) hanno ricavato sperimentalmente in laboratorio un'equazione di calibrazione della sonda capacitiva a sensori multipli "Sentek Enviroscan". Dalle prove effettuate, gli Autori hanno dedotto che la precisione della calibrazione è in primo luogo dipendente dagli errori connessi al prelevamento dei campioni per le misure, segnalando quindi la necessità di procedere con accuratezza nel prelievo in prossimità della zona di influenza del sensore.

Per quanto riguarda la sensibilità alle variazioni di temperatura delle sonde capacitive Diviner 2000 ed Enviroscan rispetto al TDR, prove sperimentali condotte hanno evidenziato che variazioni di temperatura non superiori a 10 °C, non influenzano significativamente la stima del contenuto idrico del terreno, come invece succede per i valori misurati mediante sonde TDR. Anche le ricerche di Baumhardt et al., (2000) hanno evidenziato gli effetti della salinità sulle misure effettuate con sonde capacitive, rispetto a quelle rilevate con sonde TDR. Inoltre, l'incremento del contenuto idrico in seguito all'aggiunta di acqua con elevato contenuto di sali è stato messo in relazione agli effetti che la salinità ha sulla permittività del suolo. Sulla base delle ricerche condotte dai diversi Autori quindi, è possibile concludere che l'accuratezza delle misure di contenuto idrico del terreno varia in relazione al tipo di suolo e, in misura minore, alla temperatura ed alla salinità.

L'uso della sonda capacitiva comporta alcuni problemi ancora non risolti, quali le condizioni climatiche non controllate all'interno del tubo di accesso della sonda, l'influenza di cambiamenti nell'orientamento del sensore all'interno del tubo di accesso, nonché la presenza di aria tra la sonda ed il tubo di accesso, che possono influenzare le

misure di contenuto idrico lungo il profilo investigato. Tali limitazioni sono state in parte superate con le sonde capacitive multisensore o a sensore singolo installate permanentemente in campo, quali le sonde Enviroscan.

Il sensore FDR, rispetto alle tradizionali tecniche utilizzate in passato, ha il vantaggio di essere più leggero e di consentire letture rapide e senza alcun rischio. Tra i sensori che utilizzano la tecnica FDR per la stima dei contenuti idrici del suolo, il Diviner 2000, mostrato in figura 3.10, è stato il pioniere dei sistemi portatili.



Figura 3.10 - Sensore Diviner-2000 della Sentek

Lo strumento è costituito da un'unità display e da una sonda portatile. L'unità display rappresenta l'interfaccia della sonda e permette anche l'acquisizione e la memorizzazione dei dati misurati. La sonda è costituita da un'asta metallica, di lunghezza variabile tra 1 e 2m, che va collegata alla porta di connessione dell'unità display e che, all'estremità inferiore, contiene il sensore singolo ad anelli cilindrici che va inserito all'interno di un tubo di accesso preventivamente installato in campo. La scala graduata sull'asta mostra la profondità alla quale la sonda è inserita rispetto al piano di campagna. Il sensore, costituito da un anello metallico separato da anelli di plastica, è racchiuso all'interno di un supporto in materiale plastico. Lo strumento consente di misurare il contenuto idrico del suolo in situ e a diverse profondità.

La zona di influenza del sensore ad anello cilindrico si distingue nelle due componenti: assiale e radiale. La prima si estende verticalmente per circa 10 cm dal baricentro di due anelli di misura, mentre la seconda, perpendicolare all'asse del tubo di accesso, si estende per circa 5-10 cm dalla parete esterna del tubo. Le sonde ad anelli metallici richiedono, come detto, la preliminare installazione nel terreno di tubi di accesso in PVC, la cui

accurata installazione è fondamentale per garantire l'attendibilità delle misure. L'operazione richiede molta attenzione al fine di evitare la presenza di eventuali sacche d'aria nell'intorno dei tubi d'accesso. Infatti, la presenza d'aria può alterare il valore della costante dielettrica apparente del terreno, risultando la costante dielettrica dell'aria circa due ordini di grandezza inferiore a quella dell'acqua. Altri problemi che possono insorgere a causa di una scorretta installazione sono da imputare all'eventuale modifica della struttura e della densità del suolo, con inevitabili conseguenze sui processi di moto dell'acqua nel terreno.

La casa costruttrice dello strumento (Sentek Enviromental Technologies) fornisce un'equazione di calibrazione, sulla base della quale è possibile ricavare il valore di contenuto idrico del suolo, θ , a partire dai valori di frequenza di oscillazione misurata dal sensore:

$$\theta = \left(\frac{SF}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3.12)$$

nella quale a e b sono i coefficienti di calibrazione proposti dal costruttore e pari rispettivamente a 0.2746 e 0.3314. Tale equazione è stata messa a punto sulla base di dati rilevati in Australia su diversi campioni di suolo a tessitura sabbiosa e franco sabbiosa, oltre che su substrati organici ed è caratterizzata da un valore di R^2 pari a 0.9985. La casa costruttrice, consiglia tuttavia la determinazione di un'equazione di calibrazione sito-specifica per il tipo di suolo considerato, in modo da ottenere valori di umidità più attendibili dato che l'equazione proposta non sempre riesce a rappresentare l'eterogeneità dei diversi suoli presenti in natura.

Per effettuare la calibrazione del sensore, il costruttore consiglia di seguire la procedura descritta da Paltineau e Starr (1997), che fa riferimento al contenuto idrico ottenuto con il metodo termo-gravimetrico, ottenuto utilizzando campioni rimaneggiati di suolo prelevati in prossimità dei pozzetti di misura e a diverse epoche di campionamento, nella zona di influenza del sensore. Recentemente è stata suggerita una procedura di laboratorio per calibrazione del sensore, che utilizza monoliti di suolo indisturbato (Provenzano et al., 2015). Tale procedura permette, nel corso di un processo di essiccamento all'aria del campione, di effettuare contestuali misure di frequenza scalata rilevata dal sensore oltre che di contenuto idrico del terreno misurato utilizzando il metodo termo-gravimetrico.

A scala locale, i sistemi micrometeorologici rappresentano ad oggi le tecnologie più avanzate per la determinazione dei flussi evapotraspirativi di una superficie vegetata. Tali sistemi possono misurare l'evapotraspirazione in termini di massa, attraverso la misura diretta dei flussi di vapore acqueo nella bassa atmosfera oppure in termini energetici, attraverso la stima del flusso di calore latente ottenuta come termine residuo dell'equazione generale del bilancio energetico di superficie.

Con riferimento alla prima categoria, la tecnica della correlazione turbolenta (*eddy covariance o eddy correlation, EC*) permette una misura diretta dello scambio di vapore acqueo in atmosfera, che viene in genere accoppiata alla misura delle altre grandezze (calore sensibile, radiazione netta e flusso di calore nel suolo) che rientrano nell'equazione generale del bilancio energetico. A tal fine, un sistema EC è in genere costituito dalla seguente tipologia di sensori:

- Analizzatore di gas, per la stima diretta dello scambio di vapore in atmosfera e conseguentemente del flusso di calore latente.
- Anemometro sonico per la stima del flusso di calore sensibile.
- Radiometro netto a 4 componenti per la stima della radiazione netta.
- Piastre per la misura del flusso di calore nel suolo.

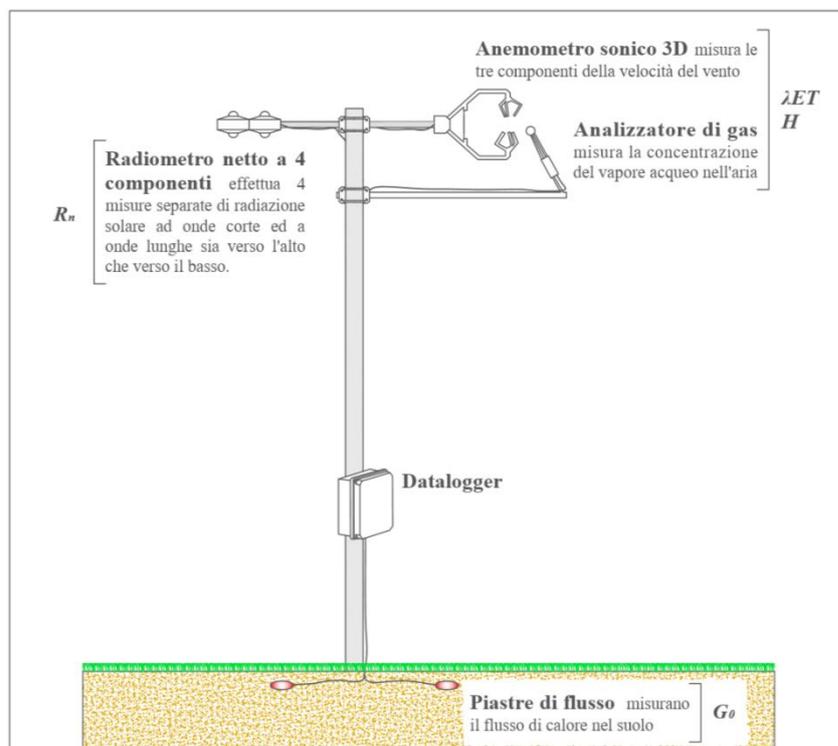


Figura 3.11 - Schema dell'installazione EC per la misura dei flussi energetici

Per quanto riguarda la misura dei flussi di calore sensibile e latente, le variabili microclimatiche direttamente misurate sono essenzialmente la velocità del vento, la temperatura dell'aria e la concentrazione di vapore acqueo. La velocità del vento è una grandezza vettoriale, la cui definizione richiede la misura delle sue tre componenti u , v e w , rispettivamente lungo le direzioni x , y e z .

I flussi turbolenti in atmosfera sono costituiti da un certo numero di vortici, aventi dimensione differente, responsabili dei moti di trasporto del calore e delle altre quantità scalari (figura 3.12).

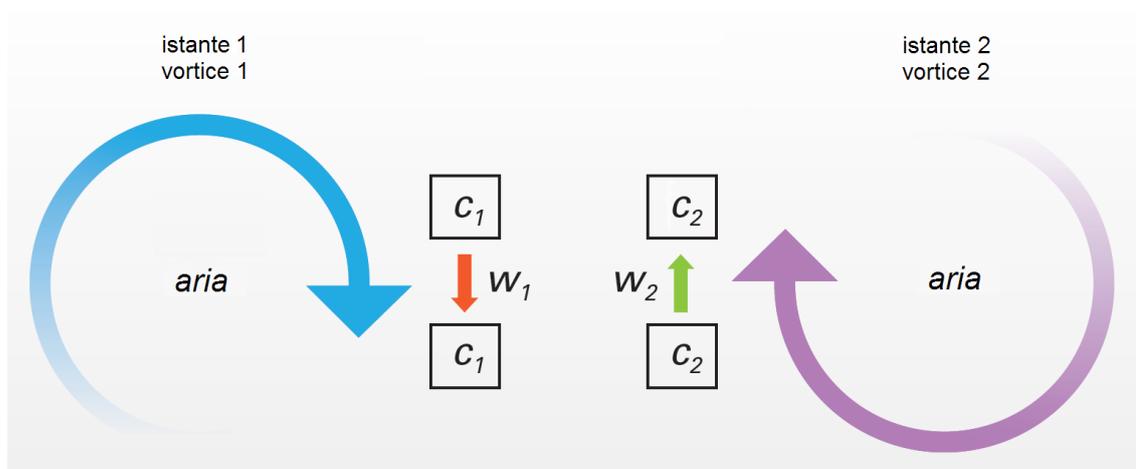


Figura 3.12 - Rappresentazione schematica del processo di trasporto di una quantità scalare “c”, per mezzo di vortici. In un certo punto della bassa atmosfera, all’istante t , il vortice 1 sposta un pacchetto di aria verso il basso alla velocità w_1 . In un istante successivo (2), il vortice 2 sposta un altro pacchetto verso l’alto alla velocità w_2 (Burba e Anderson, 2005)

Ciascun pacchetto d'aria è caratterizzato da una propria umidità, temperatura e concentrazione dei gas che possono essere misurate insieme alla velocità per ottenere così i flussi ascendenti e discendenti di umidità temperatura e concentrazione di gas. Il principio generale su cui si basano le misure che utilizzano la tecnica della correlazione turbolenta è la covarianza tra concentrazione di interesse e la velocità verticale dei vortici.

Questa definizione è basata sull'ipotesi che: i) tutti i vortici sono presi in considerazione nel calcolo della fluttuazione turbolenta, ii) è possibile applicare la scomposizione di Reynolds, iii) le fluttuazioni della densità dell'aria sono trascurabili (Burba e Anderson, 2005).

La prima ipotesi influenza direttamente la frequenza di acquisizione delle misure, che deve essere maggiore di 10Hz in modo da poter rilevare con adeguata accuratezza le fluttuazioni

delle grandezze fisiche. L'applicazione della scomposizione di Reynolds consiste nello scomporre il valore istantaneo di una variabile nella sua componente media ed in una componente fluttuante. Inoltre, esistono altre due ipotesi fondamentali nella tecnica della correlazione turbolenta; la prima riguarda l'assenza di avvezione (condizioni stazionarie), mentre l'altra la possibilità di trascurare flussi divergenti o convergenti.

Sulla base di tali considerazioni, i flussi di calore sensibile, H , e latente λET , possono essere ottenuti mediante le seguenti relazioni:

$$H = \rho c_p \sigma_{\omega T} \quad (3.13)$$

$$\lambda ET = \lambda \rho \sigma_{\omega q} \quad (3.14)$$

nelle quali $\sigma_{\omega T}$ [$\text{m s}^{-1} \text{K}$] è la covarianza tra la velocità verticale del vento e la temperatura e $\sigma_{\omega q}$ [m s^{-1}] è la covarianza tra la velocità verticale del vento e la concentrazione di vapore acqueo.

La determinazione del flusso di calore sensibile mediante l'equazione 3.13 richiede misure ad alta frequenza della temperatura dell'aria. Tali misure, possono essere in alternativa sostituite dalla temperatura ottenuta da dati anemometrici, che viene anche chiamata temperatura sonica, T_{son} [$^{\circ}\text{K}$]. La determinazione della radiazione netta è ottenuta attraverso un radiometro netto a quattro componenti, costituito da due piranometri per la misura della radiazione incidente e riflessa a onda corta e due pirgeometri per la misura della radiazione incidente e riflessa a onda lunga. Il flusso di calore nel suolo viene valutato per mezzo di una apposita piastra costituita da una termopila che permette di misurare i gradienti di temperatura. Per ottenere valori spazialmente rappresentativi del flusso di calore al suolo, ogni sito dovrebbe essere corredato di almeno due piastre, anche se, in presenza di suoli eterogenei, il numero delle piastre dovrebbe essere opportunamente aumentato.

Al fine di utilizzare i dati relativi ai flussi superficiali misurati, risulta necessario controllare ed assicurare la chiusura del bilancio energetico, utilizzando uno dei metodi disponibili in letteratura (Prueger et al., 2005; Twine et al., 2000). Un semplice approccio per controllare e far rispettare la chiusura del bilancio è quello proposto da Prueger et al. (2005). Seguendo tale approccio, la chiusura del bilancio energetico viene effettuata sulla base della somma giornaliera dei flussi superficiali medi acquisiti a scansione semi-oraria. I periodi diurni possono essere definiti imponendo che R_n risulti maggiore di 100 Wm^{-2} . Il rapporto di chiusura, CR , è calcolato mediante l'equazione:

$$CR = \frac{H + \lambda ET}{R_n - G_0} \quad (3.15)$$

La chiusura bilancio è considerata soddisfacente per $CR > 0.85$ (Meyers e Hollinger 2004; Prueger et al., 2005; Wilson et al., 2002).

Un altro approccio che permette la verifica della chiusura del bilancio energetico fa riferimento al rapporto di Bowen, β_w , tra i flussi misurati di calore sensibile e latente, la cui valutazione permette di compensare i termini H e λET (Twine et al., 2000), sulla base della quantificazione degli errori di chiusura. Seguendo tale metodologia l'equazione di bilancio energetico superficiale, nell'ipotesi di considerare trascurabile l'errore nella misura dell'energia disponibile, può essere espresso come:

$$R_n - G_0 = (H_{mis} + \Delta H) + (\lambda ET_{mis} + \Delta \lambda ET) \quad 3.16$$

nella quale il pedice "mis" indica i valori misurati, mentre ΔH e $\Delta \lambda ET$ rappresentano gli errori di chiusura rispettivamente per H ed λET . I due termini correttivi possono essere calcolati, mantenendo costante il rapporto di Bowen misurato, sulla base delle seguenti equazioni:

$$\Delta \lambda ET = \frac{(R_n - G_0) - [(1 - \beta_w)\lambda ET_{mis}]}{1 + \beta_w} \quad 3.17$$

$$\Delta H = \beta_w(\lambda ET_{mis} + \Delta \lambda ET) - H_{mis} \quad 3.18$$

3.2 Monitoraggio a scala territoriale: tecniche di remote sensing a supporto della modellazione degli scambi idrici ed energetici nel sistema SPA.

Le tecniche di rilievo da remoto rappresentano metodologie a basso costo che possono essere utilizzate per determinare la variabilità spatio-temporale di talune variabili fisiche necessarie per la modellazione a scala territoriale degli scambi idrici ed energetici nel sistema SPA (Ciraolo et al., 2007). Attraverso le tecniche di telerilevamento è possibile l'acquisizione a distanza di dati ottenibili dalle emissioni o riflessioni di energia elettromagnetica della superficie terrestre e degli oggetti che si trovino su di essa (Brivio et

al., 1992). I dati acquisiti sono rappresentati da immagini digitali che permettono di estrarre informazioni per il controllo e la previsione dello stato dell'ambiente, di descrivere alcune proprietà della superficie terrestre, di monitorare l'evoluzione di particolari fenomeni nel tempo e, in alcuni casi, di acquisire informazioni persino dalla massa sottostante la superficie terrestre. In questo tipo di immagini, le informazioni sono strutturate in maniera "raster" ovvero secondo matrici di celle quadrate, chiamate "pixel" contenenti informazioni codificate in byte.

La registrazione dell'energia elettromagnetica avviene tramite sensori orbitanti su piattaforme aeree o spaziali in cui un sofisticato sistema a scansione provvede a tradurre in informazione digitale il segnale ottico ricevuto. Le immagini telerilevate sono costituite da diversi strati chiamati bande, ciascuna delle quali rappresenta l'energia corrispondente ad un determinato intervallo di lunghezze d'onda; grazie alla particolare struttura delle immagini, ciascuno strato può essere usato singolarmente o in combinazione con altri.

I sistemi di telerilevamento satellitare possono essere distinti in sistemi attivi e passivi. I primi illuminano l'oggetto di studio con la radiazione da loro emessa artificialmente, che può essere radar o laser, i secondi usufruiscono della radiazione naturale, rappresentata dalla radiazione emessa da qualsiasi corpo a temperatura superiore allo zero assoluto o dalla radiazione solare riflessa.

In relazione all'orbita descritta i satelliti si distinguono in eliosincroni e geosincroni. I primi hanno un'orbita fissa rispetto al sole, per cui sorvolano le stesse aree della superficie terrestre circa alla stessa ora del giorno, mentre i secondi presentano un periodo esattamente della stessa durata del giorno sidereo (23 ore, 56 minuti, 4 secondi), ossia il tempo impiegato dalla terra a effettuare una rotazione completa attorno al proprio asse. Inoltre, se l'orbita del satellite geosincrono è circolare questa anche si trova nello stesso piano dell'equatore terrestre ed è descritta in senso antiorario (da ovest a est), per cui il moto relativo tra satellite e superficie terrestre è nullo e quindi ad un osservatore situato sulla terra, il satellite appare stazionario sulla verticale di un particolare punto sull'equatore (satellite geostazionario).

Ogni sistema di acquisizione si caratterizza per la risoluzione spaziale, che indica la dimensione a terra del pixel, per la risoluzione spettrale che indica il numero di bande dell'immagine e per la risoluzione temporale, che indica la frequenza di ripetizione di una ripresa nella medesima zona. Si definisce *firma spettrale* la funzione, diversa per ogni oggetto, che rappresenta la variazione del comportamento spettrale dell'oggetto (cioè la diversa riflessione delle onde elettromagnetiche) al variare della lunghezza d'onda.

Lo studio delle firme spettrali permette di diversificare le informazioni registrate dal sensore in relazione ad oggetti diversi o a diverse condizioni fisiche di questi, permettendo di conseguenza la distinzione e la classificazione degli oggetti ripresi.

In particolare, è possibile identificare tre grandi sottoinsiemi degli infiniti oggetti che si trovano sulla superficie terrestre, all'interno dei quali si possono notare dei comportamenti spettrali ben precisi, essi sono: la vegetazione, il suolo non vegetato e l'acqua. Per ciascuna di queste categorie la firma spettrale varia in funzione delle diverse condizioni fisiche. Ad esempio, le specie vegetali, essendo caratterizzate da apparati fogliari di diversa struttura, hanno firme spettrali caratteristiche per ogni specie. La firma spettrale dei vegetali varia poi anche in funzione delle condizioni fitosanitarie, dello stadio fenologico, della presenza di stress idrico o di attacchi parassitari. I suoli si comportano nello stesso modo: la risposta spettrale varia a seconda del contenuto di umidità, della composizione del suolo, etc. Per l'acqua, le variazioni sono dovute alla presenza di solidi sospesi, vegetazione, scarichi, etc.. In relazione a quanto descritto ed alla necessità di registrare le lunghezze d'onda meno soggette all'interazione con i gas atmosferici sono state scelte le bande di lunghezze d'onda acquisite da diversi sensori in orbita. Nella tabella 3.1 sono riportate alcune possibili applicazioni del telerilevamento ed i relativi intervalli spettrali che ne permettono lo studio.

3.2.1 Sintesi sulle tecniche principali di trattamento digitale delle immagini

Le tecniche di elaborazione digitale delle immagini, svolte da software detti di “*image processing*”, sono numerose e comprendono sia elaborazioni geometriche (georiferimento, rettifica, overlay, etc.) che radiometriche (filtraggi, miglioramento del contrasto, classificazioni, etc.). Tutte queste tecniche sono necessarie alla utilizzazione delle immagini, consentendo l'estrazione delle informazioni in esse contenute.

Di seguito si riportano le linee essenziali che caratterizzano le suddette tecniche e le potenzialità delle informazioni da esse deducibili.

Analisi dell'istogramma dell'immagine: è la prima necessaria operazione da effettuare sulla matrice numerica relativa ad una ripresa multispettrale digitale di una porzione della superficie terrestre e che consente di procedere al miglioramento della stessa.

Tabella 3.1 - Possibili applicazioni del telerilevamento e relativi intervalli spettrali

Intervallo spettrale (μm)	Banda	Applicazioni principali
0.4 - 0.6	blu	<i>acque superficiali e costiere</i> - trasparenza – torbidità - batimetria - corpi idrici
0.5 - 0.6	verde - giallo	<i>agricole e forestali</i> - vigore della vegetazione - fitopatologie e stress <i>acque superficiali e costiere</i> - torbidità in superficie - reticolo idrografico
0.6 - 0.7	arancio - rosso	<i>agricole e forestali</i> - separazione suolo - vegetazione - classificazione vegetazione - vigore della vegetazione
0.7 - 0.8	rosso - IR vicino	<i>agricole e forestali</i> - separazione suolo - vegetazione - tessitura superficiale dei suoli
0.8 – 1	IR vicino	<i>agricole e forestali</i> - stima della biomassa - separazione suolo/vegetazione - classificazione vegetazione - vigore vegetazione - umidità dei suoli - corpi idrici studi agricoli e forestali
1.5 - 2.4	IR vicino	<i>agricole e forestali</i> - corpi d'acqua e reticolo idrografico - umidità dei suoli / vegetazione - classificazione vegetazione - zone urbanizzate
3 – 6	IR termico	- umidità dei suoli - geotermia ed anomalie termiche - stima temperature apparenti

Si tratta di un diagramma cartesiano che fornisce, per ogni valore di radianza (o Digital Number), il numero di pixel dell'immagine aventi quel dato valore. L'analisi dell'istogramma e in particolare di alcuni parametri statistici, riassumono il contenuto di livelli di grigio o di colore dell'immagine. In particolare vengono considerati il valore minimo e massimo della variabile al di sotto del quale non esistono nell'immagine pixel di radianza inferiore o superiore, il valore medio che fornisce informazioni sulla luminosità media dell'immagine, nonché la deviazione standard, che dà l'idea del contrasto medio dell'immagine.

Miglioramento del contrasto (*Contrast Stretching*): è l'insieme di tecniche adottate in genere per immagini a basso contrasto, allo scopo di modificare la forma dell'istogramma dell'immagine aumentando la dinamica dei valori rispetto all'intervallo di variabilità dello stesso istogramma. Ciò comporta una "equalizzazione dell'immagine" ed un miglioramento del contrasto visivo: quindi una migliore individuazione degli oggetti ripresi.

Filtraggio: è la tecnica che consente l'applicazione di operatori locali (o filtri) che, applicati all'immagine, enfatizzano le variazioni radiometriche utili per estrarre caratteristiche di interesse.

Composizione di bande: si usa per combinare le bande in coppie o terne, associando ad esse una coppia o una terna di colori fondamentali. In questo modo si possono distinguere le informazioni "leggibili" da ciascuna banda associando ad essa una diversa tonalità di colore utile per una migliore interpretazione visiva.

Analisi delle componenti principali: è una operazione che viene svolta quando si voglia ridurre il numero di bande dell'immagine, creando nuove immagini dalle quali siano eliminate le informazioni radiometriche ridondanti, riducendo la dimensione dei dati.

Classificazione: è il processo di raggruppamento dei pixel dell'immagine in un numero finito di classi, in base ai valori assunti dai Digital Number. Le tecniche che consentono di effettuare le classificazioni sono diverse ma possono comunque essere suddivise in due categorie fondamentali, contraddistinte in *unsupervised* (classificazioni non controllate) e *supervised* (classificazioni controllate). Le prime prescindono dalla conoscenza di zone campione della superficie ripresa nell'immagine e permettono di identificare le classi dell'immagine in base alle sole caratteristiche spettrali.

Le classificazioni supervised si basano invece sulla preventiva localizzazione, effettuata dall'operatore sull'immagine, di aree-campione rappresentative delle classi che si intendono identificare che precede la fase di riconoscimento delle classi sulla base di alcuni parametri sia spettrali che spaziali.

Georiferimento dell'immagine: si tratta di un processo di correzione geometrica col quale si rende l'immagine conforme con un prefissato sistema di riferimento (UTM, Gauss-Boaga, etc.). I vantaggi offerti dalla georeferenziazione sono connessi alla possibilità di localizzare i pixels, utilizzando direttamente le relative coordinate di riferimento, alla possibilità di sovrapporre all'immagine dati vettoriali provenienti da cartografia numerica, alla possibilità di ottenere informazioni sulla geometria degli elementi rappresentati (lunghezze, aree, etc.), alla possibilità di *mosaicare* immagini differenti.

Negli ultimi venti anni, l'uso del telerilevamento per il monitoraggio della vegetazione ha permesso lo sviluppo di un gran numero di indici di vegetazione, ciascuno dei quali in grado di mettere in evidenza un particolare aspetto della condizione del manto vegetale.

È infatti noto che la vegetazione ha un particolare comportamento nei riguardi delle bande del visibile e del vicino infrarosso: se infatti nel visibile e specialmente nelle bande del verde e del rosso, la riflettanza spettrale è molto alta, la risposta nel campo del vicino infrarosso è molto influenzata dall'umidità.

Gli indici di vegetazione (*VI*) consistono in combinazioni lineari o in semplici rapporti dei valori di riflettanza registrati nelle bande del verde [*GR*] (o del rosso [*R*]) e dell'infrarosso vicino [*NIR*]. Si è soliti distinguere tali indici in tre categorie, in relazione al principio su cui si basano e in particolare:

Indici intrinseci: come il Simple Ratio (*SR*) ed il Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) basati esclusivamente sulla riflettanza spettrale misurata;

Indici correlati alla "soil line": come ad esempio il Perpendicular Vegetation Index (*PVI*) ed il Weighted Difference Vegetation Index (*WDVI*), derivato dal primo;

Indici con correzioni atmosferiche: come l'Atmospherically Resistant Vegetation Index (*ARVI*) ed il Global Environment Monitoring Index (*GEMI*).

Il più semplice tra i diversi indici disponibili è certamente il *SR*, rappresentato dal rapporto delle due bande in questione, ottenuto dalla relazione:

$$SR = \frac{NIR}{R} \quad 3.19$$

Dalla normalizzazione di tale indice si ottiene l'*NDVI* proposto da Rouse et al (1973), che è dato dal rapporto tra lo scarto tra i valori nelle due bande in oggetto e la loro somma:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad 3.20$$

Questi ultimi indici di vegetazione appartengono all'insieme degli indici intrinseci, poiché si basano soltanto sulla radiazione spettrale misurata e trovano largo impiego nel monitoraggio di cambiamenti globali in aree vegetate, data la loro provata affidabilità e semplicità di calcolo. Tali indici sono inoltre ben correlati con le proprietà biofisiche della vegetazione, quali la radiazione attiva assorbita a fini fotosintetici, l'efficienza e la

produttività. È necessario tuttavia, evidenziare anche i limiti degli indici intrinseci, che sono molto condizionati da tre fattori esterni principali quali la configurazione geometrica del sistema composto dal sole, dalla scena e dal sistema d'acquisizione dell'immagine, il tipo di suolo e l'effetto dell'atmosfera, che si combinano tra loro in modo complesso, cosicché per coperture vegetali di caratteristiche simili, ma in zone lontane della stessa scena, si riscontrano spesso risposte diverse. Il motivo di questo risultato non è in genere imputabile ad un solo fattore quale, per esempio, la diversa risposta del terreno sottostante, ma può essere dovuto ad una azione combinata di questo con una diversa condizione di illuminazione o di inclinazione del sole nelle due diverse zone. Il comportamento ottico del suolo, inoltre, influisce in maniera tanto più pesante, quanto più bassa e rada è la copertura vegetale, ragion per cui in assenza di esaurienti informazioni sul comportamento ottico del suolo, l'uso degli indici intrinseci per la valutazione delle caratteristiche della vegetazione è molto arduo.

3.2.2 Il sensore MODIS ed i suoi prodotti

Attualmente, esiste una vasta gamma di sensori, caratterizzati da differenti risoluzioni spaziali e temporali, che acquisiscono nelle regioni dello spettro a onde corte e lunghe. Uno dei sensori che offre una vasta serie di prodotti che vanno dalle immagini grezze ai prodotti elaborati, quali ad esempio gli indici di vegetazione, è il Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).

MODIS è un sensore installato a bordo della piattaforma satellitare "Terra" (originariamente conosciuta come EOS AM-1) e della piattaforma "Aqua" (originariamente conosciuta come EOS PM-1). Le due piattaforme sono state lanciate rispettivamente nel 1999 e nel 2002 e progettate per l'osservazione del pianeta terra. La piattaforma "Terra" orbita attorno al nostro pianeta ed è temporizzata in modo che passi da nord a sud attraversando l'equatore nelle ore del mattino, mentre "Aqua" passa da sud a nord attraversando l'equatore nelle ore del pomeriggio. MODIS Terra e MODIS Aqua eseguono la visualizzazione dell'intera superficie del pianeta ogni 1 - 2 giorni, acquisendo i dati in 36 bande spettrali o a gruppi di lunghezze d'onda. Nella tabella 3.2 sono riportate le specifiche tecniche del sensore MODIS, mentre in tabella 3.3 sono indicate le principali applicazioni.

Tabella 3.2 - Specifiche tecniche del sensore MODIS

Orbita	altezza: 705 km, nodo discendente: 10:30 (Terra) oppure nodo ascendente: 13:30 (Aqua), eliosincrona, semi-polare e circolare
Velocità di scansione	20.3 rpm, in direzione trasversale
Passo	2330 km (in direzione trasversale) per 10 km (nella direzione dell'orbita al nadir)
Telescopio	17,78 cm di diametro fuori-asse, sistema afocale (collimato), con interruzione intermedia di campo
Dimensioni	1,0 x 1,6 x 1,0 m
Peso	228,7 kg
Potenza	162,5 W (mediata su un'orbita)
Velocità trasferimento dati	10.6 Mbit/s (picco giornaliero); 6,1 Mbit/s (mediata su un'orbita)
Quantizzazione	12 bit
Risoluzione spaziale	250 m (bande 1-2); 500 m (bande 3-7); 1000 m (bande 8-36)
Vita di progetto	6 anni

Nel complesso, i due sensori sono stati progettati per raccogliere informazioni sulle dinamiche globali di larga scala quali quelle relative ai cambiamenti nella copertura nuvolosa della Terra, al bilancio dell'energia radiante ricevuta ed emessa dal nostro pianeta, ai processi che hanno luogo nella bassa atmosfera, negli oceani e nei continenti.

Ai fini dello studio della vegetazione e dei consumi evapotraspirativi, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) ha messo a disposizione una serie di prodotti ottenuti dall'elaborazione di immagini MODIS e disponibili gratuitamente sul sito Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC) (<http://daac.ornl.gov/MODIS/modis.html>).

Una delle caratteristiche uniche dello strumento MODIS è la sua capacità di "Direct Broadcast" in quanto, oltre a memorizzare i dati, trasmette immediatamente i dati grezzi che possono essere scaricati direttamente con opportuni software. I prodotti standard MODIS vengono utilizzati in differenti campi applicativi per lo studio dei cambiamenti a livello globale. Infatti, oltre a prodotti primari sono disponibili dati per lo studio dell'atmosfera, della terra, della criosfera e degli oceani. Per lo studio delle superfici coltivate la NASA mette a disposizione i seguenti prodotti: Temperatura ed emissività (MOD11), Tipo e dinamica della copertura del suolo (MCD11), indici di vegetazione *NDVI* e *EVI* (MOD13), indice di area fogliare, *LAI* e frazione della radiazione fotosinteticamente attiva, *FPAR*, (MOD15), Funzione della distribuzione bidirezionale di riflessione e Albedo (MCD43) e Evapotraspirazione (MOD16).

Tabella 3.3 - Principali applicazioni del sensore MODIS

Utilizzo principale	Banda	Ampiezza	Ampiezza	Risoluzione spaziale [m]
		della banda [nm] Riflessa	della banda [µm] Emessa	
Territorio/Nuvole/Limiti degli Aerosol	1	620 - 670		250
	2	841 - 876		250
Proprietà della terraferma, delle nubi e degli aerosol	3	459 - 479		500
	4	545 - 565		500
	5	1230 - 1250		500
	6	1628 - 1652		500
	7	2105 - 2155		500
Colore oceano Fitoplancton/ Biogeochimica	8	405 - 420		1000
	9	438 - 448		1000
	10	483 - 493		1000
	11	526 - 536		1000
	12	546 - 556		1000
	13	662 - 672		1000
	14	673 - 683		1000
	15	743 - 753		1000
	16	862 - 877		1000
	Vapore acqueo atmosferico	17	890 - 920	
18		931 - 941		1000
19		915 - 965		1000
Temperatura della superficie e delle nuvole	20		3.660 - 3.840	1000
	21		3.929 - 3.989	1000
	22		3.929 - 3.989	1000
	23		4.020 - 4.080	1000
Temperatura atmosferica	24		4.433 - 4.498	1000
	25		4.482 - 4.549	1000
Vapore acqueo nei cirri	26		1.360 - 1.390	1000
	27		6.535 - 6.895	1000
	28		7.175 - 7.475	1000
Proprietà delle nuvole	29		8.400 - 8.700	1000
Ozono	30		9.580 - 9.880	1000
	31		10.780 - 11.280	1000
Temperatura della superficie e delle nuvole	32		11.770 - 12.270	1000
	33		13.185 - 13.485	1000
Altezza della sommità delle nuvole	34		13.485 - 13.785	1000
	35		13.785 - 14.085	1000
	36		14.085 - 14.385	1000

Il prodotto di temperatura superficiale (MOD11) include la temperatura diurna e notturna, e altre informazioni di tipo ancillare utili per il controllo dell'accuratezza del dato. Tale prodotto è disponibile sia in formato testo che immagine, con una risoluzione temporale giornaliera e di 8 giorni mentre la risoluzione spaziale è di 1 km.

Il prodotto MODIS copertura del suolo (MCD12), contiene tre schemi di classificazione del tipo di copertura del suolo, che descrivono le proprietà della copertura dei suoli ottenute con i dati acquisiti in un anno dalle piattaforme “Terra” e “Aqua”. Lo schema di copertura del suolo identifica diciassette classi di copertura del suolo definite dal Programma Internazionale Geosfera-Biosfera (IGBP), che comprende 11 classi naturali di vegetazione, tre classi di suoli alterati da azioni antropiche e tre classi di suolo non-vegetato. Tale prodotto è disponibile con risoluzione temporale annuale e spaziale di 1 km. Il prodotto relativo agli indici di vegetazione (MOD13) fornisce l’*NDVI* (Normal Difference Vegetation Index) ed *EVI* (Enhanced Vegetation Index) che sono computati dalla riflettanza bi-direzionale della superficie terrestre corretta atmosfericamente, nelle bande del visibile e dell’infrarosso prossimo. Tale prodotto è disponibile con una risoluzione temporale di 16 giorni, mentre la massima risoluzione spaziale può raggiungere 0.25 km. Il prodotto Indice di area fogliare (*LAI*) e Frazione della radiazione fotosinteticamente attiva (*FPAR*) (MOD15), include una stima della qualità, nonché la deviazione standard di ogni variabile. Il prodotto è fornito con una risoluzione temporale di 8 giorni e spaziale di 1 km. Il prodotto albedo (MCD43) fornisce i dati che descrivono la riflettanza emisferica direzionale (black-sky albedo) e la riflettanza bi-emisferica (white-sky albedo) ed è caratterizzato da una risoluzione spazio-temporale di 0.5 km e 16 giorni. Il prodotto Evapotraspirazione (MOD16) include dati relativi all’evapotraspirazione effettiva (ET_e), il flusso di calore latente, l’evapotraspirazione potenziale (PET) e il flusso di calore latente potenziale LE (PLE), con una risoluzione temporale di 8 giorni e spaziale di 1 km. In tale prodotto, il termine evapotraspirativo è stimato utilizzando l’algoritmo proposto da Mu et al. (2011), che è stato implementato rispetto a quello proposto in precedenza (Mu et al., 2007). L’algoritmo per il calcolo è basato sull’equazione di Penman-Monteith (Monteith, 1965). L’evapotraspirazione include l’evaporazione dal suolo e dalle superfici fogliari, nonché la traspirazione attraverso gli stomi delle foglie delle piante. L’algoritmo fa uso di altri prodotti MODIS, tutti caratterizzati da una risoluzione spaziale di 1 km, quali il tipo di copertura del suolo, presente nel prodotto MOD12Q1 (Friedl et al., 2002), la frazione di radiazione fotosinteticamente attiva, FPAR/LAI, riportata nel prodotto MOD15A2 (Myneni et al., 2002), come pure l’albedo, riportato nei prodotti MCD43B2 e MCD43B3 (Lucht et al., 2000; Jin et al., 2003). Per la determinazione dell’evapotraspirazione effettiva sono altresì utilizzati i dati climatici giornalieri dalla banca dati NASA Global Modeling and Assimilation Office (GMAO, v. 4.0.0, 2004).

4. Materiali e metodi

4.1 Descrizione dell'area di studio

Il sub-comprensorio “Garcia Arancio” (figura 4.1) è uno de quattro sub-comprensori gestiti dal Consorzio di Bonifica 3 di Agrigento. Esso si estende sui territori di Sambuca di Sicilia, Sciacca, Menfi, Santa Margherita Belice, Partanna e Castelvetro e utilizza per l'irrigazione, le acque immagazzinate nei serbatoi artificiali Garcia e Arancio, caratterizzate da una capacità di invaso pari rispettivamente a 61.0 e 24.2 Mm³.

L'adduttore “Garcia-Arancio”, con uno sviluppo complessivo di circa 22 Km, interconnette i due invasi, consentendo il trasferimento a gravità di volumi idrici dal lago Garcia all'invaso Arancio. Tale collettore è altresì utilizzato per l'alimentazione della rete di distribuzione irrigua gestita dal Consorzio, oltre che per l'irrigazione di ulteriori superfici gestite dal Consorzio di Bonifica 1 di Trapani.

Dal collettore Garcia-Arancio si dipartono due condotte principali di adduzione e distribuzione denominate “Diramazione Est” (Ø 1.600 mm), a servizio esclusivo del Consorzio di Bonifica 3 e “Diramazione Ovest” (Ø 2.000 mm) che alimenta gli impianti irrigui gestiti dai Consorzi di Bonifica di Agrigento e di Trapani. Tanto la condotta di diramazione est quanto quella di diramazione ovest alimentano, per gravità o per sollevamento, alcune vasche di testata, dalle quali si originano le reti di distribuzione irrigua costituite dalle condotte principali e comiziali, funzionanti a gravità. In relazione alla forma e all'estensione del comprensorio consortile, piuttosto allungata, l'Ente ha ritenuto necessario istituire alcune sedi periferiche ubicate nei territori comunali dove è maggiormente presente l'utenza irrigua (Nino e Guarino, 2011).

La distribuzione a valle delle vasche di testata avviene sempre a gravità, mentre ai serbatoi di testata i volumi idrici pervengono, in relazione alla loro quota altimetrica, per gravità o per sollevamento. Nella porzione di comprensorio a est di Castelvetro e fino al fiume Belice, il territorio è suddiviso in quattro zone irrigue (distretti) caratterizzate da altrettante fasce altimetriche, denominate 1/A, 1/B, 1/D-Est e Basso Belice, estese rispettivamente 3.000 ha, 2.500 ha, 2.000 ha e 1.200 ha.

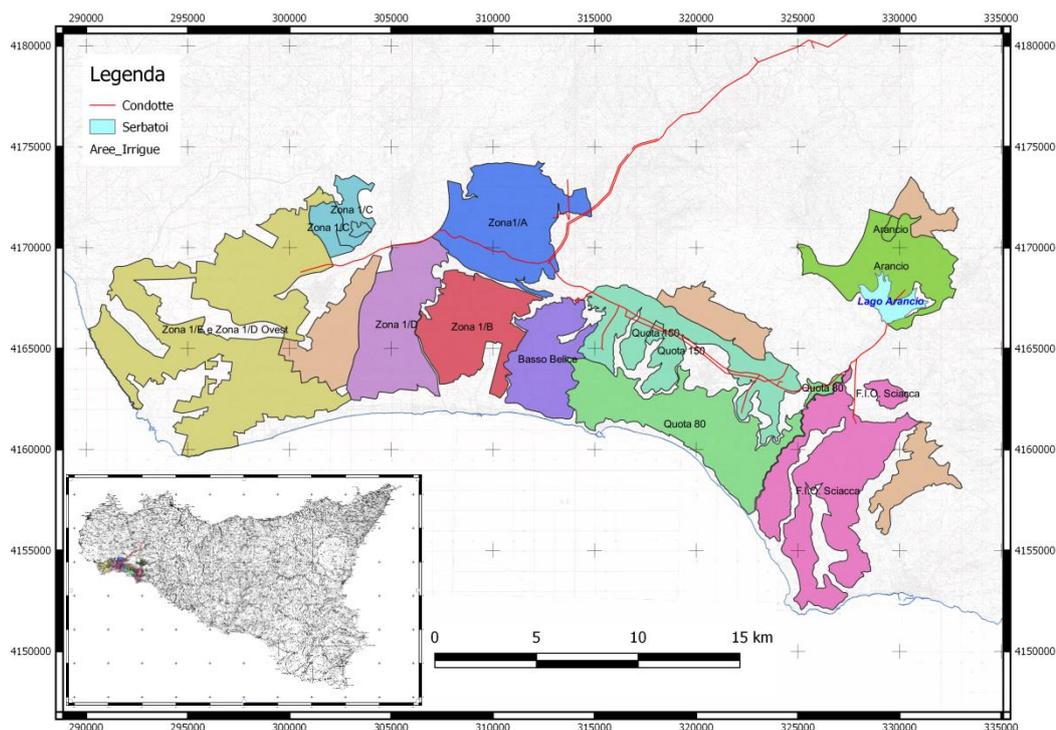


Figura 4.1 - Le zone irrigue del sub-comprensorio “Garcia-arancio”

La zona 1/A nella quale ricade il sito sperimentale, gestita dalla sede periferica di Castelvetro, è ubicata ad est del centro abitato di Castelvetro per un'estensione complessiva di circa 30 Km². Le colture irrigue della zona sono costituite in prevalenza da oliveti da olio e da mensa, agrumeti, vigneti ed ortive di pieno campo.

La caratterizzazione climatica dell'area è stata condotta utilizzando i dati climatici registrati dalla Stazione n° 302 della rete del Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS), ubicata all'interno del comprensorio. Tale stazione acquisisce con scansione oraria la direzione e la velocità del vento a 2 e 10 m, la precipitazione, la radiazione solare, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria.

La configurazione delle stazioni della rete SIAS è costituita da un datalogger Campbell Scientific CR1000 con 16 canali analogici, 2 canali digitali, 8 porte I/O, memoria 2 Mb e un convertitore analogico-digitale a 13 bit; da due sensori per la misura della velocità e della direzione del vento di tipo ultrasonico biassiale, modello Gill Windsonic, installati rispettivamente a 2 e 10 m di altezza dal suolo e infine da un sensore per la misura della temperatura e dell'umidità relativa, modello Vaisala HMP45, costituito da un sensore a termo-resistenza al platino PT1000 per la misura della temperatura e un trasduttore capacitivo per la misura dell'umidità, installato a 2 m dal suolo.

Per valutare l'eventuale variabilità spaziale delle grandezze climatiche acquisite, sono stati acquisiti ed analizzati i dati climatici delle tre stazioni meteorologiche della rete SIAS più vicine a quella di Castelvetro (Contessa Entellina, Mazara del Vallo e Sciacca), rappresentate in figura 4.2.

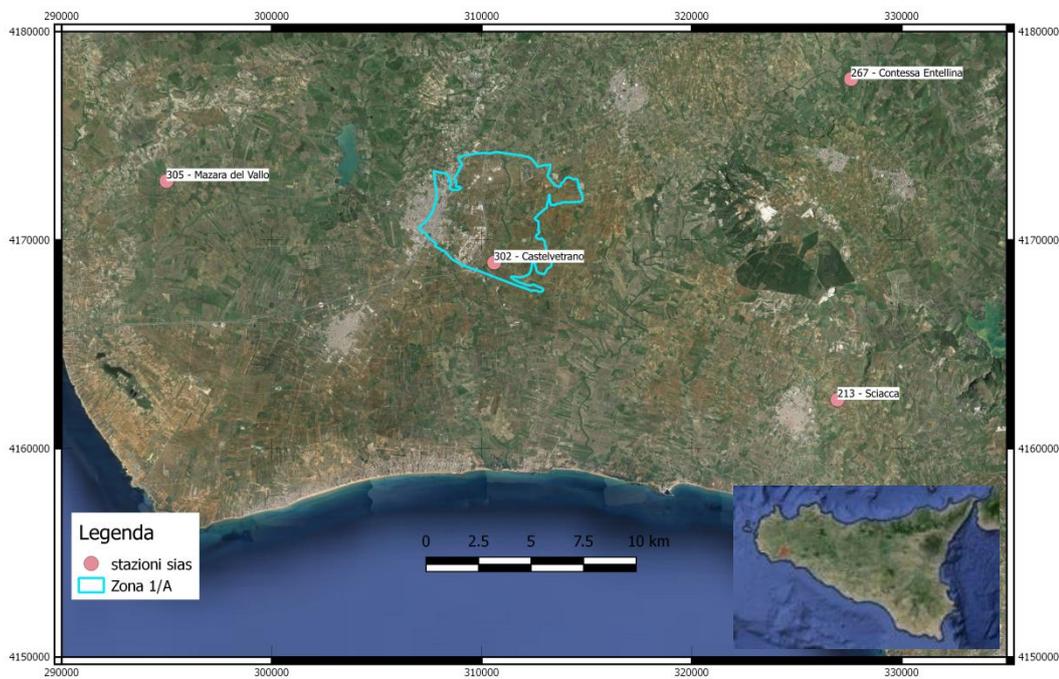


Figura 4.2 - Ubicazione delle stazioni climatiche nell'intorno della zona 1/A del comprensorio irriguo Garcia-Arancio

Con riferimento all'intera superficie della zona 1/A è stata svolta un'indagine per definire i tipi pedologici presenti e l'uso del suolo. È stata pertanto acquisita la cartografia disponibile ed è stato predisposto, utilizzando il software "QGIS", un Sistema Informativo Territoriale, SIT. In tal modo è stato possibile gestire e analizzare dati spaziali associando a ciascun elemento geografico una o più descrizioni alfanumeriche.

Nello specifico, la caratterizzazione dei tipi pedologici presenti nell'area è stata effettuata utilizzando la "Carta dei suoli dell'area Castelvetro est: Contrada Seggio e limitrofe" in scala 1:25.000 (Bono et al., 1998), che è stata dapprima acquisita in formato digitale attraverso uno scanner e successivamente geo-riferita nel sistema UTM ED50, con l'attribuzione di un formato Geotiff mediante il software WGEO. Successivamente è stato creato un nuovo file vettoriale nel quale sono state rappresentate le diverse aree pedologiche caratterizzanti il comprensorio in studio.

La caratterizzazione idraulica di tali suoli è stata effettuata sulla base dei tipi pedologici riscontrati sulla carta, utilizzando il software ROSETTA (Schaap et al., 2001) che, attraverso l'utilizzo di funzioni di pedotrasferimento, ha fornito le caratteristiche idrauliche dei suoli. Con queste informazioni sono state predisposte anche le mappe (raster) dei contenuti idrici del suolo corrispondenti alla capacità di campo ed al punto di appassimento permanente.

L'identificazione dell'uso dei suoli nella zona oggetto di studio è stata effettuata mediante fotointerpretazione delle immagini acquisite da piattaforma satellitare e visualizzabili attraverso il software Google Earth, le cui informazioni hanno permesso la redazione della carta di uso del suolo.

4.2 Acquisizione di dati remoti rilevati dal sensore MODIS

A scala comprensoriale sono stati acquistati alcuni dei prodotti MODIS resi disponibili dal servizio del Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC). Nella tabella 4.1 sono elencati i prodotti utilizzati e le principali caratteristiche.

Tabella 4.1 - Prodotti MODIS considerati nella presente tesi.

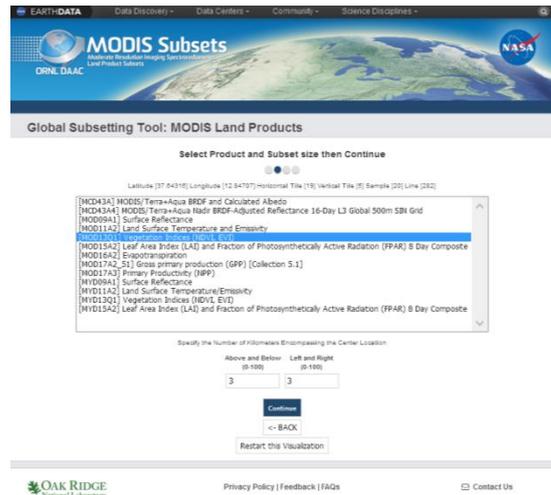
Prodotto	Piattaforma	Descrizione	Frequenza temporale	Risoluzione spaziale	Riferimenti
MOD11A2	Terra	Temperatura superficiale ed emissività	8-giorni	1.0 km	Wan, 1999
MOD13Q1	Terra	Indici di vegetazione	16 giorni	0.25 km	Huete et al., 1999
MCD43A3	Terra + Acqua	Albedo	16 giorni	0.5 km	Strahler et al., 1999
MOD16A2	Terra	Evapotranspirazione	8 giorni	1.0 km	Mu et al., 2011

Per l'intera zona 1/A, i prodotti MODIS sono stati acquisiti per il periodo compreso dal 2009 al 2014, per il quale si disponeva di misure a terra. In particolare, l'utilizzo della banca di dati messa a disposizione dal DAAC (http://daacmodis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl) ha permesso, con pochi semplici passaggi, di acquisire le serie temporali dei prodotti MODIS esaminati nella presente tesi, seguendo la procedura schematicamente indicata in figura 4.3.

In particolare, dopo avere identificato il sito di interesse mediante le sue coordinate spaziali è stato possibile richiedere i dati relativi a una superficie quadrilatera (la cui dimensione del lato può variare da 3 a 200 km).



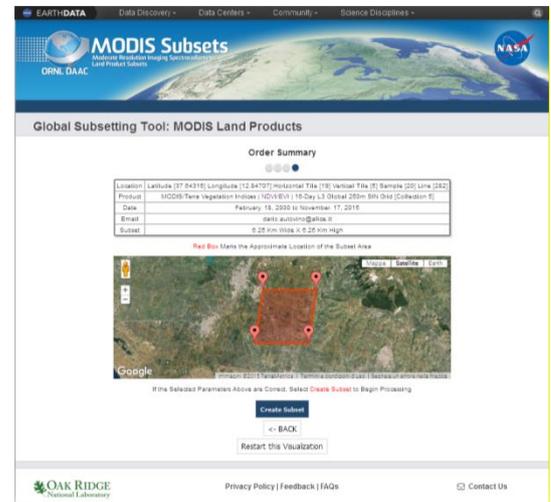
Inserimento delle coordinate del centro dell'area di interesse



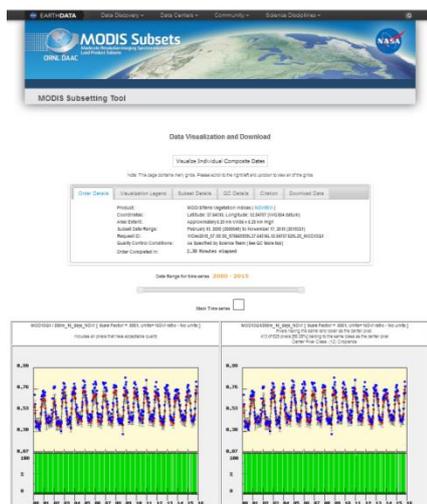
Scelta del prodotto e della dimensione dell'area



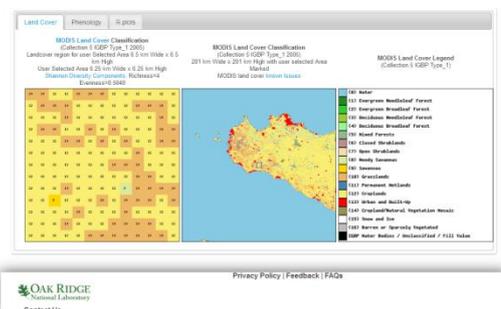
Selezione del periodo di cui si vogliono richiedere i dati



Sintesi finale dell'ordine



Dettagli dell'ordine con indici di qualità e collegamento per l'acquisizione dei dati



Dettagli sull'uso del suolo nell'area di interesse (prodotto MCD12)

Figura 4.3 - Procedura per l'acquisizione dei prodotti MODIS

Considerando che la frequenza temporale dell'albedo (MCD43A3) e dell'*NDVI* (MOD13Q1) è pari a 16 giorni e che durante tale intervallo temporale la variabilità risulta limitata, è stata effettuata una procedura di interpolazione lineare, in modo da allineare i dati alla stessa frequenza temporale degli altri prodotti (8 giorni).

Per l'intera zona di studio sono state quindi predisposte le mappe dei coefficienti colturali, K_c , mediante l'uso congiunto di dati remoti e informazioni di tipo climatico.

A tal fine, seguendo la procedura suggerita da D'Urso et al. (1999), è stata applicata l'equazione 2.12 che ha permesso quindi di analizzare sia la variabilità spaziale che quella temporale dei coefficienti colturali K_c . Nell'applicazione di tale procedura, il valori di radiazione netta, R_n , sono stati ottenuti utilizzando l'equazione 2.4, sulla base dei valori di albedo rilevati dal prodotto MODIS MCD43A3.

Per il calcolo della resistenza aerodinamica, r_a , è stata invece applicata l'equazione 2.9. Considerando che nel comprensorio sono presenti colture arboree caratterizzate da un'altezza superiore ai due metri, è stata considerata la velocità del vento misurata a 10 m. Tale scelta è giustificata dal fatto che non è possibile applicare l'equazione 2.9 se l'altezza della coltura supera quella dell'altezza della misura della velocità del vento. Per l'applicazione di tale equazione inoltre è stata inizialmente effettuata un'analisi di sensitività, che ha permesso di identificare un valore costante ed univoco da assumere per l'altezza della vegetazione.

La resistenza superficiale minima, $r_{c,min}$, è stata calcolata attraverso l'equazione 2.8 che richiede la conoscenza dei valori dell'indice di area fogliare *LAI*.

Le misure dirette dell'indice di area fogliare, anche se molto accurate, richiedono una notevole mole di lavoro in termini di personale coinvolto e pertanto, nel corso degli ultimi anni, si è sempre più frequentemente fatto ricorso a correlazioni tra il *LAI* e gli indici di vegetazione, ottenibili da misure remote. Nella circostanza è stata considerata una relazione lineare valida per tutte le colture presenti nella zona irrigua, tra l'indice di area fogliare e l'indice *NDVI*, ottenibile dal prodotto MODIS MOD13Q1. Tale relazione è stata specificamente calibrata utilizzando sia misure di *LAI* rilevate in campo su diverse colture e in differenti stadi del ciclo fenologico, che i corrispondenti valori di *NDVI*.

Al fine verificare l'influenza della variabilità dell'uso del suolo sui dati acquisiti dal sensore MODIS, è stata generata una griglia vettoriale 3 x 3 km, divisa in celle di 1 km.

Tale griglia è posta nell'intorno dell'azienda nella quale sono state installate le strumentazioni utilizzate per le misure di pieno campo e le celle che la compongono corrispondono alla risoluzione dei pixel MODIS del prodotto MOD16. All'interno della

griglia è stata svolta un'analisi più approfondita dell'uso del suolo, mediante interpretazione delle ortofoto a colori dell'Assessorato Territorio e Ambiente (A.T.A.) rilevate nel periodo 2012-2013, caratterizzate da una risoluzione 25 cm e fornite dal servizio *Web Map Service* (WMS) del S.I.T.R. Sicilia (Figura 4.4).

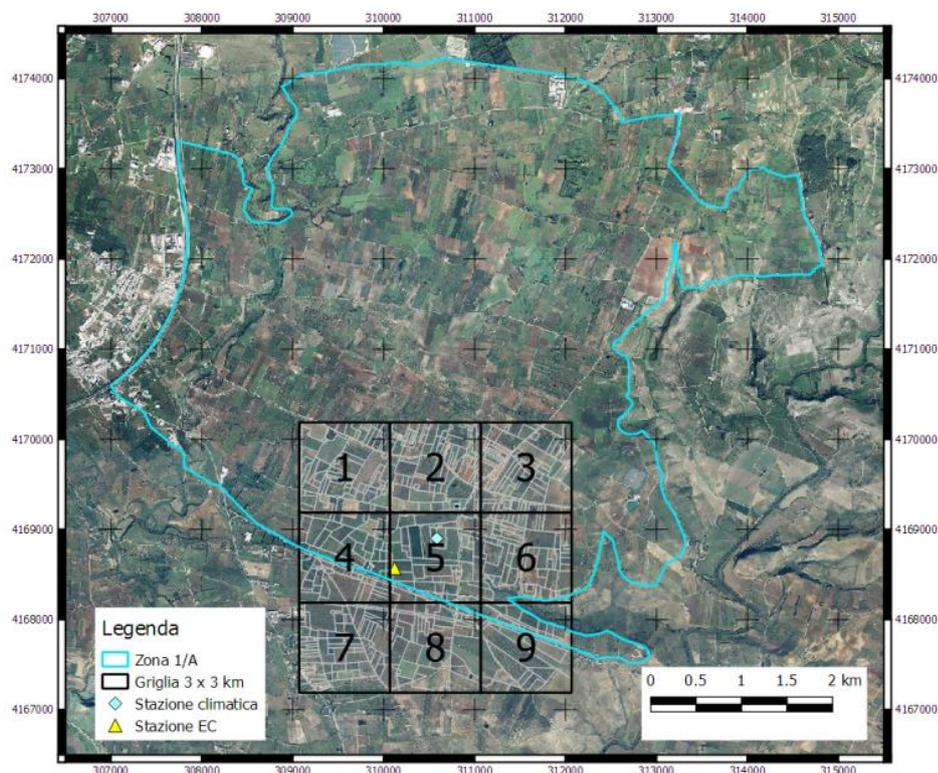


Figura 4.4 - Immagine aerea dell'area di studio, identificazione delle celle della griglia MODIS e localizzazione degli strumenti per il rilevamento dei dati ancillari

In questo modo è stato possibile acquisire informazioni di dettaglio relative all'uso del suolo, verificandone anche l'omogeneità all'interno delle celle della griglia corrispondenti ai pixel MODIS.

4.3 Descrizione dell'azienda ed attività di campo

Le attività sperimentali di pieno campo sono state svolte presso l'azienda agricola "Tenuta Rocchetta", avente un'estensione di circa 30 ha. L'azienda è individuata geograficamente dalle coordinate UTM ED50 (EST 310000; NORD 4168700), presenta una quota media di 123 m s.l.m. e ricade, occupandone circa il 30%, all'interno della cella n.5 della griglia MODIS di 3 x 3 km (Figura 4.5).

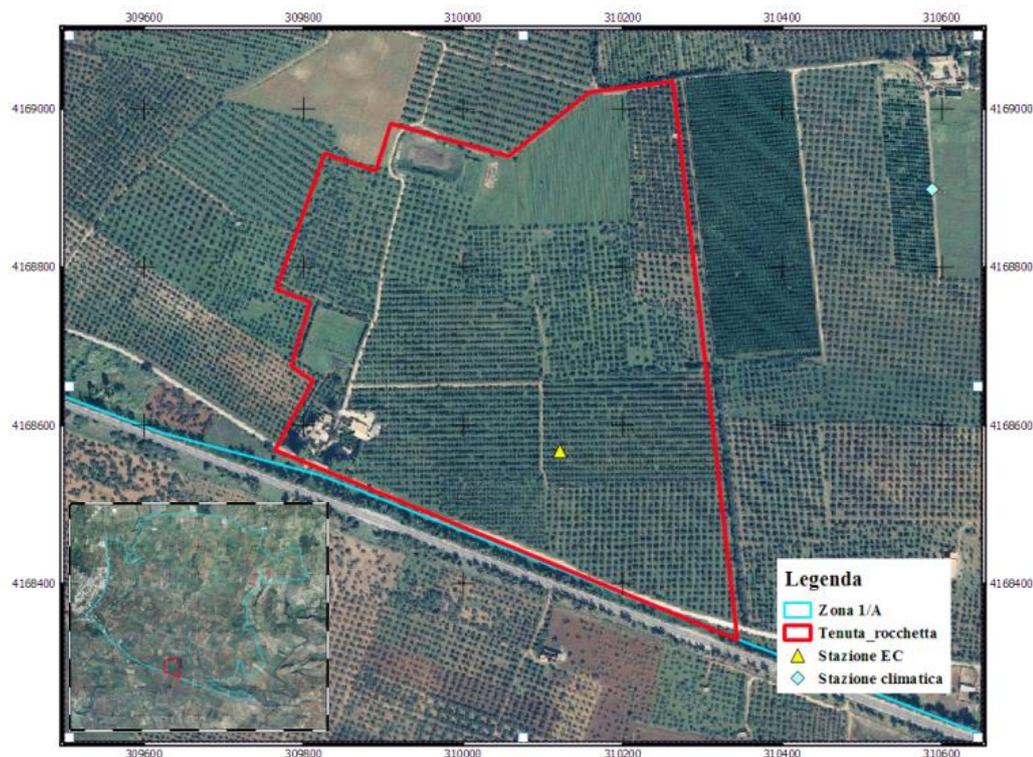


Figura 4.5 - Localizzazione geografica e delimitazione dell'azienda sperimentale "Tenuta Rocchetta"

L'azienda agricola si estende su un territorio con morfologia piuttosto pianeggiante e circa il 90% della superficie aziendale è investita a olivo. La porzione di azienda nella quale sono stati eseguiti i rilievi sperimentali ha un'estensione di 2.5 ha e in essa sono presenti 625 piante di olivo della varietà "Nocellara del Belice". Il sistema di allevamento è a vaso e l'impianto presenta un sesto rettangolare caratterizzato da una distanza tra le file di 8 m e sulla fila di 5 m.

L'irrigazione è effettuata mediante un impianto microirriguo costituito da gocciolatori on-line di portata nominale di 8 l/h in numero di 4 gocciolatori per pianta (due per ciascun lato della pianta), posti ad interdistanza di 1 m.

Il monitoraggio temporale dei flussi evapotraspirativi a livello di parcella è stato eseguito utilizzando la tecnica della correlazione turbolenta (EC), attraverso le acquisizioni effettuate dagli strumenti installati su una torre posta all'interno della azienda, nella posizione indicata in figura 4.5. L'installazione, mostrata in Figura 4.6, ha permesso di ottenere misure ad alta frequenza delle tre componenti del vento e della concentrazione dell'H₂O e della CO₂ utilizzando rispettivamente un anemometro sonico (CSAT3-3D, Campbell Scientific Inc.) ed un analizzatore di gas ad infrarossi (LI7500, Li-cor

Biosciences Inc.). Entrambi gli strumenti sono stati installati a 7 metri di altezza ed hanno acquisito con una frequenza di 20 Hz.



Figura 4.6 - Immagine dell'installazione per la misura dei flussi energetici

Le misure ausiliarie necessarie per la chiusura del bilancio energetico sono state invece acquisite, con cadenza semioraria, da un radiometro netto a quattro componenti (CNR-1 Kipp & Zonen) installato ad un'altezza di 8.5 m, oltre che da due piastre di flusso auto-calibrate installate a 10 cm di profondità, una nella parte di suolo esposto alla luce e l'altra nella parte di suolo in ombra. Tutti i dati sono stati memorizzati in un datalogger CR5000 (Campbell Scientific. Inc.) munito di una memory card PCMCIA.

Al fine di poter elaborare i dati è stata effettuata una analisi preliminare di chiusura del bilancio attraverso la stima del rapporto di chiusura, CR (equazione 3.15) calcolato sulla base della procedura proposta da Prueger et al., (2005).

Per escludere le ore notturne e i periodi nuvolosi, sono state considerate soltanto le misure in cui la radiazione solare (R_s) ha superato i 30 Wm^{-2} e i dati in cui il CR ha assunto valori compresi tra 0.85 e 1.15.

Inoltre, i termini del bilancio energetico sono stati corretti mediante le equazioni 3.17 e 3.18, in modo da mantenere costante il rapporto di Bowen, β_w , tra il flusso sensibile e latente misurati, seguendo la procedura proposta da Twine et al. (2000). I dati sono stati

elaborati in modo da essere ricondotti ad una scansione temporale giornaliera nell'intero periodo di indagine compreso dal 1/01/2009 al 31/12/2014 e successivamente aggregati ad 8 giorni.

All'interno dell'azienda sono state scelte tre piante, (indicate, con S1, S2 e S3 in figura 4.7) nell'intorno delle quali è stata effettuata la caratterizzazione idraulica e il monitoraggio dello stato idrico del suolo e sulle quali sono stati monitorati i flussi traspirativi.



Figura 4.7 - Porzione dell'azienda nella quale sono state effettuate le indagini sperimentali

Per la caratterizzazione fisica e idraulica dei suoli sono stati utilizzati i dati di uno studio condotto in precedenza (Rallo, 2010). In particolare sono state analizzate le principali proprietà idrologiche, nonché la composizione granulometrica di quattro strati di suolo localizzati a 0, 30, 60 e 100 cm dalla superficie del suolo. Le analisi granulometriche sono state svolte nel laboratorio di idrologia del suolo del dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (SAF) e hanno permesso la classificazione USDA dei suoli attraverso la stima delle tre principali classi granulometriche (argilla, limo e sabbia).

La metodologia applicata ha seguito i protocolli suggeriti nella normativa UNI-10006 utilizzando l'idrometro di Bouyoucos (ASTM 152H). Per la determinazione delle proprietà idrauliche del suolo, quali la curva di conducibilità e di ritenzione idrica, è stato aperto un

profilo, nel quale sono stati prelevati campioni di suolo indisturbati. Per la determinazione della curva di conducibilità $K(\psi)$ in condizioni sature e prossime alla saturazione è stato utilizzato il metodo dell'infiltrometro a depressione (Logsdon et al., 1993) e quello del Simplified Falling-Head, SFH (Bagarello et al., 2004).

Per la determinazione della curva di ritenzione $\psi(\theta)$ sono stati prelevati dei campioni di suolo di diametro pari ad 8 cm ed altezza di 5 cm, sui quali sono stati misurati i valori del contenuto idrico corrispondenti a distinti valori del potenziale matriciale, dalla saturazione e fino a -1500 kPa (punto di appassimento permanente). Per valori di potenziale matriciale ($\psi \leq 10$ kPa) è stato utilizzato il metodo tensiometrico (Dane e Hopmans, 2002a) mentre per $\psi > 10$ kPa è stato utilizzato il metodo pressiométrico (Dane e Hopmans, 2002b). Le coppie di valori $K(\psi)$ e $\psi(\theta)$, ricavate sperimentalmente, sono state interpolate utilizzando il software RETC (van Genuchten et al., 1991), che ha permesso di determinare i parametri delle funzioni idrauliche. L'andamento temporale del contenuto idrico del suolo durante il periodo di indagine (stagioni irrigue 2011 e 2012) è stato monitorato utilizzando la tecnica FDR (Frequency Domain Reflectometry). È stato in particolare utilizzato il sensore Diviner2000 della Sentek, il cui uso, richiede l'installazione di appositi pozzetti di misura nel suolo. Con tale tecnica è stato possibile acquisire misurazioni a diverse profondità in corrispondenza dell'apparato radicale di singole piante, ottenendo così i profili di umidità del suolo. I pozzetti di misura sono stati installati nell'intorno della pianta S2 (figura 4.5) dove, a seguito di un adacquamento, si verificano le maggiori variazioni di contenuto idrico. Sono stati in particolare installati 16 pozzetti di misura distribuiti secondo lo schema di figura 4.8.

Nel corso dell'installazione dei pozzetti di misura del contenuto idrico del terreno, sono stati prelevati i campioni di suolo indisturbato, dai quali sono state estratte le radici delle piante, in modo da acquisire le necessarie informazioni relative alla distribuzione spaziale dell'apparato radicale. A tal fine, in corrispondenza di ciascun pozzetto di misura sono stati prelevati campioni cilindrici del diametro di 5 cm ed altezza 15 cm.

Il campionamento ha interessato pertanto gli strati: 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75, 75-90 e 90-105 cm, per un numero totale di campioni estratti pari a 112. Dopo il prelievo, i campioni sono stati conservati alla temperatura di 4°C, per evitare il deterioramento delle radici, fino a quando, attraverso una procedura standard di lavaggio e filtrazione, si è proceduto all'estrazione delle radici seguendo la procedura proposta da Newman (1966), schematicamente rappresentata in figura 4.9.

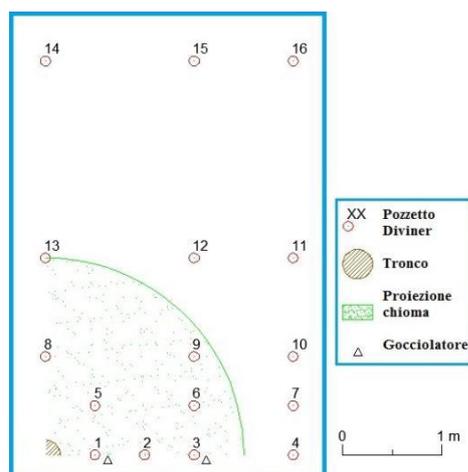


Figura 4.8 - Schema di installazione dei pozzetti FDR

Ciascun campione di suolo è stato posto all'interno di contenitori plastici che sono stati colmati con una soluzione disperdente di esametafosfato di sodio al 10% e agitati periodicamente per almeno 24 ore. Per facilitare la frammentazione degli aggregati di maggiori dimensioni, ciascun campione, è stato sottoposto ad una ulteriore agitazione meccanica con l'ausilio di un agitatore con alette in plastica, in modo tale da evitare la rottura delle radici. Il campione è stato quindi riversato all'interno di un setaccio a maglia quadrata di 0.5 mm e lavato con acqua corrente in modo da allontanare le frazioni fini di suolo. La parte rimanente sullo staccio è stata sottoposta a essiccazione dentro una stufa a ventilazione forzata alla temperatura di 40°C per 12 ore. Il campione, costituito da radici scheletro e sabbia, è stato infine sottoposto a un processo di flottazione in acqua in modo da separare le radici (parte galleggiante) dalla parte più pesante (suolo e scheletro). Le radici campionate sono state infine essiccate in stufa a ventilazione forzata a una temperatura di 40°C per ulteriori 12 ore e quindi poste su uno scanner, in modo da acquisire le immagini digitali.

Le immagini acquisite sono state elaborate utilizzando il software Image-Pro Plus 6.0 (Media Cybernetics, Silver Spring, US) che ha permesso di determinare il numero e la

lunghezza delle singole radici presenti in ciascun campione. Per fare ciò è stato dapprima impostato il sistema metrico di riferimento, mediante l'uso di un righello, la cui immagine è stata acquisita insieme a quella delle radici. L'immagine è stata successivamente modificata al fine di fare apparire le radici in bianco su sfondo nero.

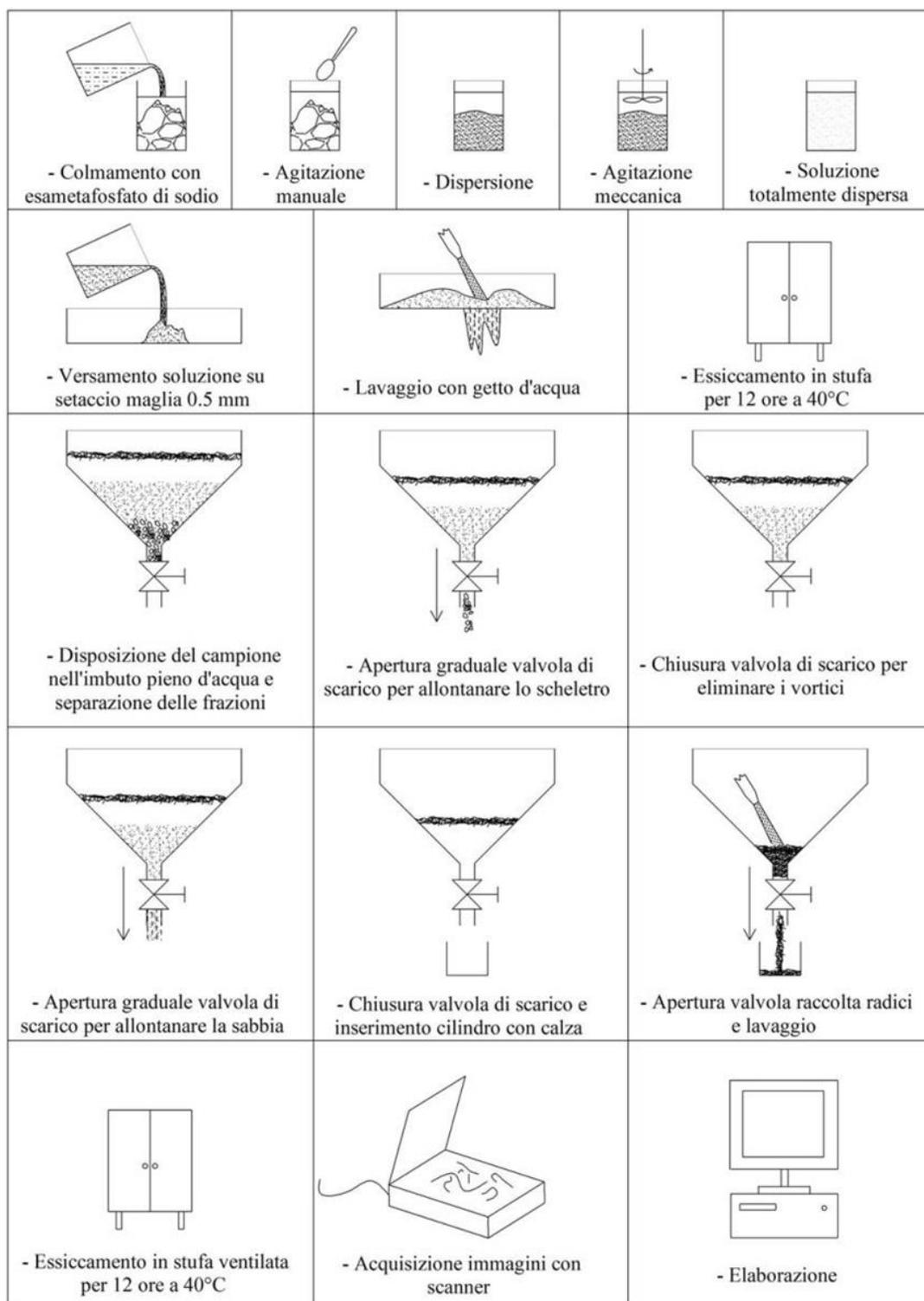
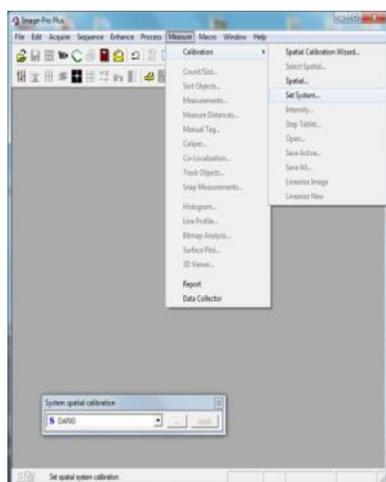
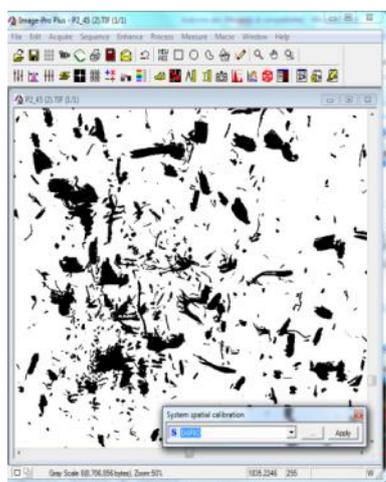


Figura 4.9 - Procedura utilizzata per la determinazione della densità radicale

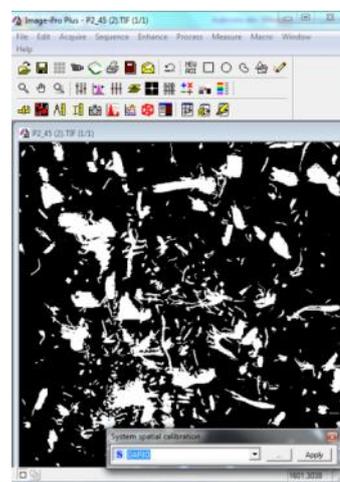
L'uso del software di acquisizione ha permesso, attraverso l'applicazione di un filtro morfologico (skeleton), di "scheletrizzare" le radici, in modo da trasformare la superficie di proiezione di ciascuna radice in una linea corrispondente all'asse. La figura 4.10 riporta la procedura seguita per l'analisi delle immagini.



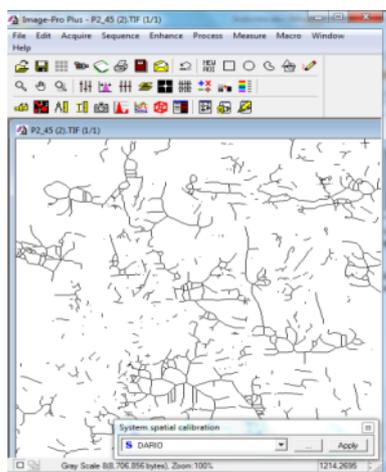
Impostazione del sistema metrico di riferimento



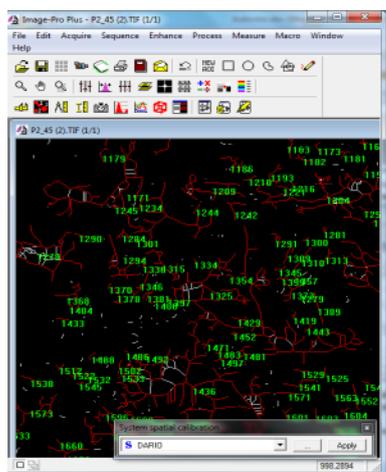
Apertura file



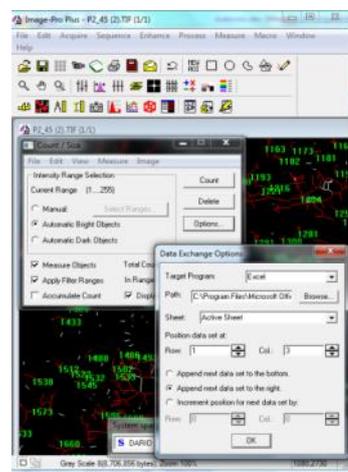
Inversione dell'immagine



Applicazione del filtro morfologico Skeleton



Misurazione e conta



Esportazione dei dati

Figura 4.10 - Procedura utilizzata per l'analisi dell'immagine delle radici selezionate su singoli campioni di suolo con il software ImagePro-Plus

Al fine di verificare l'accuratezza della metodologia, con riferimento alle radici estratte da uno dei campioni di suolo, è stata ripetuta la stessa procedura dieci volte, dopo avere modificato la posizione delle singole radici sul piano dell'immagine.

I dati acquisiti hanno permesso di determinare il parametro RLD [cm cm^{-3}] che rappresenta la lunghezza delle radici fini (< 2 mm) per unità di volume di suolo; tale parametro è stato ottenuto dividendo la somma delle lunghezze relative ad elementi di lunghezza maggiore a 2 mm per il volume di suolo campionato.

Il monitoraggio dei consumi idrici della pianta è stato effettuato attraverso l'ausilio dei misuratori di flusso linfatico tipo Granier. Le misure di flusso sono state eseguite durante le stagioni irrigue 2011 e 2012, ed hanno permesso una stima reale e diretta del consumo di acqua da parte di ciascuna pianta. La figura 4.11 mostra l'installazione sperimentale utilizzata nel corso dell'indagine.



Figura 4.11 - Stazione per la misura dei flussi linfatici e vista del datalogger di installazione

I flussi linfatici sono stati in particolare misurati sulle stesse tre piante S1, S2, S3 (Figura 4.7 - Porzione dell'azienda nella quale sono state effettuate le indagini sperimentali), su ciascuna delle quali sono state installate due coppie di sensori collegate a un datalogger Campbell CR1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah), che ha effettuato l'acquisizione ogni 15 minuti.

Al fine di evitare fenomeni di embolia, l'installazione dei sensori, che prevede la perforazione del fusto per circa 4 cm, è stata eseguita durante le ore notturne in corrispondenza della minima attività traspirativa dalla pianta. I sensori, costituiti da una coppia di aghi, ciascuno contenente una termocoppia e avvolti con un rivestimento resistivo, sono stati inseriti radialmente nel tronco ad una distanza verticale di circa 10 cm uno dall'altro (figura 4.11) e protetti dalle escursioni termiche esterne mediante fogli isolanti in termoflex.

La differenza di temperatura, ΔT , che si genera tra il sensore superiore (costantemente riscaldato) e quello inferiore (che registra la temperatura del legno) rappresenta un indice dell'attività traspirativa della pianta, espressa come variazione della densità di flusso, che può essere calcolata utilizzando la relazione proposta da Granier (1985, 1987). L'aggregazione dei dati rilevati ha permesso di calcolare i valori orari e quelli giornalieri dei flussi linfatici.

La determinazione dell'area conduttiva del tronco (sapwood), necessaria per la stima della traspirazione, è stata eseguita per via colorimetrica su carote di legno estratte da più punti del tronco di piante di olivo grazie all'ausilio del succhiello di Pressler.

Le carote estratte sono state immerse all'interno di un liquido colorante (metil-arancio) che, reagendo con la linfa ha messo in risalto la parte conduttiva. La carota di legno colorata è stata quindi acquisita come immagine e, attraverso una procedura di Image analyzer, eseguita col software Image-Pro, sono stati costruiti i profili di variazione di intensità di colore. La Figura 4.12 mostra un esempio di carota di legno e il diagramma colorimetrico corrispondente usato per la determinazione degli estremi del sapwood. La misura dello spessore del sapwood è stata eseguita su otto carote estratte in corrispondenza delle sei sonde installate sulle 3 piante.

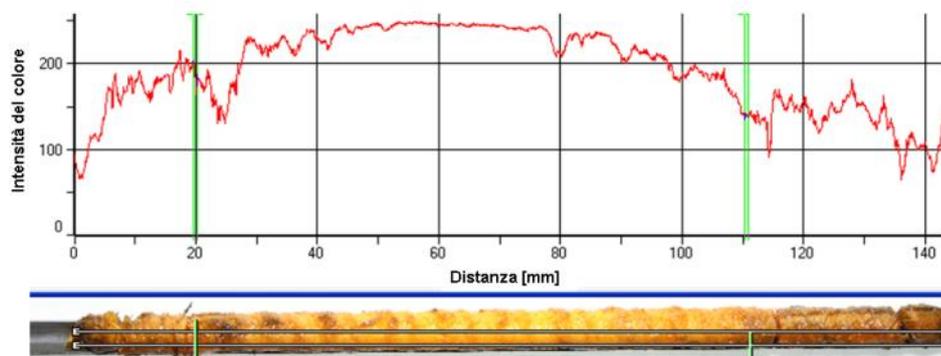


Figura 4.12 - Carota estratta dal tronco con diagramma colorimetrico per la determinazione del sapwood

4.4 Parametrizzazione del modello HYDRUS-2D

Con riferimento alla scala della singola pianta è stato utilizzato il codice HYDRUS-2D (Šimunek et al., 1999), con l'intento di simulare e validare la dinamica spazio-temporale del contenuto idrico del suolo e l'evoluzione temporale dei flussi traspirativi di piante di olivo, utilizzando due distinte metodologie di applicazione irrigua e assumendo due distinti

modelli della funzione di stress. Le simulazioni sono state condotte a scala giornaliera con riferimento alla pianta S2 (Figura 4.7), per la quale è stata anche determinata la distribuzione spaziale dell'apparato radicale ed ha interessato un periodo di 731 giorni dall'01/01/2011 al 31/12/2012. In relazione alla lunga durata degli adacquamenti è stato in particolare ipotizzato uno schema di moto piano, ortogonale alla direzione della linea gocciolante. Per la parametrizzazione idraulica del suolo sono stati utilizzati i parametri delle funzioni idrauliche di van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980), determinate sperimentalmente sui quattro strati di suolo descritti nel paragrafo 4.1. Il dominio del campo di moto considerato è stato definito considerando una profondità di 150 cm ed una larghezza di 400 cm, pari alla metà della distanza tra le file. La figura 4.13 mostra la geometria del campo di moto utilizzata nelle simulazioni.

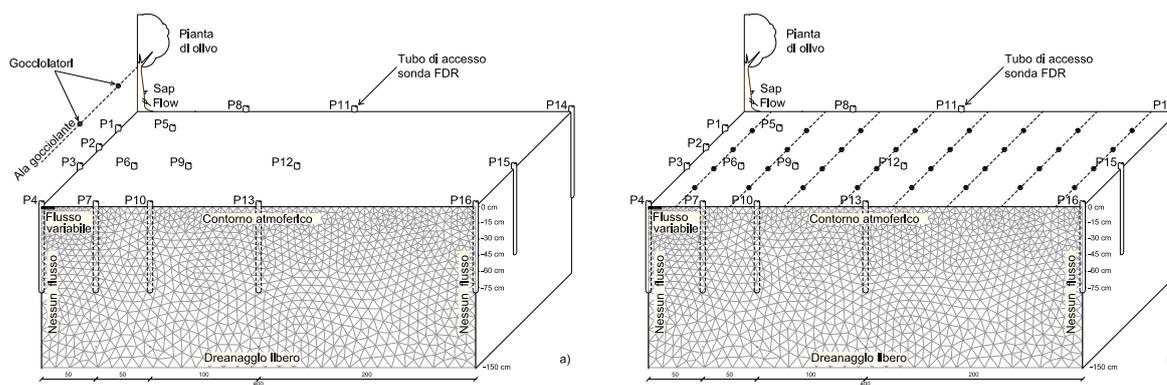


Figura 4.13 - Schematizzazione del dominio di moto nel modello di simulazione con l'indicazione dei tubi di accesso della sonda FDR e del sistema di irrigazione, utilizzato nel 2011 (a) e nel 2012 (b)

Il dominio è stato discretizzato con una mesh triangolare costituita da 2147 triangoli e 1134 nodi, raffittita in prossimità dei gocciolatori, dove avvengono rapide variazioni di contenuto idrico nel corso degli adacquamenti.

Nelle simulazioni condotte per l'anno 2011, il valore iniziale di contenuto idrico del terreno è stato assunto costante lungo il profilo e pari a $0.25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Tale assunzione non ha influenzato i valori di contenuto idrico rilevati nel corso della stagione irrigua, per i quali è stato effettuato il confronto con le misure.

Lungo i due lati del campo di moto è stata ipotizzata l'assenza di flusso, mentre lungo il contorno inferiore è stata assunta la condizione di drenaggio libero, atteso che non è presente né una falda e neppure uno strato impermeabile. Lungo il contorno superiore è

stata invece impostata la condizione di flusso atmosferico, ad eccezione dei tre nodi localizzati sotto l'ala gocciolante, per i quali è stata considerata la condizione di flusso variabile nel tempo, che ha permesso di simulare gli apporti irrigui. Le simulazioni condotte nel 2012 invece, hanno tenuto conto di una diversa distribuzione irrigua, che è stata effettuata ponendo una rete di erogatori sull'intera superficie dominata dalla pianta, cosicché i volumi di adacquamento hanno interessato tutti i nodi posti sul contorno superiore del campo di moto.

Nelle simulazioni relative al 2011, il flusso idrico nel corso di un adacquamento è stato stimato dividendo il volume idrico fornito ad una pianta dalla linea gocciolante per l'area bagnata, considerata larga 25 cm e lunga 500 cm, pari alla distanza tra le piante sulla fila. Considerando che durante la stagione irrigua sono stati effettuati quattro adacquamenti, ciascuno di circa 400 litri per pianta il flusso è risultato pertanto pari a:

$$q = \frac{\text{Volume adacquamento [cm}^3 \text{ giorno}^{-1}]}{\text{Area bagnata [cm}^2]} = \frac{400000 \text{ cm}^3 \text{ giorno}^{-1}}{12500 \text{ cm}^2} = 32 \text{ cm giorno}^{-1}$$

Il valore di potenziale minimo consentito sulla superficie del suolo (h_{critA}) che influenza il processo evaporativo del terreno è stato assunto pari a 12000 cm.

La stima flussi giornalieri di traspirazione massima, T_m , e di evaporazione massima, E_m , è stata effettuata sulla base dei valori di evapotraspirazione in condizioni di riferimento, ET_0 , utilizzando rispettivamente le equazioni 2.32 e 2.39 proposte da Allen et al (1998). In accordo con quanto suggerito da Allen e Pereira (2009), sono stati assunti i seguenti coefficienti colturali: $K_{cb_ini}=0.3$ nel periodo compreso da gennaio a metà aprile, $K_{cb_med}=0.35$ per il periodo da metà aprile a metà luglio e $K_{cb_end}=0.3$ per il periodo da metà luglio a dicembre.

Le simulazioni hanno altresì considerato due diversi modelli della funzione di stress per la pianta, espresse come coefficienti di riduzione dell'attingimento idrico radicale ed in particolare il modello lineare ed il modello sigmoidale. I parametri di tali funzioni, ricavati sperimentalmente per la coltura dell'olivo da Rallo e Provenzano (2013), sono risultati pari a $\psi_1 = -1$ cm, $\psi_2 = -1$ cm, $\psi_3 = -4000$ cm, $\psi_4 = -20000$ cm (funzione lineare) e pari a $\psi_{50} = -15200$ cm e $P_3 = 4.284$ (funzione sigmoidale). Per ulteriori dettagli si rinvia alla pubblicazione originale (Rallo e Provenzano, 2013)

4.5 Parametrizzazione del modello FAO-56

Per il periodo compreso tra il 2009 ed il 2014 è stata altresì effettuata un'applicazione del modello FAO-56 (Allen et al., 1998), al fine di valutarne l'utilizzabilità per la stima dell'evapotraspirazione effettiva a scala di parcella irrigua. Dopo la necessaria validazione, l'uso del modello può consentire, ad una scala spaziale più ampia, la stima dei consumi evapotraspirativi effettivi delle colture a livello comprensoriale da utilizzare, ad esempio, per la gestione dell'irrigazione. Ovviamente, tale applicazione può essere condotta nell'ipotesi che i consumi evapotraspirativi effettivi della vegetazione siano correttamente simulati ed inoltre che risultino disponibili le variabili di input adeguate alla scala di indagine più ampia.

Nella presente tesi, la validazione del modello è stata eseguita con riferimento all'azienda "Tenute Rocchetta", nella quale sono state condotte le attività sperimentali di pieno campo. Successivamente, l'applicazione del modello è stata condotta a scala distribuita utilizzando un codice di calcolo preventivamente predisposto ed implementato nel pacchetto software Erdas-Imagine, finalizzato alla manipolazione di dati geografici ed immagini telerilevate.

Nello specifico, i valori di evapotraspirazione di riferimento sono stati ricavati mediante l'equazione di Penman-Monteith utilizzando i dati climatici registrati a terra, mentre i valori di capacità idrica di campo e coefficiente di appassimento permanente sono stati stimati attraverso le funzioni di pedo-trasferimento, sulla base delle informazioni dedotte dalla carta pedologica. Inoltre, le caratteristiche colturali dell'olivo quali la profondità dell'apparato radicale, Z_r , ed il fattore di deplezione, p , sono state dedotte sulla base delle indicazioni fornite dal quaderno FAO-56. Noti questi dati, è stato possibile ricavare sia il volume idrico totale disponibile (TAW), che la frazione di TAW che la pianta può attingere prima che riduca i consumi traspirativi in conseguenza dell'insorgenza di fenomeni di stress idrico.

Sono state condotte due distinte simulazioni nelle quali i valori dei coefficienti colturali, sono stati rispettivamente assunti pari a quelli proposti da Allen e Pereira (2009) ed a quelli analiticamente determinati utilizzando i valori di LAI ed albedo rilevati da remoto ed elaborati secondo la procedura proposta da D'Urso et al. (1999, 2001).

Per quanto riguarda i coefficienti tabellati, in relazione alla presenza di vegetazione spontanea nel periodo autunno-vernino, è stato considerato per il $K_{c,ini}$ e $K_{c,end}$ un valore

pari a 0.8, mentre nella stagione di pieno sviluppo è stato assunto un valore di $K_{c,mid}$ pari a 0.50, atteso che con le lavorazioni primaverili ed estive del terreno la vegetazione spontanea viene generalmente rimossa. La durata delle diverse fasi del ciclo colturale è stata determinata sulla base dei valori dell'indice $NDVI$ relativi all'area in esame.

Con riferimento agli interventi irrigui, sono stati infine acquisiti i calendari dei volumi forniti dall'agricoltore nel corso delle sei stagioni irrigue, che sono stati opportunamente scalati per tenere conto delle superfici effettivamente irrigate.

4.6 Stima diretta dell'evapotraspirazione effettiva mediante l'uso congiunto dell'equazione di Penman-Monteith e di un modello di resistenza superficiale basato su dati remoti.

Al fine di proporre una nuova procedura per la stima dell'evapotraspirazione effettiva a scala territoriale è stata condotta una specifica indagine finalizzata alla stima indiretta del termine di resistenza superficiale r_c , che compare nell'equazione di Penman-Monteith.

Il modello proposto ipotizza la dipendenza funzionale della resistenza superficiale dalla temperatura della superficie terrestre (Land Surface Temperature), LST , ottenibile dal prodotto MOD11A2 di MODIS. Per definire tale relazione è stato considerato un indice termico di vegetazione (Thermal Vegetation Index), VTI , definito come:

$$VTI = \frac{LST_i - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (4.1)$$

nella quale LST_i è la temperatura della superficie terrestre giornaliera, mentre LST_{max} e LST_{min} rappresentano rispettivamente la temperature giornaliera massima e minima osservata all'interno di un periodo temporale sufficientemente ampio e quindi idoneo a spiegare la variabilità stagionale e annua del parametro r_c .

Nel presente studio, per valutare l'indice termico di vegetazione, VTI , utilizzato per la stima indiretta della resistenza superficiale, r_c , è stata considerata solo la temperatura superficiale della cella centrale della griglia considerata e rappresentata in figura 4.4.

La Figura 4.14 mostra il diagramma di flusso della metodologia utilizzata per la stima della resistenza superficiale r_c e per l'identificazione della relazione $r_c = f(VTI)$. La procedura è stata applicata utilizzando il database di dati disponibili e relativi al periodo 2009-2014, in

modo che il primo biennio fosse utilizzato per la calibrazione del modello di resistenza superficiale, mentre i restanti dati per la sua validazione.

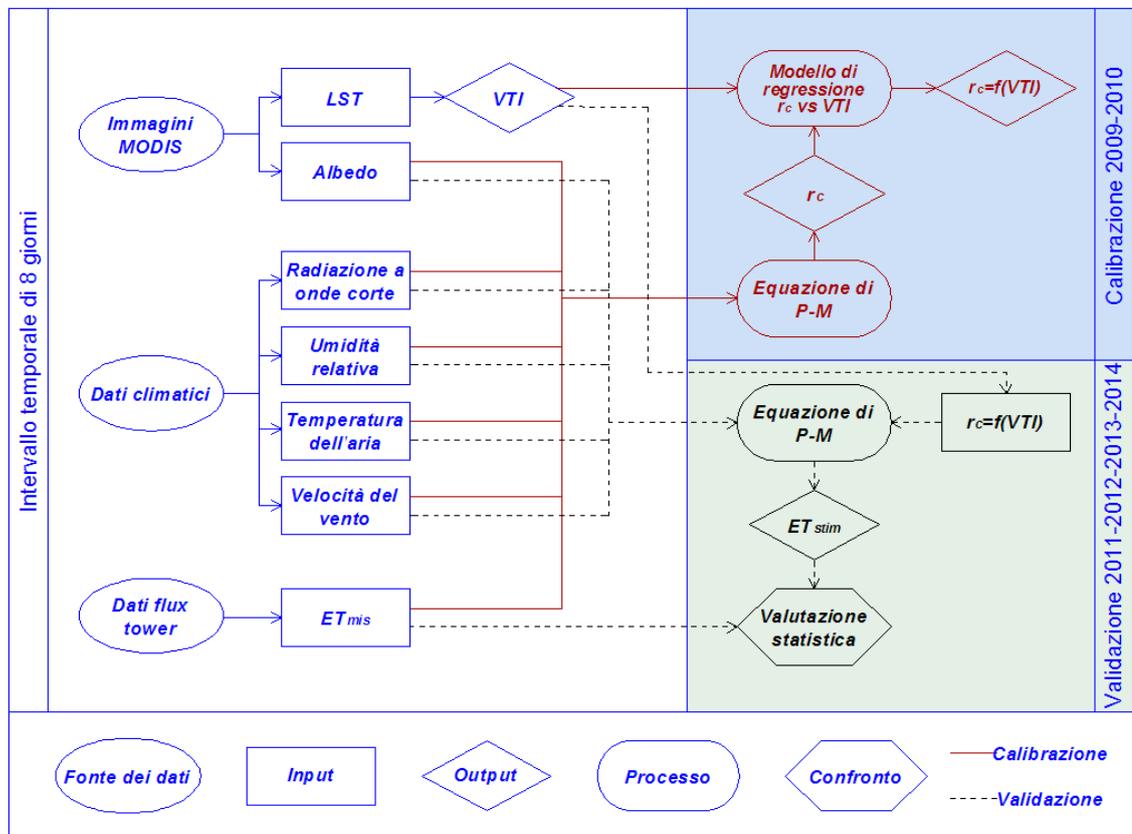


Figura 4.14 - Diagramma di flusso del metodo di stima della resistenza superficiale

In una prima fase, sia i dati climatici che i valori di evapotraspirazione effettiva, ET_e , misurati con la torre di Eddy Covariance, sono stati aggregati ad un periodo di otto giorni in modo da risultare allineati alla risoluzione temporale dell'albedo e della temperatura superficiale rilevate dai dati MODIS.

Nello specifico, per la cella centrale della griglia esaminata, in cui ricadono le strumentazioni a terra e per il periodo di calibrazione (2009-2010), i valori di ET_e e i dati climatici hanno permesso di valutare la resistenza superficiale, r_c (equazione 2.15), i cui valori sono stati messi in relazione con i corrispondenti VTI , ottenuti dai prodotti MODIS. Ai fini della validazione (2011-2014) i valori di ET_e , ottenuti utilizzando il modello di resistenza superficiale, sono stati infine confrontati con i corrispondenti valori misurati dalla torre.

4.7 Analisi statistica dei dati

L'affidabilità dei modelli utilizzati nel presente studio è stata analizzata sulla base dei valori della radice dell'errore quadratico medio (Root Mean Square Error, *RMSE*) (Kennedy e Neville, 1986), dello scostamento medio (*Bias*) e medio percentuale (*PBias*) (Gupta et al., 1999), nonché dell'indice di efficienza di Nash, *NSE*, (Nash-Sutcliffe Efficiency, Nash e Sutcliffe, 1970), valutati come indicato in tabella 4.2.

Tabella 4.2 - Indici utilizzati per le valutazioni statistiche

Index	Formula	Variabili
<i>RMSE</i>	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{mis,i} - X_{stim,i})^2}{N}}$	X_{mis} = valori misurati X_{stim} = valori stimati al tempo i esimo.
<i>Bias</i>	$\frac{\sum (X_{stim,i} - X_{mis,i})}{N}$	N è il numero di dati misurati
<i>PBias</i>	$\frac{Bias}{\left(\frac{1}{N}\right) \sum X_{mis}} \times 100$	
<i>NSE</i>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mis,i} - X_{stim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{mis,i} - \bar{X}_{mis})^2}$	

L'indice *RMSE* ha il vantaggio di quantificare l'errore con la stessa unità di misura della variabile originale, mentre il *Bias* e *PBias* misurano la tendenza media dei dati simulati a essere maggiori o minori rispetto ai corrispondenti misurati e, infine, l'indice *NSE* è utilizzato per valutare le capacità predittive di un modello. Valori di *RMSE*, *Bias* e *PBias* tendenti a 0 indicano che i valori stimati non si discostano dalle misure. Valori positivi del *Bias* indicano una sovrastima del modello, mentre valori negativi un certo livello di sottostima.

L'indice *NSE* può assumere valori compresi tra $-\infty$ e 1. Valori dell'indice pari a 1 indicano il perfetto adattamento tra i dati stimati e quelli misurati, valori compresi tra 0 e 1 indicano in generale una accettabile performance del modello mentre invece, valori inferiori a 0 indicano che la media dei valori misurati risulta essere più affidabile rispetto alla stima del modello, indicando quindi la scarsa attendibilità dei dati ottenuti dall'applicazione del modello (Moriasi, et al., 2007).

5. Risultati e discussione

5.1 Caratterizzazione agro-climatica dell'area di studio

Nel seguente capitolo sono dapprima riportati i risultati riguardanti la caratterizzazione del sistema SPA alle differenti scale spaziali e successivamente, per ciascuna scala di indagine, sono presentati e discussi i risultati delle applicazioni modellistiche condotte.

E' stata in primo luogo valutata la variabilità dei dati climatici nell'intorno della zona di interesse, acquisendo ed esaminando le diverse variabili agro-climatiche delle stazioni della rete del SIAS, più prossime a quella di Castelvetro. Sono stati in particolare considerati i dati acquisiti nel periodo 2009-2014 dalle stazioni meteorologiche di Contessa Entellina, Mazara del Vallo e Sciacca e confrontati con i corrispondenti valori delle diverse variabili climatiche registrati dalla stazione di Castelvetro.

La tabella 5.1 riporta i valori di precipitazione totale annua, come pure i valori medi annui della velocità del vento misurata a 2 m dal suolo, della radiazione solare, della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria ed i valori di evapotraspirazione di riferimento. Come si può notare, nel periodo considerato le diverse stazioni termo-pluviometriche mostrano valori alquanto simili per tutte le grandezze meteorologiche. Le maggiori differenze riscontrate riguardano la velocità media del vento che, per la stazione di Castelvetro è risultata inferiore rispetto a quella delle altre stazioni. Inoltre, per la stazione di Mazara del Vallo, si nota che il valore minore della radiazione solare determina una minore evapotraspirazione di riferimento rispetto alle altre stazioni esaminate.

Tuttavia, considerate le modeste differenze riscontrate ed inoltre che la stazione termo-pluviometrica di Castelvetro è ubicata all'interno dell'area esaminata, le successive applicazioni hanno preso in considerazione esclusivamente i dati climatici registrati da quest'ultima stazione, per la quale la figura 5.1 mostra gli andamenti giornalieri della radiazione solare, della temperatura minima e massima dell'aria, dell'umidità relativa media dell'aria, della velocità del vento misurata a 2 m e 10 m e, infine, della precipitazione e dell'evapotraspirazione di riferimento.

Tabella 5.1 - Precipitazioni totali e altre grandezze meteorologiche medie annue registrate dalle stazioni climatiche della rete SIAS nel periodo 2009-2014

Variabile	Stazione	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Media	Dev.st
Precipitazione [mm]	Castelvetro	774.6	747.2	566.0	580.2	813.0	635.6	686.1	105.7
	Contessa Entellina	936.0	720.6	554.6	530.0	743.8	672.2	692.9	147.3
	Mazara del Vallo	799.6	641.0	566.6	540.6	612.8	444.2	600.8	118.8
	Sciacca	776.6	633.6	501.0	539.6	620.4	542.2	602.2	99.5
Velocità media del vento 2m [m s ⁻¹]	Castelvetro	1.28	1.42	1.60	1.84	1.76	1.86	1.6	0.2
	Contessa Entellina	1.64	1.86	1.79	2.11	2.39	2.18	2.0	0.3
	Mazara del Vallo	1.63	1.82	1.58	1.95	2.15	2.16	1.9	0.2
	Sciacca	1.99	2.20	2.13	2.01	2.34	2.35	2.2	0.2
Radiazione solare [MJ m ⁻² anno ⁻¹]	Castelvetro	6039.4	6169.3	6365.3	6602.5	6250.2	6306.8	6288.9	191.1
	Contessa Entellina	6125.7	5995.0	6180.4	6449.4	6392.5	6264.5	6234.6	169.8
	Mazara del Vallo	6319.2	6225.2	6335.9	6329.8	5542.1	6080.5	6138.8	308.1
	Sciacca	6370.8	6305.9	6497.0	6771.2	6357.2	6515.8	6469.6	169.1
Temperatura media dell'aria [°C]	Castelvetro	18.06	17.49	17.66	17.50	17.22	17.22	17.5	0.3
	Contessa Entellina	18.45	17.93	17.93	18.04	17.66	17.94	18.0	0.3
	Mazara del Vallo	17.42	17.27	17.04	17.40	17.81	17.73	17.4	0.3
	Sciacca	18.41	18.22	18.30	18.17	18.56	18.59	18.4	0.2
Umidità media dell'aria [°C]	Castelvetro	66.19	65.48	69.31	61.55	63.45	63.91	65.0	2.7
	Contessa Entellina	74.30	66.12	67.23	66.51	64.11	63.07	66.9	4.0
	Mazara del Vallo	73.19	72.72	71.73	68.38	72.32	74.10	72.1	2.0
	Sciacca	63.83	63.55	61.62	61.37	62.82	64.11	62.9	1.2
ET_0 [mm]	Castelvetro	1130.1	1134.0	1149.3	1303.3	1214.9	1211.7	1190.6	66.8
	Contessa Entellina	1121.6	1178.9	1190.9	1299.2	1326.0	1298.1	1235.8	82.9
	Mazara del Vallo	1094.3	1092.5	1099.7	1187.1	1078.6	1128.0	1113.4	39.6
	Sciacca	1295.8	1305.5	1324.5	1363.7	1352.3	1341.8	1330.6	26.7

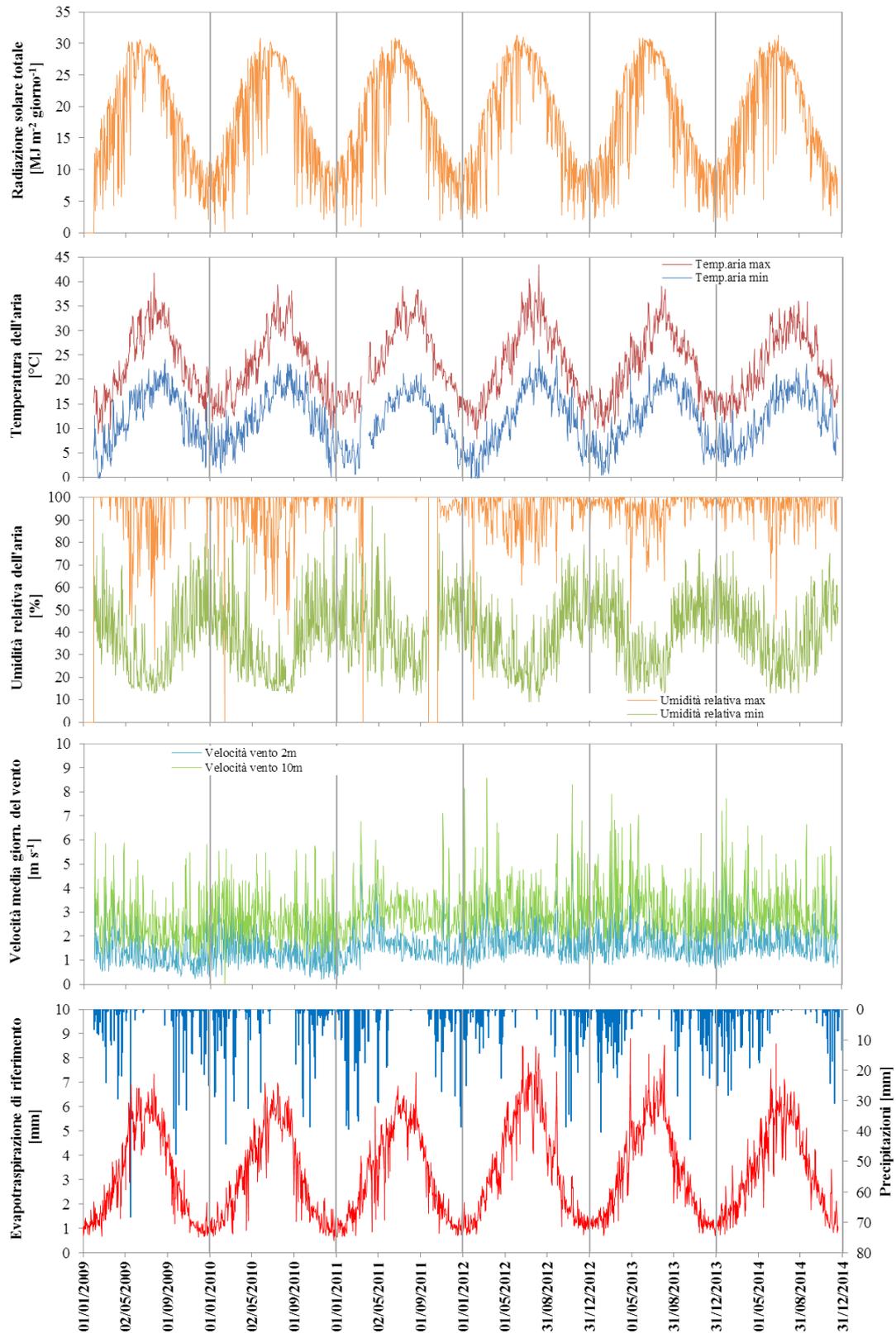


Figura 5.1 - Andamento dei valori giornalieri della radiazione solare, della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa e della velocità del vento, nel periodo esaminato

Come si può notare dall'esame di figura 5.1, il trend annuale della radiazione solare nel periodo di osservazione si è mantenuto pressoché invariato, assumendo valori massimi di circa $30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ nel mese di luglio e valori minimi di circa $2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ nel corso del periodo invernale (dicembre-gennaio). Anche il trend delle temperature segue un andamento simile a quello della radiazione solare con temperature massime dell'aria comprese tra i 10 e i 40 °C e temperature minime comprese tra 1 e 25 °C.

La velocità del vento è stata caratterizzata da un trend leggermente crescente nel corso del periodo di osservazione, passando dal valore medio annuo di 1.28 m s^{-1} nel 2009 ad un valore medio di 1.86 m s^{-1} nel 2014. Tale circostanza è presumibilmente responsabile del riscontrato trend, debolmente crescente, dei valori di evapotraspirazione di riferimento. Le precipitazioni si attestano intorno ad un valore medio annuo di $686.1 \text{ mm anno}^{-1}$ e sono concentrate nei periodi compresi tra gennaio e maggio e tra settembre e dicembre. L'evapotraspirazione della coltura di riferimento ET_0 assume valori di circa 1 mm giorno^{-1} nel mese di gennaio, per aumentare nel primo semestre di ogni anno, fino a raggiungere valori di picco di circa 7 mm giorno^{-1} nel periodo estivo e decrescere nel periodo successivo, fino al mese di dicembre.

Per quanto riguarda la caratterizzazione idraulica dei suoli, è stata utilizzata la carta pedologica redatta da Bono et al., (1998), in modo da rappresentare in formato vettoriale, come mostrato in figura 5.2, i diversi tipi pedologici caratterizzanti il comprensorio in esame.

L'esame di figura 5.2 evidenzia la prevalenza dei suoli denominati "Seggio (SEG1)" che complessivamente si estendono per 1786 ha, corrispondenti a circa il 60% della superficie totale. La successiva tabella 5.2 riporta la composizione granulometrica e la profondità dei suoli ricadenti all'interno della zona irrigua 1/A (Bono et al., 1998). Come si può notare i suoli dominanti sono caratterizzati, secondo la classificazione USDA, da una tessitura franco-sabbioso-argillosa e da una profondità di 85 cm.

All'interno del comprensorio, la profondità del suolo, che condiziona lo sviluppo verticale dell'apparato radicale delle piante e che permette di definire l'entità dell'acqua disponibile, è risultata variabile da 30 a 125 cm. Anche nella zona nella quale sono presenti i suoli denominati "Morici" (MOR2), caratterizzata dalla minima profondità dei suoli, al pari dell'intero comprensorio, è prevalente la coltura dell'olivo, particolarmente resistente a condizioni di deficit idrico del suolo.

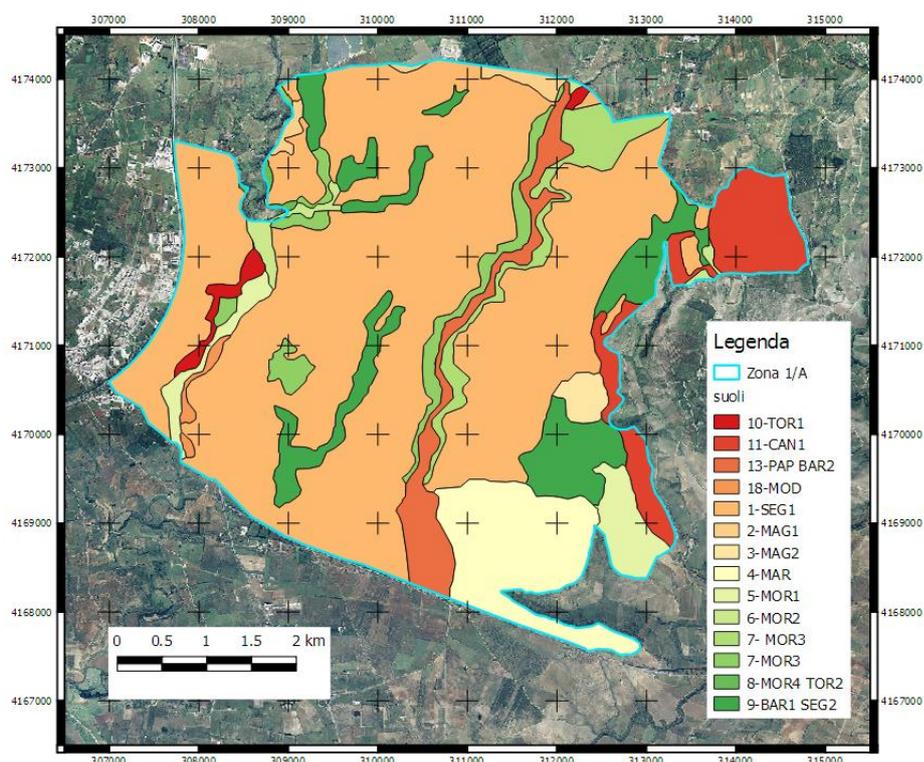


Figura 5.2 - Carta pedologica dell'area oggetto di studio (da Bono et al., 1998)

Tabella 5.2 - Composizione granulometrica e profondità dei suoli all'interno della zona 1/A

SUOLO	Tessitura	GRANULOMETRIA			Profondità [cm]
		Argilla [%]	Limo [%]	Sabbia [%]	
Seggio (SEG1)	franco sabbioso argillosa	10.28	24.2	65.52	85
Marzuchi (MAR)	franco sabbioso argillosa	35.43	17.65	46.93	90
Morici (MOR1)	franco limosa	10.44	51.41	38.15	100
Morici (MOR2)	franca	15.80	38.24	45.96	30
Morici (MOR4)	franca	19.54	33.24	47.22	80
Torre (TOR1)	franco sabbiosa	5.41	35.37	59.22	30
Torre superficiali (TOR2)	franca	19.54	33.24	47.22	80
Canotta (CAN1)	argillosa	41.07	41.44	17.49	120
Papa (PAP)	franco sabbioso argillosa	27.44	27.22	45.35	125
Barone (BAR2)	franco sabbiosa	18.50	13.50	68.00	75
Modione (MOD)	franco argillosa	21.37	39.00	39.63	110

I parametri della curva di ritenzione idrica, espressa secondo il modello proposto da van-Genuchten (1980), sono stati ottenuti utilizzando le funzioni di pedo-trasferimento implementate nel software "ROSETTA" (Schaap et al., 2001), in funzione della composizione granulometrica dei terreni. La tabella 5.3 riporta, per le diverse tipologie di

suolo, i valori di contenuto idrico saturazione, θ_s , quello residuo, θ_r , nonché i parametri α ed n che definiscono la forma della curva di ritenzione idrica. Sulla base delle curve di ritenzione idrica sono state quindi calcolate le costanti idrologiche del suolo ed in particolare i contenuti idrici corrispondenti alla capacità di campo, θ_{cc} , ed al punto di appassimento permanente, θ_{pa} .

Tabella 5.3 - Parametri della curva di ritenzione idrica dei terreni stimati utilizzando il software "ROSETTA" (Schaap et al., 2001)

Suolo	θ_s	θ_r	α	n	θ_{cc}	θ_{pa}
	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ⁻¹]	[-]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ³ cm ⁻³]
Seggio (SEG1)	0.39	0.11	0.0334	1.2067	0.28	0.19
Marzuchi (MAR)	0.39	0.11	0.0334	1.2067	0.28	0.19
Morici (MOR1)	0.44	0.06	0.0051	1.6626	0.29	0.09
Morici (MOR2)	0.30	0.06	0.0111	1.4737	0.24	0.09
Morici (MOR4)	0.40	0.06	0.0111	1.4737	0.24	0.09
Torre (TOR1)	0.39	0.04	0.0347	1.7466	0.10	0.05
Torre superficiali (TOR2)	0.39	0.04	0.0347	1.7466	0.10	0.05
Canotta (CAN1)	0.46	0.09	0.0150	1.2529	0.33	0.19
Papa (PAP)	0.39	0.11	0.0334	1.2067	0.28	0.11
Barone (BAR2)	0.39	0.04	0.0347	1.7466	0.10	0.02
Modione (MOD)	0.44	0.07	0.0158	1.4145	0.26	0.12

Note le caratteristiche idrauliche dei suoli, per l'intero comprensorio sono state ottenute le immagini raster, caratterizzate da una risoluzione spaziale di 250 m, del contenuto idrico corrispondente alla capacità di campo ed al punto di appassimento permanente (Fig. 5.3).

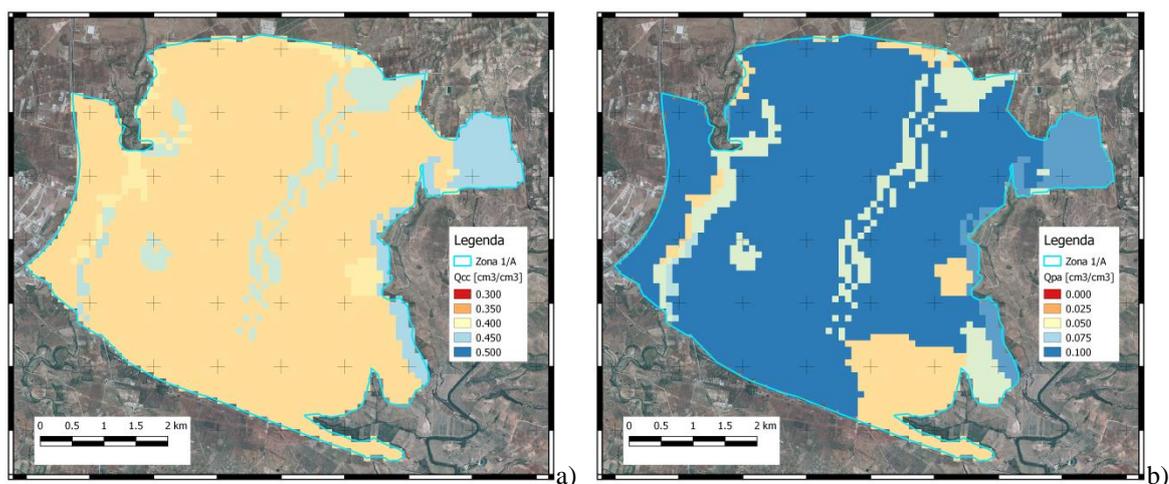


Figura 5.3 - Mappe di contenuto idrico corrispondenti alla capacità di campo (a) ed al punto di appassimento permanente (b) nella zona irrigua 1/A

L'indagine relativa all'uso del suolo della zona, condotta attraverso la fotointerpretazione delle immagini satellitari disponibili sulla piattaforma Google Earth, ha permesso ottenere la carta d'uso del suolo relativa all'intero comprensorio irriguo (figura 5.4).

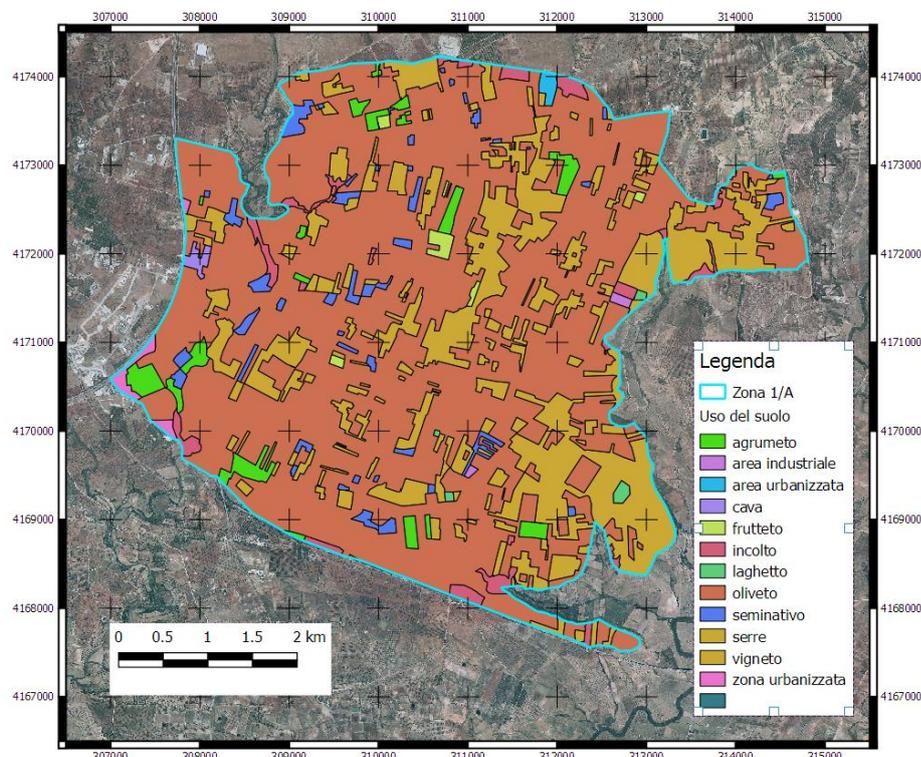


Figura 5.4 - Carta d'uso del suolo del distretto irriguo 1/A

L'analisi condotta sull'intero comprensorio ha permesso di valutare che circa il 65% della superficie totale è destinata alla coltivazione dell'olivo (2.006 ha), mentre invece la coltura della vite occupa una superficie di 705 ha, pari a circa il 23% del totale. Le superfici rimanenti sono occupate da agrumeto per 74 ha, seminativo per 71 ha, frutteto per 14 ha e da coltivazioni in serra per circa 5 ha. Le tare improduttive, rappresentate dalle aree urbanizzate, dalle zone industriali e dalle aree incolte ammontano a circa il 3% della superficie totale, con un'estensione di circa 95 ha.

Quando si passa ad analizzare la griglia di 3km x 3km, riportata in figura 4.4 ed utilizzata per le indagini relative alla stima dell'evapotraspirazione effettiva mediante dati remoti acquisiti dal sensore MODIS, è stata condotta un'analisi di dettaglio finalizzata a valutare la variabilità spaziale dell'uso del suolo (coltura, densità di impianto, grado di copertura), sia con riferimento alla cella centrale che alle otto celle circostanti della griglia, utilizzando

le foto aeree riprese tra il 2012 e il 2013, caratterizzate da una risoluzione spaziale di 25 cm (Figura 4.4).

Nello specifico, con riferimento ad alcune parcelle in cui sono presenti uliveti, scelte in modo tale da considerare rispettivamente una superficie totale di 0.6 km² per la cella centrale e 0.3 km² per le celle circostanti della griglia di riferimento, sono state valutate sia la densità di impianto che il grado di copertura vegetale (fraction cover, f_c). Per ciascuna parcella esaminata, il valore di f_c è stato determinato in base al numero di piante, alla superficie della parcella ed alla superficie della chioma delle singole piante. Quest'ultima è stata ottenuta considerando la media dei diametri di dieci piante disposte lungo l'asse principale della parcella.

La tabella 5.4 mostra le superfici e le relative percentuali occupate dalle differenti colture presenti nella cella centrale (cella n. 5) ed in tutte le nove celle esaminate (celle nn. 1-9).

Tabella 5.4 - Uso del suolo nell'area di 3 km * 3 km investigata

Coltura	Cella centrale		Tutte le 9 celle	
	Area [ha]	Percentuale [-]	Area [ha]	Percentuale [-]
Oliveto	76.6	76.6%	541.4	60.2%
Vigneto	2.5	2.5%	157.4	17.5%
Agrumeto	8.8	8.8%	16.8	1.9%
Altre colture	7.3	7.3%	153.1	17.0%
Non coltivato	4.8	4.8%	31.3	3.5%
Totale	100.0		900.0	

Come si può osservare, con riferimento alla cella centrale, la superficie occupata da oliveto corrisponde a circa il 77%, mentre l'agrumeto ed il vigneto occupano una superficie pari approssimativamente al 12% del totale. D'altro canto, considerando le complessive nove celle, circa l'ottanta per cento dell'area è occupato da colture arboree, con una percentuale di superficie occupata dagli oliveti di circa il 60%, che corrisponde approssimativamente a quella ottenuta sull'intero distretto irriguo.

Limitando soltanto l'analisi alle parcelle impiantate ad oliveto, la tabella 5.5 riporta la superficie investita per ogni cella nonché la superficie campionata, la densità di impianto ed il grado di copertura della vegetazione. Come è facilmente verificabile, la densità media è risultata pari a circa 165±38 piante ha⁻¹, con un grado di copertura medio pari a circa 31±9%.

Tabella 5.5 - Superficie occupata da oliveti, numero di parcelle campionate e superficie totale corrispondente, densità e grado di copertura vegetale per tutte le celle analizzate

N° cella	Posizione	Superficie ad oliveto [ha]	Parcelle campionate [n]	Superficie campionata [ha]	Densità [piante ha ⁻¹]	Deviazione standard [piante ha ⁻¹]	Grado di copertura [%]	Deviazione standard [%]
1	Nord-Ovest	61.8	5	19.4	177	37	28%	8%
2	Nord	60.6	10	18.3	169	31	31%	9%
3	Nord-Est	47.0	5	14.7	135	30	29%	6%
4	Ovest	77.4	13	24.2	211	40	32%	7%
5	Centrale	76.7	19	47.9	150	51	32%	8%
6	Est	48.3	6	14.8	188	58	34%	10%
7	Sud-Ovest	77.4	12	23.3	161	21	28%	9%
8	Sud	51.9	6	15.4	178	45	32%	11%
9	Sud-Est	40.3	3	14.7	118	27	29%	16%
		541.4	79	192.7	165	38	31%	9%

Quest'ultimo risultato è stato ottenuto considerando per ciascuna cella un numero di parcelle compreso tra 3 e 19, al fine di campionare, come riferito, una superficie sempre superiore al 30% della superficie destinata ad oliveto nella cella.

I risultati ottenuti supportano quindi l'ipotesi di considerare l'area di studio piuttosto omogenea in quanto ad uso del suolo, così da poter considerare validi, anche a scala di singola cella, i valori di evapotraspirazione effettiva determinati utilizzando la tecnica della correlazione turbolenta.

Nel periodo di studio (2009-2014) sono disponibili 790 valori giornalieri di evapotraspirazione effettiva, corrispondenti a circa il 36% del numero di giorni dell'intero periodo, ripartiti nei diversi anni secondo quanto indicato nella tabella 5.6.

Tabella 5.6 - Consistenza del database di misure di evapotraspirazione effettiva, ET_e , e relativa media ottenute attraverso la tecnica della correlazione turbolenta

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	tutti
Numero dati [-]	115	132	144	61	162	176	790
Consistenza [%]	32%	36%	39%	17%	44%	48%	36%
Media [mm giorno ⁻¹]	2.60	2.17	2.15	1.45	1.82	2.08	2.08
Deviazione Standard [mm giorno ⁻¹]	0.74	0.71	0.67	0.63	0.63	0.84	0.77

Il modesto numero di dati sperimentali relativi all'anno 2012 è conseguente ad un guasto al sistema di acquisizione che ha reso impossibile, per un lungo periodo, l'acquisizione dei

dati. L'evapotraspirazione effettiva ha assunto, nei sei anni considerati, un valore medio di 2.08 ± 0.77 mm giorno⁻¹.

La figura 5.11 riporta, per il periodo 2009-2014, la dinamica temporale dell'evapotraspirazione di riferimento, ET_0 , e dei valori di evapotraspirazione effettiva, ET_e , ottenuti sulla base dei flussi orari rilevati.

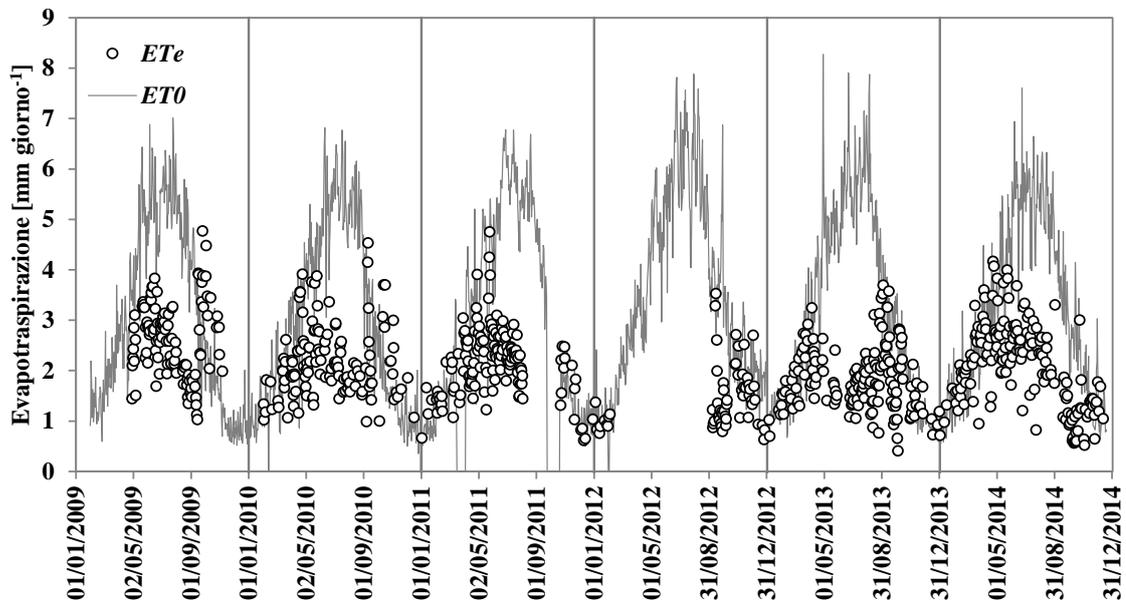


Figura 5.5 - Dati giornalieri dell'evapotraspirazione di riferimento e dell'evapotraspirazione effettiva misurata con la tecnica della correlazione turbolenta nel periodo compreso tra il 2009 e il 2014

L'analisi della figura 5.5 evidenzia che i valori di evapotraspirazione effettiva sono molto prossimi a quelli di riferimento nei periodi compresi tra gennaio ed aprile e tra ottobre e dicembre di ciascun anno. D'altro canto tale condizione è verosimilmente imputabile alla presenza di erbe spontanee che ricoprono il suolo e che certamente contribuiscono al processo evapotraspirativo. Nel periodo compreso tra maggio e settembre invece, l'evapotraspirazione effettiva assume valori inferiori all'evapotraspirazione di riferimento, con minimi del periodo registrati generalmente durante il mese di agosto.

Secondo quanto in precedenza rilevato da Cammalleri et al. (2013) con riferimento all'area (footprint) che influenza i flussi rilevati dalla torre, si può assumere che tali misure di ET sono rappresentative di un'ampia porzione di superficie avente un'estensione confrontabile a quella di una cella MODIS.

La figura 5.6 mostra l'andamento temporale dei prodotti MODIS esaminati con riferimento alla cella centrale nella quale sono installati gli strumenti di monitoraggio a terra e riporta

inoltre i valori massimi e minimi rilevati in tutte le nove identificate dalla griglia esaminata.

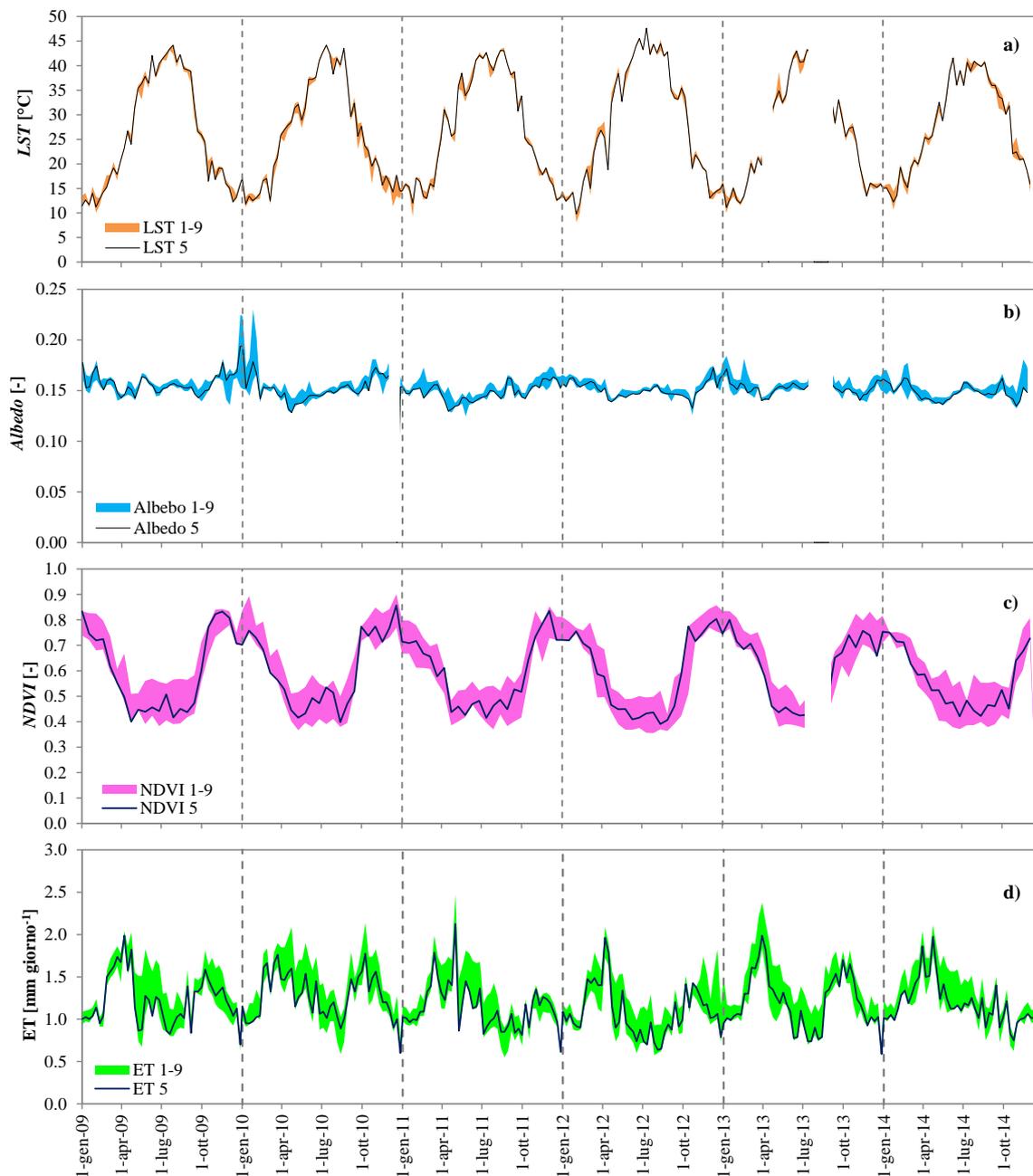


Figura 5.6 - Andamento temporale dei prodotti MODIS: LST (a), albedo (b), $NDVI$ (c) ed ET_e (d) nella cella centrale (n° 5) e corrispondenti valori massimi e minimi rilevati in tutte le 9 celle

Il prodotto di temperatura superficiale, LST , (figura 5.6,a) mostra un trend simile in tutti gli anni considerati, con temperature minime ($\sim 10^{\circ}\text{C}$) nei mesi di gennaio febbraio e massime ($\sim 45^{\circ}\text{C}$) intorno al mese di agosto, con una variabilità del tutto trascurabile quando si

considerano i dati relativi a tutti e nove le celle esaminate (deviazione standard pari a 0.06°C).

Per quanto riguarda il prodotto Albedo (figura 5.6,b) si osserva un trend poco variabile nei sei anni considerati, con un valore medio del periodo pari a 0.152 ed una deviazione standard di 0.013. Considerando tutte e nove le celle invece, la media nei sei anni assume il valore di 0.153 con una deviazione standard pari a 0.009, attestando una estremamente bassa variabilità spaziale nell'area considerata.

Anche il prodotto *NDVI* (figura 5.6,c) mostra un andamento annuale pressoché identico in tutti gli anni esaminati con una leggera riduzione dei valori massimi tra il 2013 e il 2014. Nel periodo tra aprile ed agosto di ogni anno i valori di *NDVI* assumono i valori prossimi al minimo annuale e non mostrano alcun trend particolare, attestandosi intorno ad un valore di circa 0.45.

Il prodotto riguardante l'evapotraspirazione *ET* (figura 5.6,d) nel periodo di osservazione mostra una modesta variabilità temporale, i cui valori si attestano intorno ad un valore medio di $1.2 \text{ mm giorno}^{-1}$, con una deviazione standard di $0.3 \text{ mm giorno}^{-1}$. Anche tra le diverse celle la variabilità di tale grandezza è abbastanza contenuta, con una deviazione standard di $0.9 \text{ mm giorno}^{-1}$.

Utilizzando i prodotti MODIS relativi all'intero distretto irriguo sono stati quindi determinati i valori dei coefficienti culturali K_c mediante l'equazione 2.12. La risoluzione spaziale dei valori di k_c è stata assunta, alla stregua dell'indice di vegetazione *NDVI*, pari a 250 m, in relazione alla modesta variabilità spaziale dell'albedo.

E' stata inizialmente effettuata una stima della variabilità spaziale dell'indice di area fogliare (*LAI*), in modo tale da applicare l'equazione 2.8 per stimare la resistenza minima relativa all'intera superficie. Sulla base delle misure di *LAI* rilevate in campo su varie colture del comprensorio di Castelvetro e in diverse fasi del ciclo fenologico, è stata parametrizzata la relazione empirica tra l'indice di area fogliare e l'indice *NDVI* mostrata nella figura 5.7.

A titolo di esempio la figura 5.8 mostra, relativamente all'anno 2009 e con riferimento alla coltura dell'olivo, l'andamento temporale dell'indice *NDVI* e dei corrispondenti valori del *LAI*, stimati utilizzando la regressione lineare ottenuta. Come si può notare, l'indice di area fogliare assume valori più alti nel periodo autunno-vernino e primaverile rispetto al periodo estivo, in conseguenza della presenza di vegetazione spontanea che si sovrappone a quella della coltura esaminata.

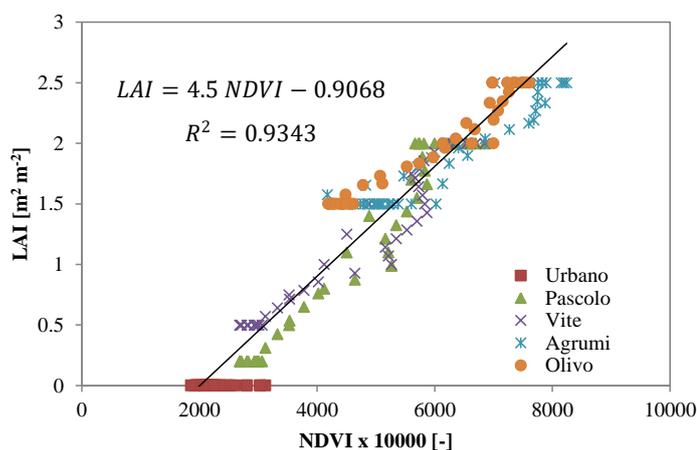


Figura 5.7 - Relazione tra l'indice di area fogliare misurato in campo e l'indice *NDVI*

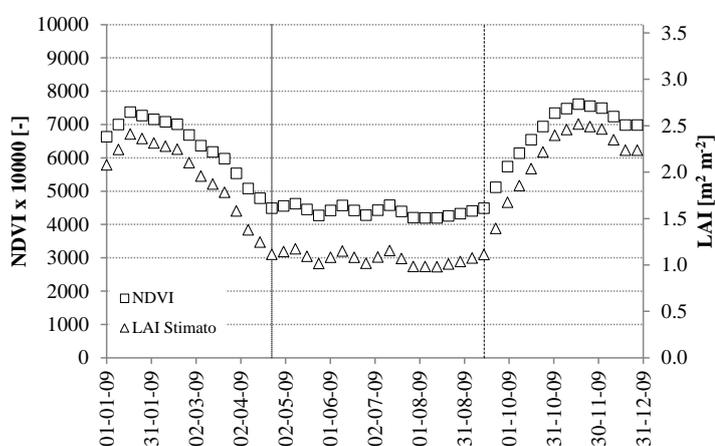


Figura 5.8 - Andamento temporale degli indici *NDVI* e *LAI* (stimato) nel 2009 per la coltura dell'olivo

La relazione funzionale tra i valori del *LAI* e quelli corrispondenti all'indice *NDVI* è stata quindi implementata attraverso la sub-routine “Model Maker” di ERDAS, in modo da ottenere mappe di *LAI* caratterizzate da una risoluzione spaziale di 250 m e relative a diversi periodi dell'anno quali quelle rappresentate a titolo di esempio in Figura 5.9.

Poiché la stima da remoto dell'altezza della vegetazione, h_{veg} , risulta complessa, è stata condotta un'apposita analisi di sensitività che ha permesso di valutare gli effetti conseguenti all'assunzione di tale variabile sui valori dei coefficienti colturale K_c calcolati con l'equazione 2.12. Nello specifico è stata studiata l'influenza della velocità del vento misurata a 10 m di altezza dal suolo sul coefficiente colturale K_c per diversi valori dell'altezza della coltura (Figura 5.10) e per due prestabiliti valori del *LAI*, mantenendo costanti le altre variabili climatiche.

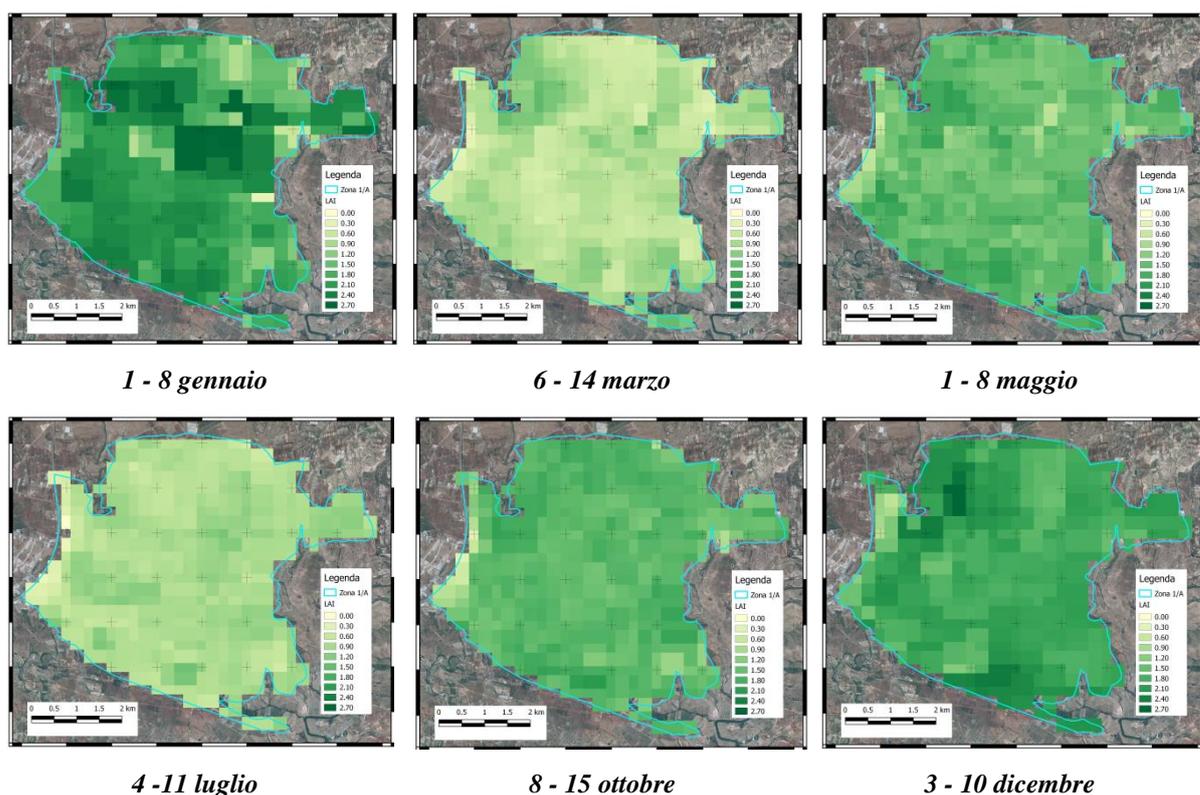


Figura 5.9 - Distribuzione spaziale dell'indice di area fogliare (LAI) in diversi periodi del 2009

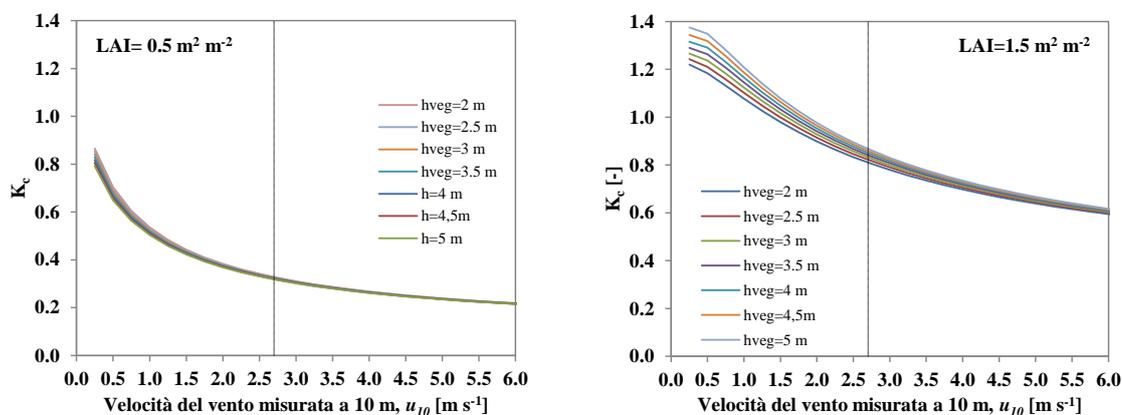


Figura 5.10 - Relazione tra K_c e velocità del vento misurata a 10 m per differenti altezze della coltura e valori del LAI. La linea tratteggiata verticale indica il valore di velocità media nell'area di studio (2.7 m s^{-1})

Dall'esame della figura si può notare che assumendo un valore del LAI pari a 0.5 ed al variare della velocità del vento, i valori di K_c risultano praticamente indipendenti dall'altezza della vegetazione; tale dipendenza tende ad essere più marcata per un valore del LAI di 1.5 e per le velocità del vento più contenute. In effetti però, considerando che la velocità media misurata a 10 m dal suolo nel periodo 2009-2011 è risultata pari a 2.7 m/s , è possibile assumere che i valori di K_c risultino poco variabili con l'altezza della

vegetazione, indipendentemente dal valore assunto dall'indice di area fogliare. Sulla base di tali considerazioni quindi, la determinazione analitica del K_c è stata effettuata assumendo un unico valore di altezza della vegetazione, h_{veg} , pari a 2 m per l'intero distretto irriguo investigato.

Avendo a disposizione mappe relative ai dati climatici, al LAI ed all'albedo, considerando costante l'altezza della vegetazione, sono state infine predisposte le mappe dei coefficienti colturali K_c . Tali mappe, riportate a titolo di esempio in Figura 5.11, per diversi periodi del 2009, sono caratterizzate da una risoluzione spaziale di 250 m e risoluzione temporale di 8 giorni.

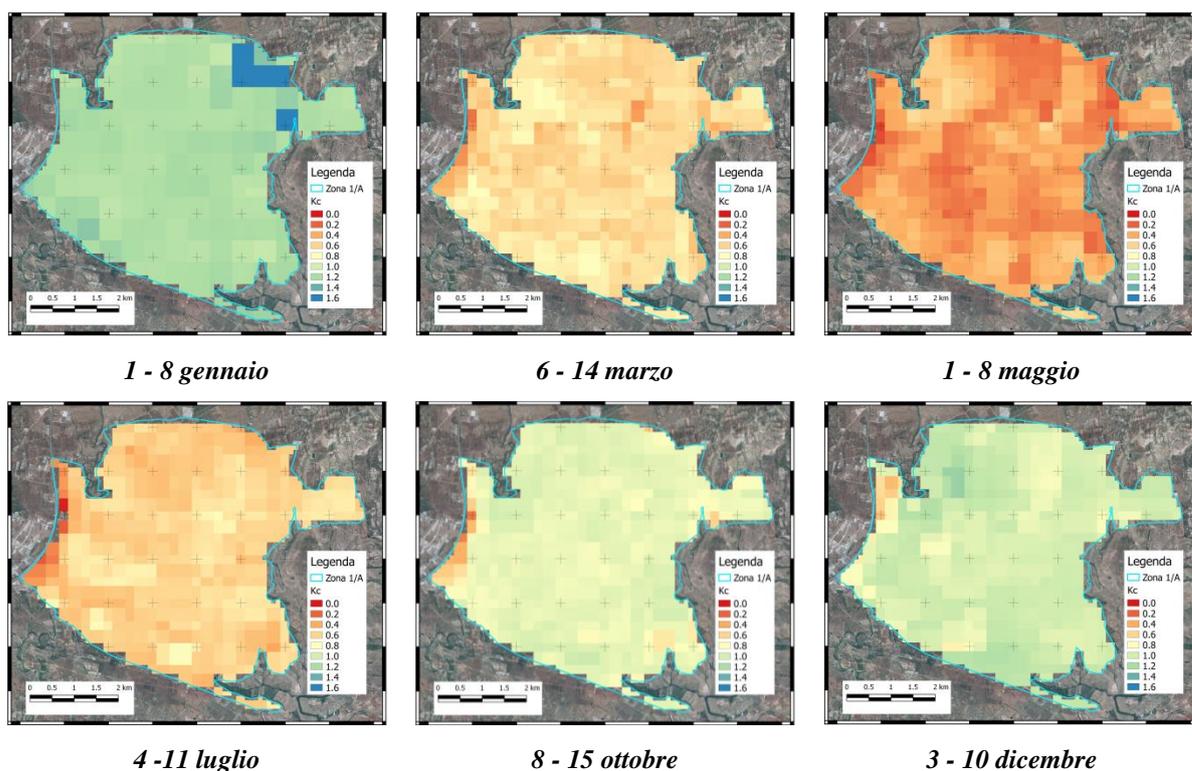


Figura 5.11 - Distribuzione spaziale del coefficiente colturale, K_c , in diversi periodi del 2009

Come si può osservare alcuni dei pixels ubicati ad ovest del comprensorio sono caratterizzati da valori dei coefficienti colturali prossimi a zero, verosimilmente in conseguenza della spinta urbanizzazione e dei valori contenuti assunti dall'indice $NDVI$.

5.2 Validazione del modello HYDRUS-2D

La validazione del modello HYDRUS-2D ha richiesto la preliminare determinazione delle caratteristiche fisiche del suolo, nonché della distribuzione dell'apparato radicale, le cui valutazioni sono state effettuate a livello di singola pianta.

La composizione granulometrica del suolo in prossimità della pianta investigata (S2, figura 4.7) è risultata costituita da un contenuto di argilla, limo e sabbia pari rispettivamente a 31.2%, 18.6% e 50.2% e pertanto il suolo ricade nella classe tessiturale Sabbioso-Argilloso-Franco (USDA).

In figura 5.12 a-d sono riportate le curve di ritenzione $\psi(\theta)$, ottenute sui campioni prelevati a quattro distinte profondità, interpolate secondo il modello di van Genuchten, i cui parametri sono indicati in tabella 5.7, la cui conoscenza ha permesso di determinare, per il sito di indagine, i valori misurati del contenuto idrico del suolo corrispondenti alla capacità di campo ed al punto di appassimento.

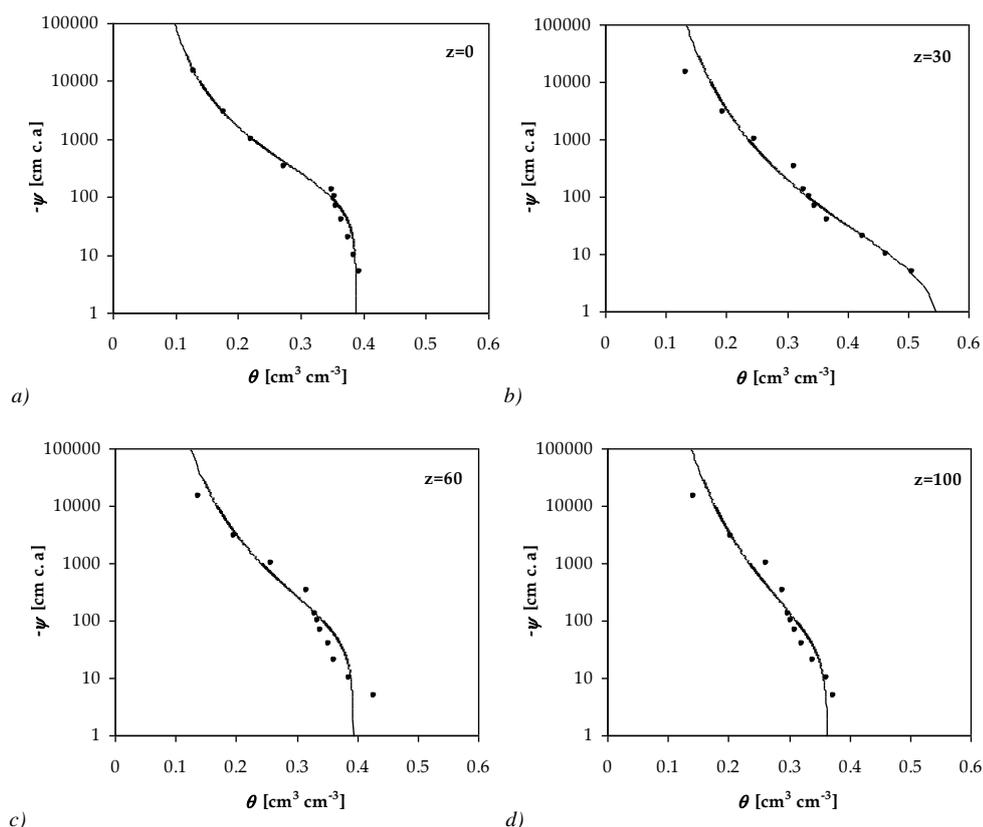


Figura 5.12 - Curve di ritenzione $\psi(\theta)$ ottenute alle profondità di 0, 30, 60 e 100 cm

La tabella 5.7 riporta altresì la media geometrica (GM) ed il coefficiente di variazione (CV) dei valori di conducibilità idraulica insatura, $K(\psi)$, sperimentalmente determinati in corrispondenza a valori del potenziale matriciale pari a -30 cm, -60 cm e -120 cm.

Tabella 5.7 - Parametri del modello di van Genuchten e valori della media geometrica, GM, e del coefficiente di variazione, CV, della conducibilità idraulica per tre distinti valori del potenziale matriciale del terreno

Z [cm]	Parametri curva di ritenzione					Conducibilità idraulica [cm h ⁻¹]					
	θ_r	θ_s	α	n	m	K_{-120}		K_{-60}		K_{-30}	
	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ⁻¹]	[-]	[-]	GM	CV	GM	CV	GM	CV
0	0.05	0.39	0.0080	1.3171	0.2407	2.22	28.50	5.88	23.40	19.03	14.30
30	0.05	0.56	0.0147	1.1855	0.1565	8.91	50.00	25.49	60.70	68.06	34.00
60	0.06	0.39	0.0138	1.2264	0.1846	4.82	8.70	11.92	6.60	39.94	48.70
100	0.06	0.36	0.0223	1.1797	0.1523	-	-	-	-	-	-

L'installazione dei pozzetti di misura del contenuto idrico del suolo secondo lo schema di figura 4.8 ha permesso di ottenere un database caratterizzato da un elevato dettaglio spazio-temporale. Con riferimento agli anni 2011 e 2012, le figure 5.13 e 5.14 mostrano, per ciascun pozzetto di misura (P1-P16), gli udogrammi ottenuti utilizzando il sensore Diviner 2000 della Sentek.

L'analisi degli udogrammi rilevati nel 2011, durante il quale si disponeva di una sola linea gocciolante installata lungo il filare, evidenzia incrementi del contenuto idrico in concomitanza degli adacquamenti e rapide diminuzioni legate agli attingimenti radicali e fino alla profondità di 80 cm, solo per i pozzetti localizzati in prossimità degli erogatori (P1-P6). Per i pozzetti più distanti dalla fascia umettata invece, l'entità degli attingimenti si riduce fino a scomparire completamente per distanze superiori ad un metro dall'asse del filare, tanto che i contenuti idrici del suolo alle diverse profondità risultano, nel periodo esaminato, molto poco variabili. L'entità degli incrementi di contenuto idrico conseguenti all'irrigazione risulta più marcata in corrispondenza dei pozzetti di misura P1, P2 e P3, posti in posizione molto prossima alla superficie direttamente umettata dagli erogatori.

Per i pozzetti di misura (P7-P16), risulta interessante altresì osservare che i contenuti idrici misurati alle diverse profondità risultano pressoché costanti nel periodo luglio-agosto e tendono a diminuire lentamente nel periodo successivo. Tale circostanza potrebbe essere imputabile all'abilità che ha la pianta di attivare le radici più lontane quando la

disponibilità idrica del suolo risulta essere limitata, come riscontrato dall'esame degli udogrammi relativi ai pozzetti P1-P6 sin dall'inizio di settembre.

Gli udogrammi del 2012 mostrano che a seguito di un periodo piovoso (marzo-aprile) i contenuti idrici del terreno sono in generale prossimi alla capacità di campo per l'intero volume investigato, mentre nel periodo successivo, in relazione al modesto apporto di precipitazione, i contenuti idrici si riducono più rapidamente nei pozzetti più prossimi alla pianta. Inoltre, a seguito dei due adacquamenti, forniti sull'intera superficie dominata dalla pianta, i contenuti idrici del suolo crescono fino a raggiungere la capacità di campo in tutti i pozzetti e per le diverse profondità investigate. La simulazione del 2012 ha infatti riprodotto gli effetti di un consistente apporto di precipitazione, che ha permesso di identificare il volume di suolo nel quale si verificano i maggiori attingimenti radicali.

Come è possibile osservare infatti, nel periodo successivo all'adacquamento del 21 luglio 2012, in corrispondenza dei pozzetti più prossimi alla pianta (P1, P2, P3, P5 e P6) sono evidenti più rapide riduzioni del contenuto idrico rispetto agli altri pozzetti. D'altra parte, esaminando le sole misure relative allo strato superficiale (0-15 cm), si nota come la riduzione dei contenuti idrici risulti maggiore nei pozzetti più distanti dalla pianta che, non essendo ombreggiati dalla chioma, sono maggiormente soggetti al processo evaporativo.

Con riferimento alla caratterizzazione del sistema SPA a livello di singola pianta, la figura 5.15 riporta, per i 16 profili di suolo investigato, la distribuzione della lunghezza delle radici fini per unità di volume di suolo, rappresentata dal parametro *RLD*, lungo la direzione verticale. L'esame della figura evidenzia come le radici si concentrano negli strati superficiali con valori maggiori del parametro *RLD* lungo i profili prossimi alla posizione dei gocciolatori (P1-P6).

I valori del parametro *RLD* sono stati quindi interpolati spazialmente al fine di ottenere le mappe di distribuzione radicale alle diverse profondità riportate in figura 5.16. Dall'esame della figura è possibile notare che i volumi nei quali si registrano i valori più elevati della densità radicale si localizzano lungo la direzione della linea gocciolante e in prossimità dei gocciolatori, che sono posti a 50 e 150 cm circa dal tronco della pianta. Inoltre, l'osservazione della mappa del parametro *RLD* nella direzione ortogonale a quella della linea gocciolante evidenzia che le radici si spingono ben oltre la proiezione della chioma, misurata a circa 250 cm dal tronco.

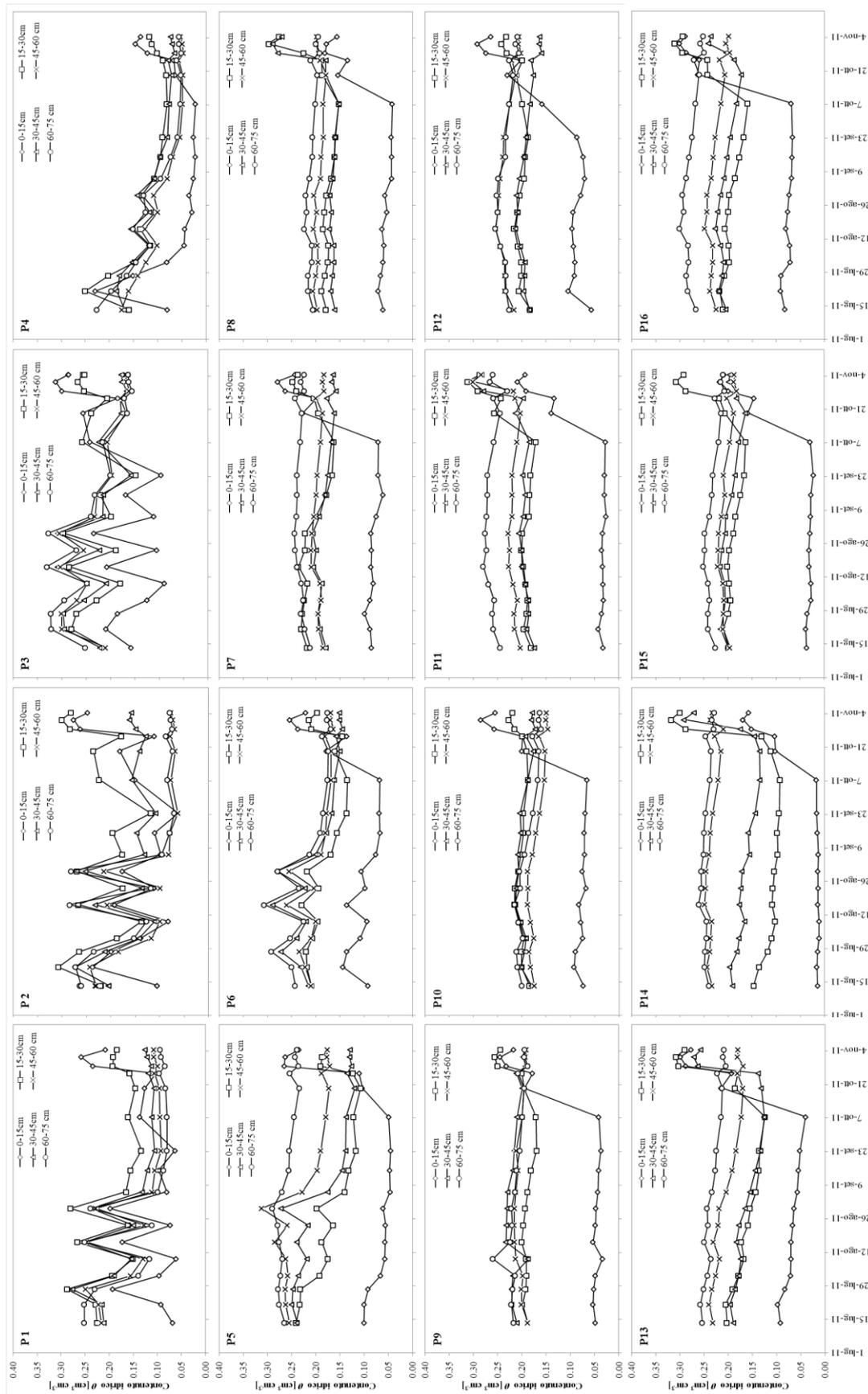


Figura 5.13 - Udogrammi acquisiti nel 2011 nei pozzetti di misura

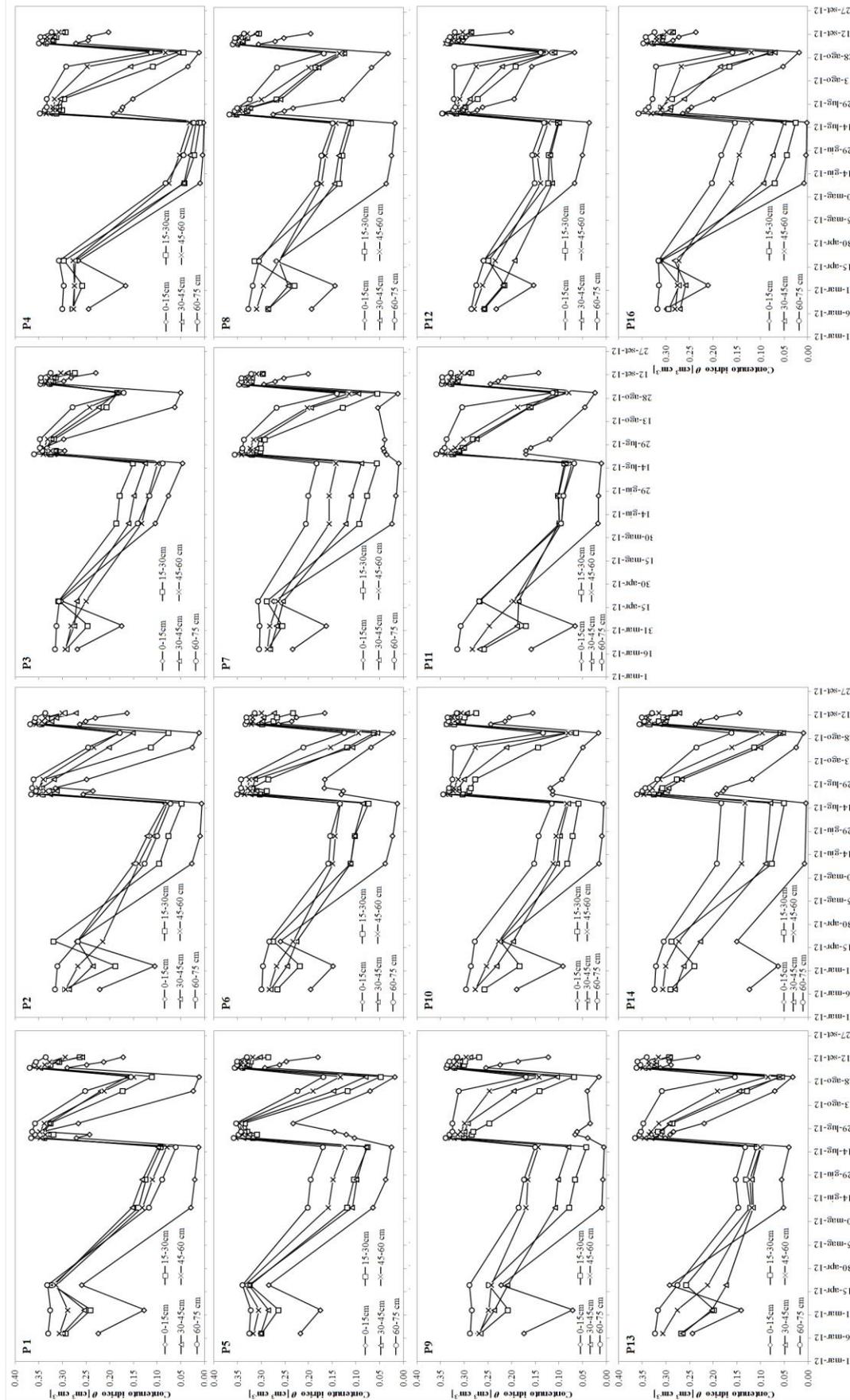


Figura 5.14 - Udogrammi acquisiti nel 2012 nei pozzetti di misura

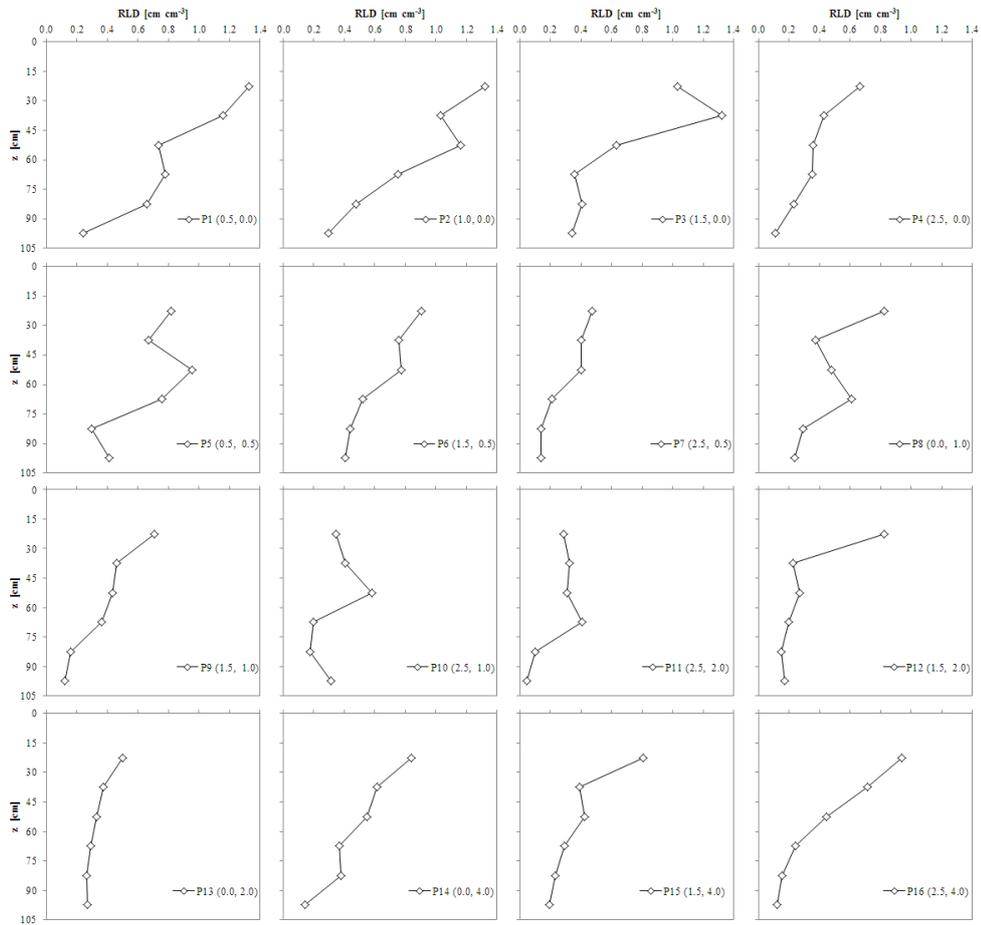


Figura 5.15 - Distribuzione verticale della densità radicale espressa in termini lunghezza delle radici fini per unità di volume di suolo (*RLD*), per i profili investigati

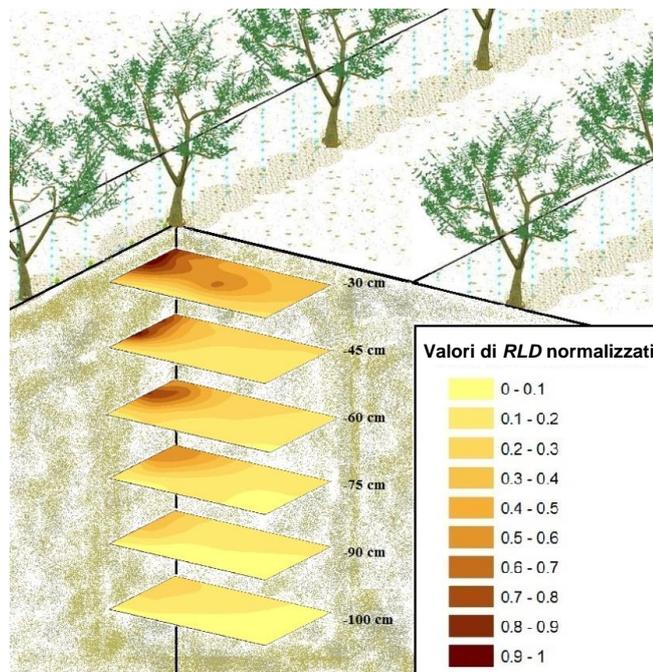


Figura 5.16 - Distribuzione spaziale del parametro *RLD* per i sei strati di suolo investigato

L'indagine sulla distribuzione spaziale dell'apparato radicale ha permesso di determinare i valori dei parametri dell'equazione 2.29, espressiva della distribuzione spaziale dell'apparato radicale. A tal fine sono state mediate le densità radicali rilevate alla stessa profondità e distanza dalla pianta in modo tale da ottenere una mappa di distribuzione radicale misurata, espressa mediante il parametro RLD , valida lungo ogni piano perpendicolare alla linea gocciolante (figura 5.17).

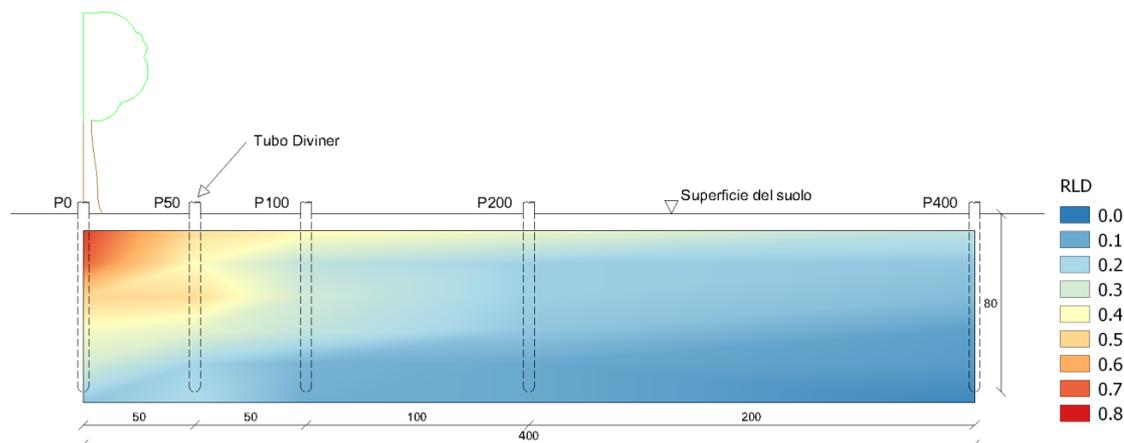


Figura 5.17 - Mappa della distribuzione spaziale dell'apparato radicale, espressa mediante il parametro RLD

I valori di RLD misurati sono stati quindi utilizzati per la stima dei parametri che compaiono nell'equazione 2.29, che è stata effettuata minimizzando gli scarti tra i valori misurati del parametro RLD ed i corrispondenti stimati. L'elaborazione condotta ha portato a riconoscere, per i parametri dell'equazione 2.29, i seguenti valori: $Z_m=120$ cm, $z^*=30$ cm, $p_z=1$, $X_m=580$ cm, $x^*=0$ cm, $p_x=1$. La conoscenza di tali parametri ha permesso di rappresentare, sul piano x,z , la mappa della distribuzione del parametro di distribuzione radicale $\beta(x,z)$, successivamente implementata in HYDRUS-2D (figura 5.18).

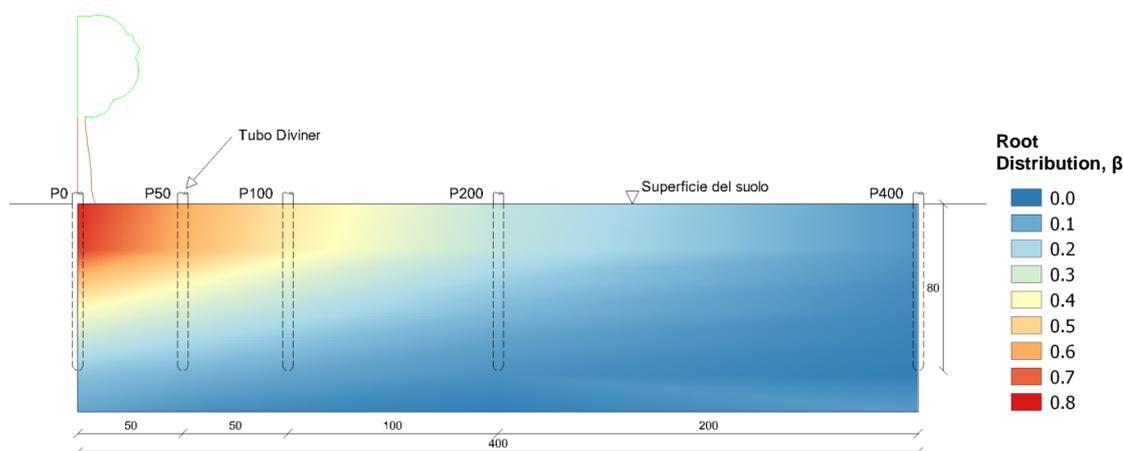


Figura 5.18 - Mappa della distribuzione spaziale del parametro di distribuzione radicale $\beta(x,z)$

I sensori di flusso di linfa installati su tre piante rappresentative dell'intero oliveto (S1, S2, S3 di Figura 4.7), hanno permesso di monitorare i flussi traspirativi giornalieri verificatisi nel 2011 e 2012. Tali flussi, misurati in termini volumetrici, sono stati quindi convertiti in altezza di traspirazione sulla base della superficie del sesto, pari a 40m^2 .

La figura 5.19 riporta, per il periodo dall'1 maggio al 15 novembre del 2011 e del 2012 sia l'andamento dei flussi traspirativi effettivi (medi delle tre piante), che della richiesta evapotraspirativa dell'ambiente, rappresentata dall'evapotraspirazione della coltura di riferimento, ET_0 .

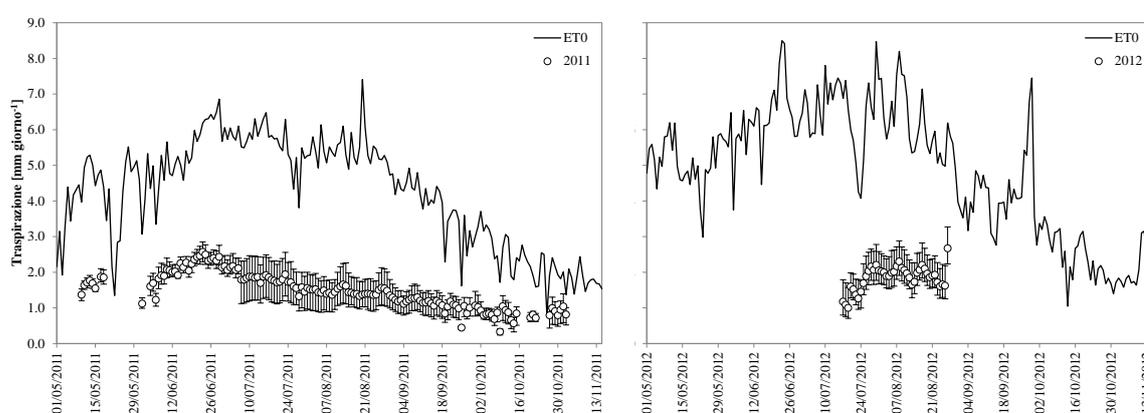


Figura 5.19 - Andamento dell'evapotraspirazione di riferimento e dei flussi traspirativi effettivi dell'olivo nelle stagioni irrigue 2011 e 2012

L'esame della figura evidenzia che per il 2011 i valori di evapotraspirazione della coltura di riferimento tendono a incrementarsi dal 01/05 fino al 29/06 raggiungendo un valore di circa $6.9\text{ mm giorno}^{-1}$. Nel periodo successivo, i valori di ET_0 sono risultati variabili intorno ad un valore medio di circa $5.6\text{ mm giorno}^{-1}$ fino alla seconda decade di agosto, per ridursi nelle settimane successive, fino a raggiungere un valore medio di circa $3.2\text{ mm giorno}^{-1}$, registrato nel periodo 18 settembre-20 ottobre. Nel periodo in esame (1 maggio-15 novembre) il valore cumulato della richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera è risultato pari a 841 mm, inferiore a quello corrispondente allo stesso periodo del 2012, pari a 969 mm.

Anche il 2012 i valori di ET_0 tendono a crescere fino al 23/06 raggiungendo valori massimi di $8.5\text{ mm giorno}^{-1}$. Nel periodo successivo e fino alla prima decade di agosto i valori di ET_0 sono risultati variabili intorno ad un valore medio di circa $6.7\text{ mm giorno}^{-1}$ per poi

ridursi gradualmente fino ad assumere un valore medio di 2.1 mm giorno⁻¹ nel periodo compreso tra il 16 ottobre ed il 15 novembre.

Anche i consumi traspirativi effettivi hanno mostrato, in entrambe le stagioni esaminate, un trend che segue quello dell' ET_0 . Nel 2011 sono stati considerati i valori di traspirazione ottenuti nel corso di 152 giornate di misura. Tali valori hanno evidenziato un andamento crescente fino alla quarta settimana di giugno attestandosi al valore di 2.5 mm giorno⁻¹, per poi decrescere nel periodo successivo fino a raggiungere un valore pari a 1.0 mm giorno⁻¹. Nel 2012, sebbene sia stato monitorato un periodo più breve (41 giornate dal 17/07 al 26/08), il valor medio di traspirazione rilevato nel periodo di osservazione è risultato pario a 1.8 mm giorno⁻¹, leggermente maggiore di quello registrato nello stesso periodo del 2011, pari a 1.5 mm giorno⁻¹.

L'applicazione del modello HYDRUS-2D è stata condotta con riferimento agli anni 2011 e 2012 ed ha considerato due funzioni di risposta allo stress idrico della pianta: il modello sigmoidale (S-shape) proposto da van Genuchten (1987), caso A ed il modello lineare proposto da Feddes et al., (1978), caso B. La validazione del modello è stata effettuata sulla base del confronto tra i contenuti idrici volumetrici simulati dal modello con quelli misurati in campo. Ai fini del confronto sono stati scelti, nel dominio di simulazione, 25 punti di controllo corrispondenti a cinque profili (0 cm, 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm e 400 cm dal gocciolatore) ed alle altrettante profondità (0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm, 45-60 cm, 60-75 cm) rispetto alle quali sono state acquisite le misure.

Con riferimento all'anno 2011, la figura 5.19 mostra i valori medi e le corrispondenti deviazioni standard del contenuto idrico del suolo ottenuti utilizzando, per le diverse profondità, i valori rilevati lungo piani paralleli alla linea gocciolante, nonché quelli simulati dal modello nell'ipotesi di assumere le due distinte funzioni di risposta allo stress idrico della pianta. L'esame della figura evidenzia che l'andamento dei contenuti idrici simulati segue in generale quello dei corrispondenti misurati lungo tutti i profili esaminati, anche in conseguenza degli eventi irrigui o delle piogge. Inoltre, le maggiori variazioni di contenuto idrico conseguenti alle applicazioni irrigue sono evidenti lungo i profili più prossimi alla condotta erogatrice (0-50 cm) e negli strati più superficiali del terreno, risultando del tutto trascurabili lungo i profili più lontani (100-400 cm).

D'altra parte, gli eventi meteorici verificatisi sin dalla fine di settembre, in relazione alla loro entità, determinano la rapida risalita dei contenuti idrici del suolo limitatamente agli strati più superficiali, con effetti via via più contenuti al crescere della profondità.

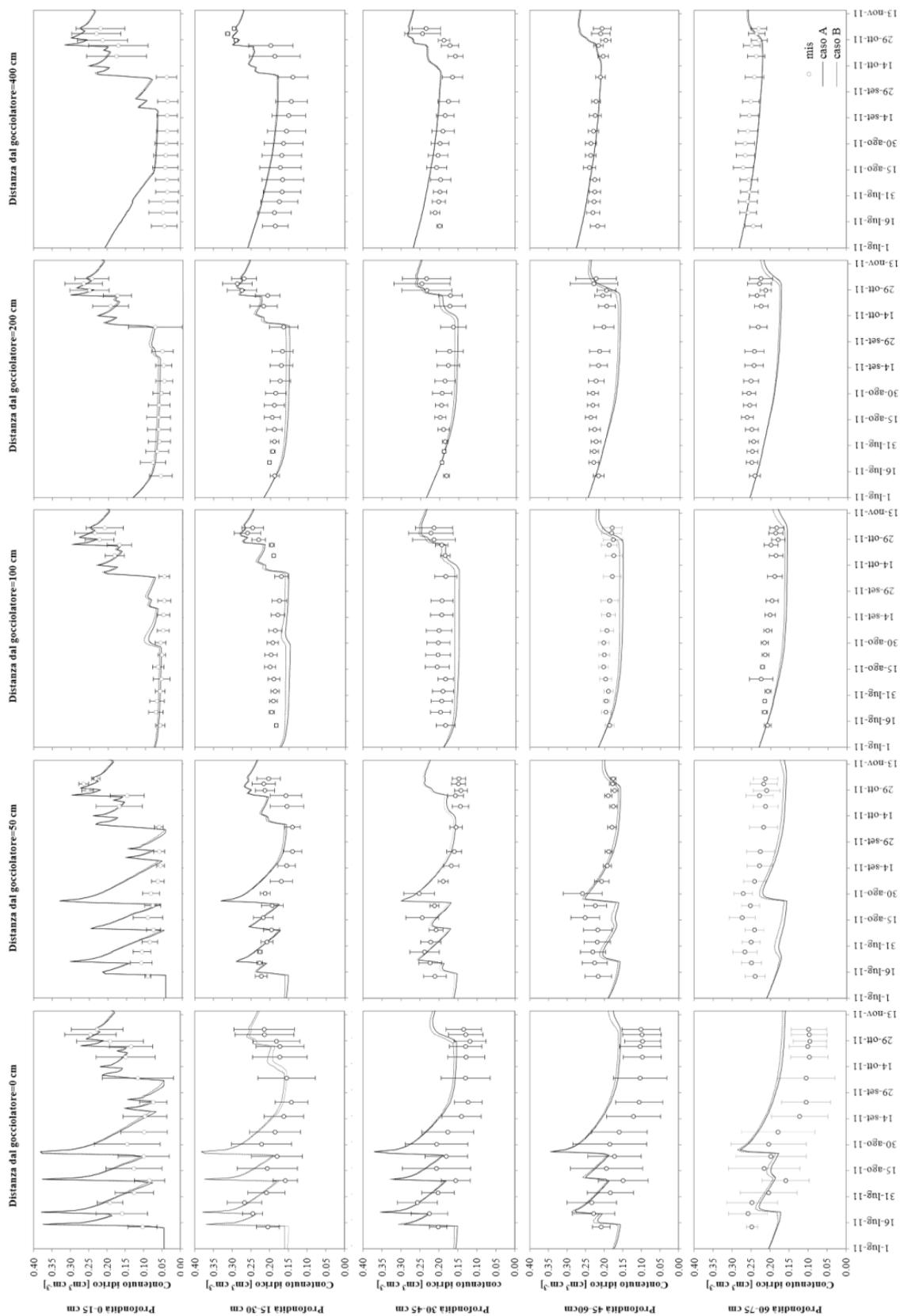


Figura 5.19 - Andamento temporale dei valori misurati e simulati, nella stagione irrigua 2011, del contenuto idrico del suolo in corrispondenza ai 25 punti di controllo. Le simulazioni sono state condotte ipotizzando due distinte funzioni di risposta allo stress idrico della pianta (caso A e caso B)

Dall'esame di figura 5.19 inoltre si può notare che l'assunzione delle due distinte funzioni di stress idrico della pianta non determina apprezzabili differenze in termini di contenuto idrico simulato, in conseguenza del fatto che le due funzioni risultano simili in corrispondenza dei valori più elevati del contenuto idrico del suolo. Le differenze negli udogrammi simulati, sebbene contenute, tendono ad incrementarsi in conseguenza a prolungati periodi di deficit idrico del suolo, risultando praticamente assenti nei periodi immediatamente successivi agli adacquamenti o agli eventi piovosi. I contenuti idrici simulati nei periodi di progressivo essiccamento del suolo, nell'ipotesi di assumere la funzione sigmoideale (caso A), risultano generalmente inferiori a quelli ottenuti utilizzando la funzione lineare (caso B). Tale circostanza dimostra che, a parità di contenuto idrico del suolo, l'assunzione di una funzione sigmoideale determina un maggior consumo traspirativo della pianta.

Anche nel 2012 l'andamento dei contenuti idrici simulati da HYDRUS-2D, rappresentato in figura 5.20, segue quello dei valori misurati, sebbene si riscontri una generale sovrastima dei contenuti idrici simulati rispetto a quelli misurati, che risulta più marcata per i profili posti a distanza di 200 cm e 400 cm dalla condotta erogatrice. Come si può notare dall'esame di figura 5.20, in conseguenza ai due adacquamenti, forniti sull'intera superficie nell'intorno della pianta, si determinano incrementi del contenuto idrico del suolo che coinvolgono, in generale, tutti i profili investigati, anche se con una variabilità più contenuta all'aumentare della profondità.

Analogamente alla stagione precedente, anche nel 2012 le differenze riscontrate sui contenuti idrici del suolo, nell'ipotesi di assumere le due funzioni di stress idrico, risultano limitate esclusivamente ad alcuni punti di controllo e in conseguenza a prolungati periodi di essiccamento del suolo.

Con riferimento ai periodi del 2011 e del 2012 esaminati, la figura 5.21a,b mostra l'andamento temporale dei valori di traspirazione effettiva misurati mediante i sensori sap-flow ed i corrispondenti simulati dal modello considerando le due funzioni di risposta allo stress idrico della pianta. I valori di traspirazione massima della coltura, nonché degli apporti di precipitazione ed irrigazione sono altresì indicati. Come è possibile notare, nel 2011 l'andamento dei valori simulati di traspirazione segue il trend dei corrispondenti misurati durante stagione irrigua, eccetto che durante il mese di settembre nel quale si verifica una leggera sottostima. In ogni caso è da notare che, in conseguenza delle precipitazioni di inizio ottobre, sia i valori misurati che quelli simulati di traspirazione effettiva tendono a risultare prossimi ai valori massimi del periodo.



Figura 5.20 - Andamento temporale dei valori misurati e simulati, nella stagione irrigua 2012, del contenuto idrico del suolo in corrispondenza ai 25 punti di controllo. Le simulazioni sono state condotte ipotizzando due distinte funzioni di risposta allo stress idrico della pianta (caso A e caso B)

L'esame dei dati relativi al 2012 evidenzia che la traspirazione effettiva misurata si attesta ai livelli di quella massima in conseguenza dell'evento irriguo del 21 luglio 2012. D'altra parte, i valori di traspirazione effettiva simulata dal modello risultano in generale molto prossimi ai valori massimi durante l'intero periodo di simulazione, eccetto che nel mese antecedente il primo adacquamento, in relazione alla progressiva riduzione dei contenuti idrici del suolo.

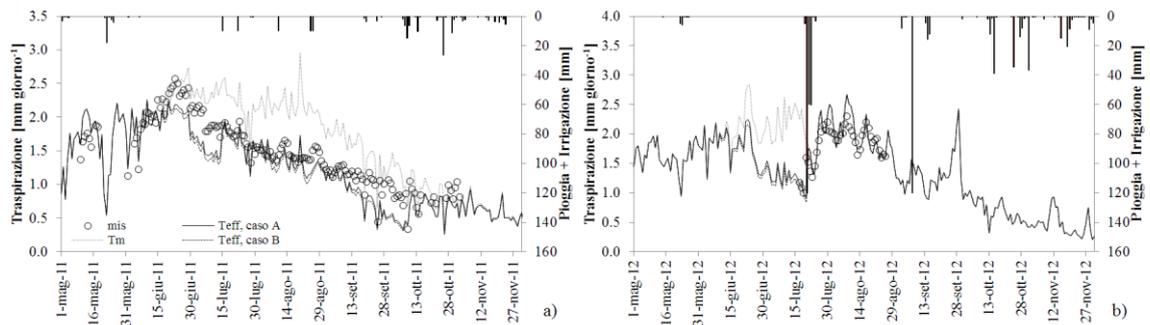


Figura 5.21 - Andamento temporale dei valori di traspirazione effettiva misurata e simulata considerando le due funzioni, sigmoide (caso A) e lineare (caso B), di risposta allo stress idrico della pianta nel 2011 (a) e 2012 (b). I valori di traspirazione massima, delle precipitazioni e degli apporti irrigui sono altresì indicati

La Figura 5.22 mostra infine i valori cumulati della traspirazione effettiva, misurata e simulata considerando le due funzioni di risposta allo stress, relativa ai due periodi del 2011 e 2012 nei quali si disponeva delle misure (4 luglio-15 ottobre 2011 e 17 luglio-27 agosto 2012). Come è possibile osservare nel 2011, nei 134 giorni di misura, la traspirazione simulata è risultata pari a 179.5 mm nel caso A con una differenza di 23 mm rispetto al corrispondente valore cumulato misurato e pari a 173.6 mm nel caso B, con una differenza di 28.9 mm rispetto al corrispondente misurato.

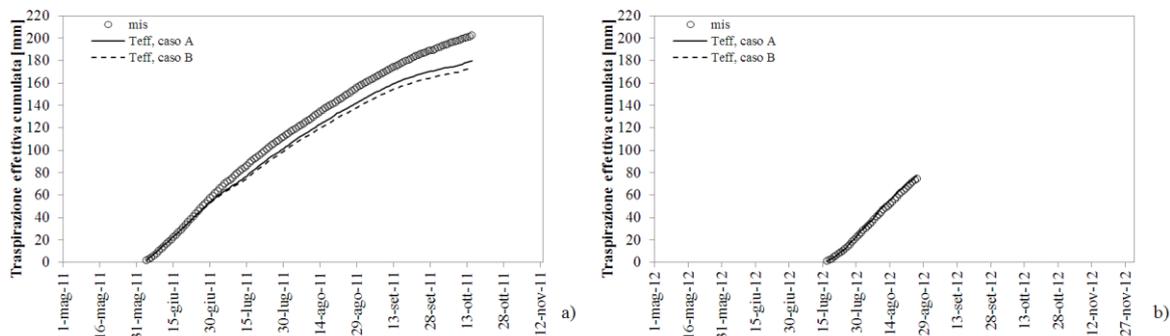


Figura 5.22 - Traspirazione cumulata simulata dal modello HYDRUS-2D nei due casi esaminati e misurata dai sensori sap flow nel 2011 (a) e nel 2012 (b)

Nei 41 giorni consecutivi di misura del 2012, la traspirazione simulata considerando entrambe le funzioni di stress è risultata molto prossima con differenze nel periodo pari a 2.4 mm nel caso A ed a 2.1 mm nel caso B. Per entrambi i periodi esaminati quindi, l'utilizzazione di una funzione di risposta allo stress idrico di forma sigmoidale determina un leggero miglioramento dei risultati della simulazione.

Al fine di valutare le performance del modello HYDRUS-2D nella stima dei contenuti idrici del suolo e della traspirazione effettiva della pianta, la tabella 5.8 riporta i risultati dell'analisi statistica condotta.

Tabella 5.8 - Parametri statistici ottenuti considerando, come input del modello, le funzioni di risposta allo stress idrico della pianta di tipo sigmoidale (caso A) e lineare (caso B). N indica il numero di dati utilizzato

Variabile	Parametri statistici	Caso A)		Caso B)	
		2011	2012	2011	2012
	N	400	400	400	400
Contenuto idrico del suolo	<i>Bias</i> [cm ³ cm ⁻³]	-0.004	-0.056	-0.007	-0.057
	<i>RMSE</i> [cm ³ cm ⁻³]	0.041	0.091	0.041	0.089
	<i>NSE</i> [-]	0.511	0.180	0.517	0.165
	N	152	41	152	41
Traspirazione effettiva	<i>Bias</i> [mm giorno ⁻¹]	-0.161	0.059	-0.200	0.051
	<i>RMSE</i> [mm giorno ⁻¹]	0.091	0.055	0.110	0.057
	<i>NSE</i> [-]	0.614	0.444	0.534	0.420

L'esame della tabella evidenzia che in entrambi i casi esaminati il modello HYDRUS-2D consente di stimare, con adeguata accuratezza, sia i contenuti idrici del suolo che i valori di traspirazione effettiva della pianta, con valori dell'indice NSE sempre positivi.

Tra i due casi esaminati si può notare che i parametri statistici associati all'utilizzazione della funzione di risposta allo stress idrico di tipo sigmoidale indicano una performance del modello leggermente migliore rispetto all'utilizzazione di una funzione di tipo lineare.

5.3 Validazione ed applicazione del modello FAO-56

La validazione del modello FAO-56 è stata condotta con riferimento all'azienda "Tenute Rocchetta" nella quale era disponibile un database di misure relative alla gestione dell'irrigazione ed ai consumi evapotraspirativi effettivi della vegetazione. L'applicazione è stata effettuata, ad una scansione temporale di otto giorni, assumendo sia i valori dei coefficienti colturali proposti da Allen e Pereira (2009), che quelli analiticamente determinati sulla base della stima dell'indice di area fogliare e dell'albedo rilevati da remoto (c

La figura 5.23 riporta, per il periodo compreso tra il 2009 e il 2014, i valori del coefficiente colturale K_c proposti da da Allen en Pereira (2009) per la coltura dell'olivo nonché quelli analiticamente determinati utilizzando l'equazione 2.12 proposta da D'Urso et al., (1999, 2001) che ha richiesto l'uso di serie temporali di mappe di LAI e di albedo ricavate dal sensore remoto MODIS.

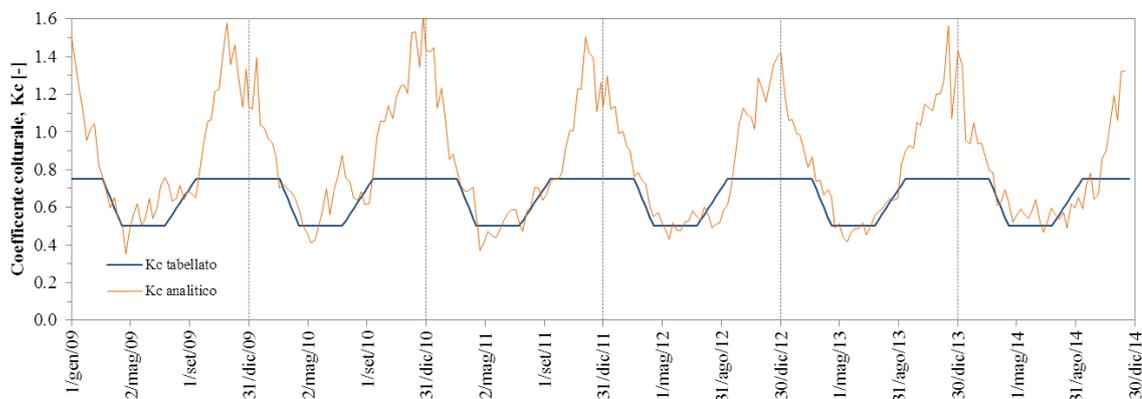


Figura 5.23 - Andamento temporale del coefficiente colturale stimato analiticamente (eq. 2.12) o ottenuto sulla base di quelli tabellati per le diverse fasi del ciclo vegetativo, nel periodo 2009-2014

Come si può notare, nei periodi compresi tra gennaio e marzo e tra metà settembre e dicembre, nei quali oltre alla coltura dell'olivo è generalmente presente vegetazione spontanea sotto chioma, i valori del coefficiente colturale tabellati risultano costanti e pari a 0.75, mentre invece assumono un valore pari a 0.50 nel periodo compreso tra aprile e luglio. Diversamente, i valori del coefficiente K_c analiticamente determinati, risultano invece prossimi a circa 1.50 nel mese di gennaio per ridursi gradualmente fino ad un valore di circa 0.60 verso metà aprile; tale valore viene mantenuto all'incirca fino al mese di

settembre, per crescere nel periodo successivo, fino alla fine dell'anno. I valori dei K_c analitici nel periodo autunno-vernino e primaverile, più elevati rispetto ai valori estivi, sono verosimilmente conseguenti alla vegetazione spontanea che ricopre il suolo nei periodi più umidi, circostanza questa alla quale consegue un incremento dei valori del LAI . Con riferimento agli anni dal 2009 al 2014, l'applicazione del modello FAO-56 ha consentito di stimare, nei due casi esaminati, l'evapotraspirazione effettiva della coltura dell'olivo, i cui andamenti temporali sono rappresentati in figura 5.24. La figura 5.24 riporta altresì i valori di evapotraspirazione effettiva misurati con la tecnica della correlazione turbolenta, nonché le altezze degli apporti di precipitazione ed irrigazione, cumulati negli otto giorni.

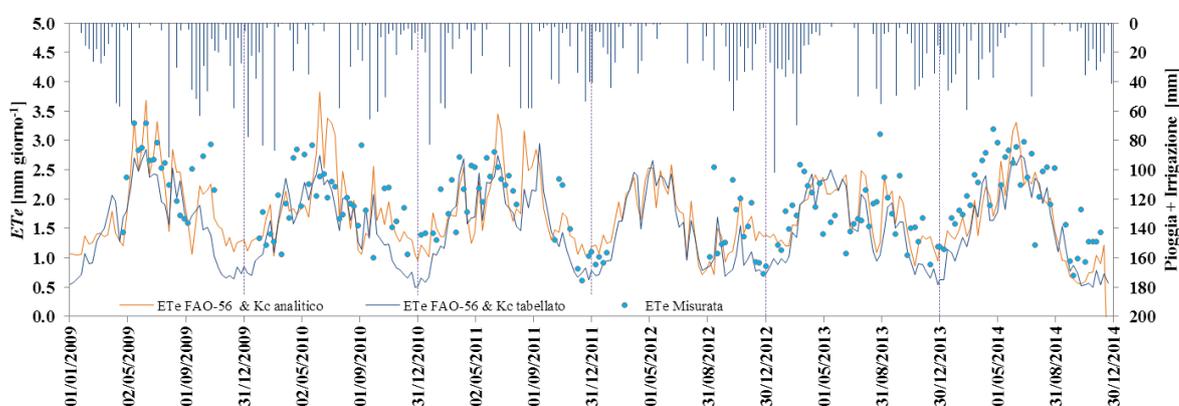


Figura 5.24 - Evapotraspirazione effettiva misurata e simulata con il modello FAO-56 nel periodo 2009-2014, utilizzando sia i valori dei coefficienti culturali tabellati, che quelli analiticamente determinati

Come si può notare, i valori di evapotraspirazione effettiva stimati con entrambe le metodologie di valutazione dei coefficienti culturali seguono in generale il trend dei valori misurati. Nonostante le notevoli differenze osservate sui K_c nel corso dei periodi autunnali ed invernali, i valori di ET_e simulati dal modello evidenziano differenze abbastanza contenute, in relazione alla bassa richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera che caratterizza tali periodi.

La tabella 5.9, per i diversi anni esaminati, riporta i valori degli statistici associati alle suddette simulazioni; come si può notare, la stima dell'evapotraspirazione effettiva che utilizza i coefficienti culturali tabellati è caratterizzata da valori annuali del parametro $RMSE$ variabili tra $0.52 \text{ mm giorno}^{-1}$ e $0.74 \text{ mm giorno}^{-1}$, del tutto confrontabili con i corrispondenti ottenuti considerando i valori di K_c analiticamente determinati. Tuttavia, l'uso dei coefficienti culturali analitici è da preferire in quanto determina valori dell'indice

di Nash leggermente superiori per maggior parte degli anni considerati, nonché un valore positivo quando si considera l'intero database di misure.

Tabella 5.9 - Analisi statistica dell'evapotraspirazione effettiva simulata dal modello FAO56 utilizzando i coefficienti culturali tabellati e analiticamente determinati

Anno	N	FAO-56 K_c tabellati				FAO-56 K_c analitici			
		<i>RMSE</i>	<i>NSE</i>	<i>Bias</i>	<i>PBias</i>	<i>RMSE</i>	<i>NSE</i>	<i>Bias</i>	<i>PBias</i>
		[mm giorno ⁻¹]	[-]	[mm giorno ⁻¹]	[%]	[mm giorno ⁻¹]	[-]	[mm giorno ⁻¹]	[%]
2009	20	0.74	-0.91	-0.27	-11.20	0.54	-0.02	-0.14	-5.79
2010	36	0.60	-0.36	-0.14	-7.39	0.74	-1.04	0.03	1.47
2011	31	0.52	0.20	-0.32	-16.44	0.55	0.10	-0.15	-7.68
2012	19	0.64	-0.56	-0.37	-27.06	0.58	-0.28	-0.04	-2.74
2013	38	0.59	-0.46	-0.16	-9.35	0.57	-0.33	0.00	0.04
2014	40	0.70	-0.07	-0.43	-21.77	0.61	0.20	-0.30	-15.23
Tutti i dati	184	0.63	-0.02	-0.28	-14.58	0.61	0.05	-0.10	-5.52

Sebbene l'utilizzo dei coefficienti K_c analiticamente determinati comporta un miglioramento della stima dell'evapotraspirazione effettiva, il suo utilizzo appare invece molto utile nelle applicazioni del modello su vaste estensioni e con un approccio di calcolo a parametri spazialmente distribuiti.

Pertanto, a titolo di esempio e con riferimento al 2009, nell'intero distretto irriguo identificato dalla zona 1/A del comprensorio, è stata effettuata un'applicazione del modello FAO-56 a scala distribuita per la stima di tutti i termini del bilancio idrologico nonché per la programmazione dell'irrigazione (scheduling). A tal fine è stata assunta una soglia di intervento irriguo costante per l'intero distretto considerato e corrispondente a $\theta=0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ed è stato ipotizzato che i volumi di adacquamento siano tali da incrementare il contenuto idrico del suolo fino ad un valore di $\theta=0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, pur nella consapevolezza che tali parametri debbano essere scelti sulla base dello specifico sistema pedo-culturale, come pure in relazione alle strategie di gestione dell'irrigazione che si intendono perseguire.

La figura 5.25 riporta la variabilità dell'evapotraspirazione effettiva della zona 1/A simulata dal modello FAO-56 in diversi periodi del 2009. Come si può notare nei periodi di inizio anno considerati, l'evapotraspirazione effettiva si attesta a valori compresi tra 0 e 1 mm giorno^{-1} . Nei mesi successivi i valori di evapotraspirazione effettiva tendono a crescere fino a raggiungere valori massimi nel periodo estivo, durante i quali si registrano massimi locali intorno a 5 mm giorno^{-1} , soprattutto nelle zone in cui la coltura prevalente è l'agrumeto. Successivamente i valori di evapotraspirazione tendono a decrescere fino a

raggiungere a dicembre i valori minimi caratteristici dei periodi invernali. Inoltre, dall'esame di fig. 5.25 si può notare come le aree occidentali del comprensorio risultano caratterizzate da valori di evapotraspirazione prossimi a zero, come conseguenza della presenza di zone urbane in prossimità del comprensorio irriguo.

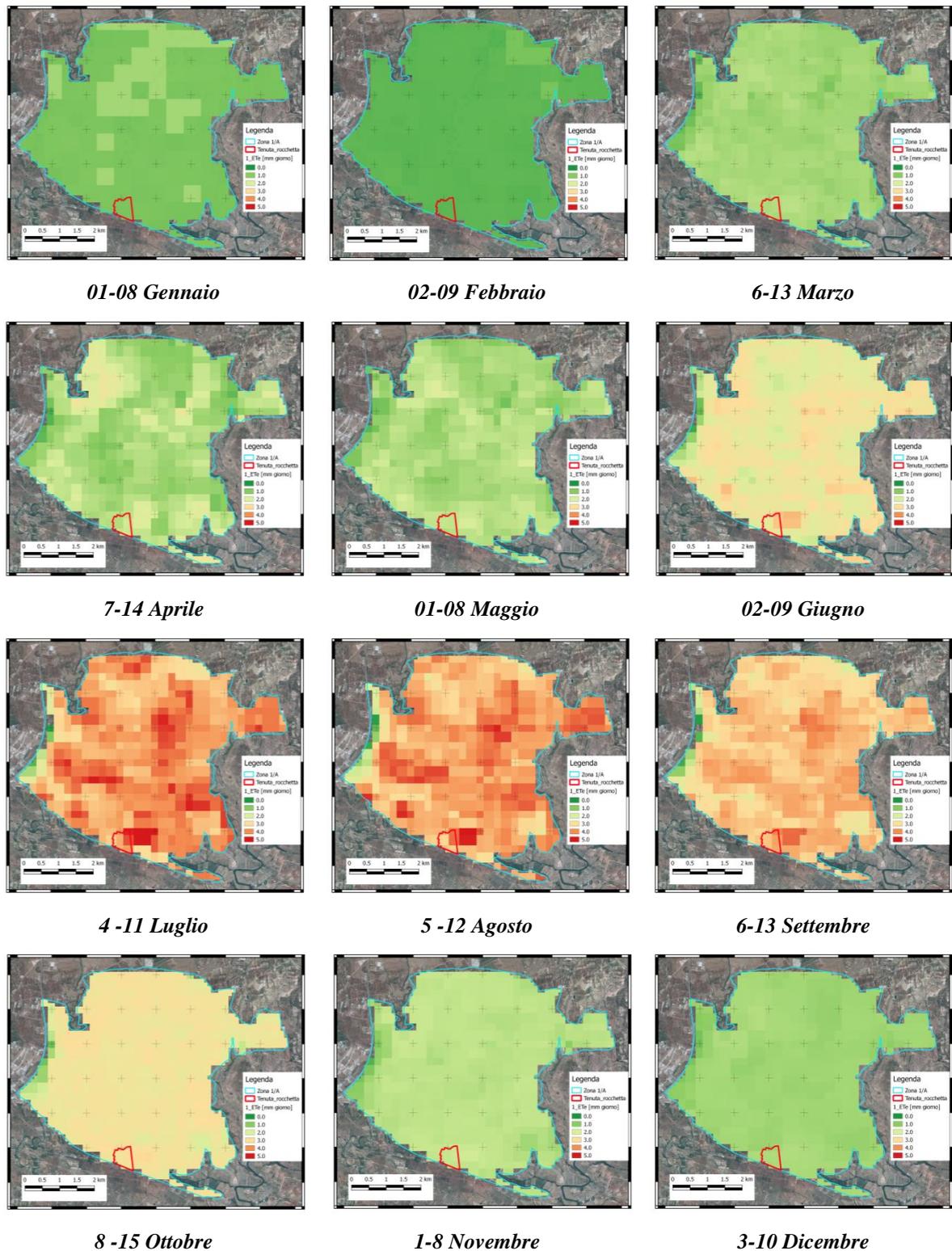


Figura 5.25 – Variabilità dell'evapotraspirazione effettiva nella zona 1/A in diversi periodi del 2009

Con riferimento a diversi intervalli della stagione irrigua 2009, la fig. 5.26 riporta le mappe dei contenuti idrici del suolo alla fine di ciascun periodo esaminato, sulle quali, a sud del distretto irriguo, è identificata l'azienda sperimentale.

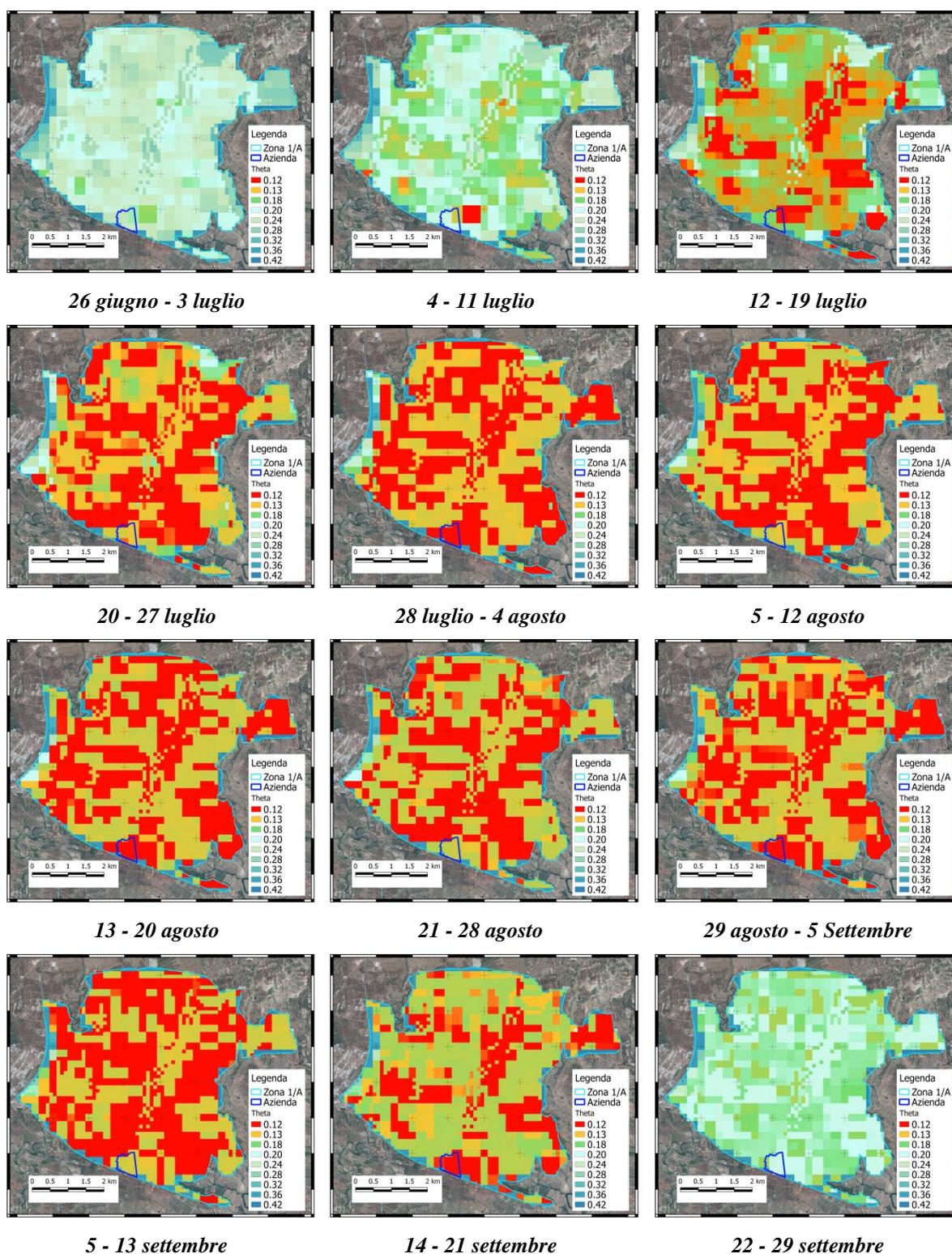


Figura 5.26 - Variabilità spatio-temporale dei contenuti idrici del suolo durante la stagione irrigua 2009 nella zona 1/A

In tali mappe, i pixels indicati in rosso corrispondono a valori del contenuto idrico del suolo prossimi a quello relativo alla soglia di intervento irriguo assunta nelle simulazioni ($\theta=0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). La variabilità spazio temporale di tali pixels mostrano pertanto le scenario delle somministrazioni irrigue determinate dal modello FAO-56. In particolare si osserva chiaramente come le prime somministrazioni irrigue (4-11 luglio) riguardano la zona del comprensorio in cui prevale l'agrumeto. Le successive somministrazioni irrigue (12-19 luglio) vengono invece programmate nelle aree in cui prevale la coltura della vite, e successivamente nelle aree coltivate ad olivo con un alternanza temporale che prosegue vino alla prima decade di settembre.

Questo tipo di approccio, permettendo di stimare i fabbisogni irrigui a scala comprensoriale, può rappresentare un valido strumento per la gestione dell'irrigazione collettiva, in modo da tenere conto delle effettive necessità delle colture, con conseguente risparmio della risorsa idrica e, in taluni casi, anche energetica.

5.4 Modello di stima dell'evapotraspirazione effettiva attraverso dati remoti

L'applicazione dell'equazione di Penman-Monteith, associata ad un modello di stima della resistenza superficiale che utilizza dati remoti disponibili dal sensore MODIS, ha permesso la stima diretta dell'evapotraspirazione effettiva, alla stessa scala spaziale di quella che caratterizza i pixels MODIS.

Nella fase preliminare di calibrazione del modello, i valori dell'indice termico di vegetazione, VTI (equazione 4.1) sono stati determinati considerando le temperature superficiali massima e minima registrate tra il 2009 e il 2010. Tali valori sono stati quindi correlati con i corrispondenti valori di resistenza superficiale, ottenuti per mezzo dell'equazione 2.13. Relativamente al periodo di calibrazione, la figura 5.27 mostra i valori di resistenza superficiale r_c in funzione dei corrispondenti valori di VTI , per i diversi periodi dell'anno, identificati per mezzo del giorno giuliano. Come si può osservare, quando l'indice termico di vegetazione, VTI , assume valori compresi tra 0 ed un valore soglia $VTI^*=0.4$ (corrispondenti a una temperatura superficiale compresa tra 11.2 °C e 24.4 °C), i valori di r_c si disperdono intorno al valore di circa 184 s m⁻¹. Tale valore di resistenza, riscontrato generalmente nei periodi da gennaio a metà aprile e da metà

settembre a dicembre, caratterizzati dai valori più contenuti di LST , risulta dello stesso ordine di grandezza di quelli osservati da altri ricercatori per la coltura dell'olivo (Testi et al., 2006; Orgaz et al., 2007).

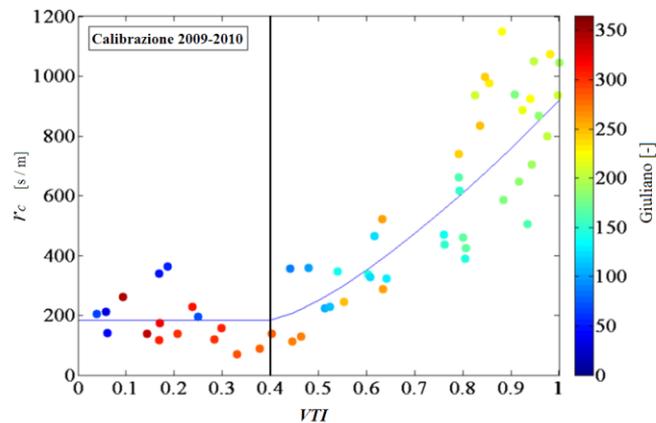


Figura 5.27 - Relazione tra la resistenza superficiale, r_c e l'indice termico di vegetazione, VTI . La scala di colori sulla destra indica il giorno giuliano

Per $VTI > VTI^*$, i valori di r_c crescono al crescere di VTI , secondo un andamento che può essere rappresentato dalla seguente relazione funzionale, mostrata in figura 5.27:

$$r_c = r_{c,min} + a (VTI - VTI^*)^b \quad (5.1)$$

nella quale $r_{c,min}$ è la minima resistenza superficiale del sistema considerato, mentre a e b sono parametri di calibrazione. Per il sistema esaminato, considerando $r_{c,min}=184 \text{ s m}^{-1}$ e $VTI^*=0.4$, i parametri di calibrazione a e b sono risultati rispettivamente pari a 1464 s m^{-1} e 1.35.

I valori di resistenza superficiale ottenuti utilizzando la relazione funzionale $r_c=f(VTI)$, come pure i conseguenti valori di evapotraspirazione effettiva, sono stati quindi stimati nel periodo 2011-2014 e confrontati con quelli misurati dalla torre di Eddy Covariance. La figura 5.28 a, che mostra la dinamica temporale dei valori osservati e stimati della resistenza superficiale apparente relativamente all'intero periodo di indagine (2009-2014), evidenzia il soddisfacente adattamento dei valori stimati di r_c rispetto ai corrispondenti misurati, confermando l'adeguatezza della metodologia proposta.

In figura 5.28b è riportata la dinamica dell'evapotraspirazione effettiva calcolata mediante l'equazione di Penman-Monteith, nella quale i valori di r_c sono stimati mediante l'equazione 5.1. Nella stessa figura è altresì indicato l'andamento dell'evapotraspirazione

effettiva contenuta nel prodotto MOD16A2. Come si può osservare, la metodologia proposta per la stima della resistenza superficiale, combinata con l'equazione di Penman-Monteith, è caratterizzato da un migliore adattamento rispetto al prodotto MOD16A2, caratterizzato da una significativa sottostima dell'evapotraspirazione effettiva specialmente durante i periodi secchi. Analoghe sottostime associate al considerato prodotto MOD16A2 sono state in precedenza osservate in diversi sistemi colturali, anche da Ramoelo et al. (2014) e Ruhoff et al. (2013).

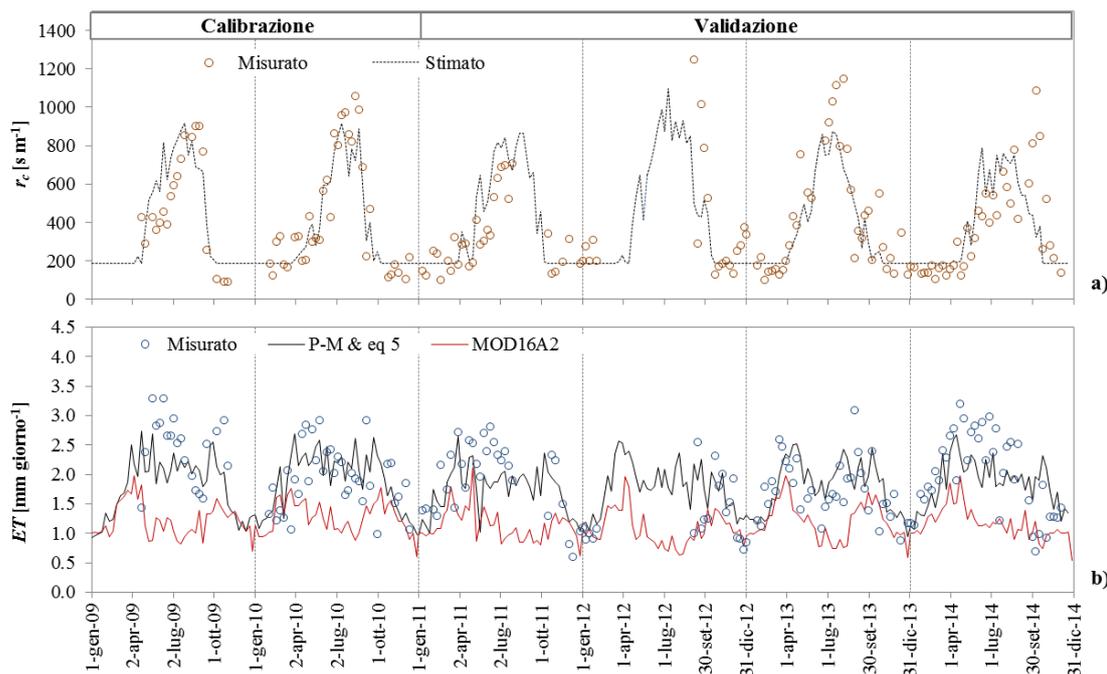


Figura 5.28 - Andamento temporale dei valori misurati e stimati della resistenza superficiale (a) e corrispondenti valori dell'evapotraspirazione effettiva (b) nel periodo 2009-2014. E' altresì indicato l'andamento di ET_e ottenuto dal prodotto MOD16A2

La figura 5.29 mostra, per il solo periodo di validazione (2011-2014), il confronto tra i valori medi giornalieri di evapotraspirazione effettiva stimata utilizzando sia la metodologia proposta che i valori ottenuti dal prodotto MOD16A2, con corrispondenti misurati. Come si può osservare, se da una parte la metodologia proposta permette di stimare adeguatamente i valori medi giornalieri di ET_e , dall'altra si osserva una generale sottostima di ET_e associata al prodotto MOD16A2. In effetti, l'analisi statistica riportata in tabella 5.10 per i diversi anni esaminati consente di verificare come la metodologia proposta risulta essere caratterizzata da valori del parametro $RMSE$ sempre minori di $0.6 \text{ mm giorno}^{-1}$, valori di bias contenuti ed indice di NSE sempre positivo.

D'altra parte i più alti valori di *Bias* e *RMSE*, come pure i valori negativi dell'indice *NSE* che caratterizzano il prodotto MOD16A2 sono una conseguenza del peggiore adattamento associato allo stesso.

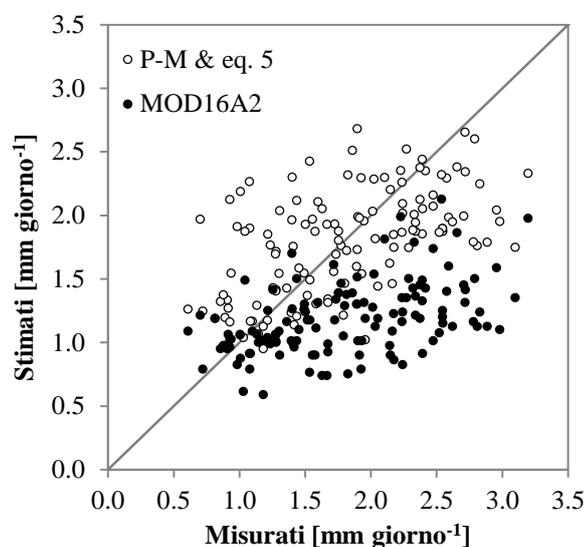


Figura 5.29 - Confronto tra i valori misurati di ET_e ed i corrispondenti valori stimati ottenuti con la metodologia proposta ed ottenuti dal prodotto MOD16A2

Tabella 5.10 - Analisi statistica per la valutazione del modello proposto e del prodotto MOD16A2

Anno	N	Modello proposto				MOD16A2			
		<i>RMSE</i> [mm giorno ⁻¹]	<i>NSE</i> [-]	<i>Bias</i> [mm giorno ⁻¹]	<i>PBias</i> [%]	<i>RMSE</i> [mm giorno ⁻¹]	<i>NSE</i> [-]	<i>Bias</i> [mm giorno ⁻¹]	<i>PBias</i> [%]
2011	31	0.48	0.32	-0.19	-9.60	0.93	-1.57	-0.75	-38.58
2012	19	0.49	0.08	0.19	13.77	0.49	0.09	-0.26	-19.48
2013	38	0.47	0.08	0.13	7.45	0.67	-0.85	-0.50	-29.26
2014	40	0.60	0.22	-0.11	-5.67	0.99	-1.15	-0.80	-40.28
Tutti dati	128	0.52	0.30	-0.02	-0.83	0.83	-0.78	-0.62	-34.41

La metodologia proposta offre il vantaggio di potere stimare i consumi evapotraspirativi effettivi della vegetazione utilizzando direttamente la formulazione di Penman-Monteith, accoppiata ad un semplice modello di stima della resistenza superficiale che si basa su prodotti standard, ricavabili dal sensore MODIS. Tale peculiarità offre anche la possibilità di applicazioni finalizzate alla stima della variabilità spaziale dell'evapotraspirazione effettiva, laddove siano presenti reti di monitoraggio a terra dei parametri climatici di base. Tuttavia, eventuali applicazioni a scala regionale rendono necessaria una ulteriore parametrizzazione del modello di resistenza proposto, al fine di tenere conto dell'effettivo uso del suolo.

6. Conclusioni

La presente tesi, nell'affrontare la tematica relativa alla caratterizzazione del sistema SPA a differenti scale spaziali, ha approfondito alcuni aspetti connessi alla modellazione dei consumi evapotraspirativi effettivi. Le diverse schematizzazioni matematiche utilizzabili per la descrizione dei processi di scambio idrico all'interno del sistema SPA sono state analizzate con l'ausilio di un esteso database di misure sperimentali rilevate negli anni compresi tra il 2009 e il 2014.

Nella prima parte della tesi è riportata un'analisi della letteratura esistente nella quale sono presentati i diversi approcci modellistici finalizzati alla stima dei consumi evapotraspirativi effettivi, in funzione della scala spaziale di indagine considerata. Nella seconda parte, dopo avere effettuato la caratterizzazione agro-climatica di un distretto irriguo nel territorio di Castelvetro (zona 1/A), coltivato ad oliveto per circa il 60% della superficie, è stata condotta una più dettagliata caratterizzazione dei parametri fisici del suolo e biofisici della vegetazione con riferimento ad una parcella sperimentale ubicata all'interno dello stesso comprensorio (azienda "Tenute Rocchetta"). Il rilievo dei parametri relativi alla distribuzione spaziale dell'apparato radicale delle piante di olivo ha consentito la parametrizzazione della funzione che ne consente l'accurata descrizione, nonché l'applicazione del modello HYDRUS-2D, la cui performance è risultata soddisfacente nei due anni di simulazione esaminati, sia in termini di stima del contenuto idrico (indice di efficienza di Nash, *NSE*, pari a 0.517 nel 2011 e 0.165 nel 2012), che in termini di stima dei flussi traspirativi, per i quali l'indice di efficienza di Nash è risultato nei due anni pari a 0.534 e 0.420. D'altra parte, l'utilizzazione di una funzione di stress idrico del tipo sigmoidale rispetto ad una funzione lineare permette un lieve miglioramento sia delle stime del contenuto idrico del suolo (*NSE* pari a 0.511 e 0.180) che di quelle relative ai flussi traspirativi (*NSE* pari a 0.614 e 0.444).

Pertanto, il codice di calcolo HYDRUS-2D può essere utilizzato per il progetto e la gestione degli impianti irrigui aziendali, in quanto permette di stabilire la zona dell'apparato radicale nel quale si concentrano gli attingimenti radicali a seguito di un adattamento, oltre che di definire i volumi da fornire nei singoli adattamenti che consentono di massimizzare l'efficienza dell'irrigazione.

Nel caso in cui si vogliono effettuare valutazioni del termine evapotraspirativo a scala aziendale, il modello FAO-56 risulta uno degli approcci più utilizzati per la sua precisione e semplicità di utilizzo. Nello specifico è stata effettuata una prima validazione a scala parcellare del modello al fine di valutarne l'utilizzabilità per la stima dell'evapotraspirazione effettiva utilizzando sia i valori tabellati del coefficiente colturale, che quelli ottenuti analiticamente sulla base di dati rilevati da remoto. L'applicazione condotta, relativamente al periodo 2009-2014 ha evidenziato che l'uso dei coefficienti colturali analiticamente determinati da mappe di LAI e albedo ottenute da sensori remoti permette una stima accurata della variabilità spazio-temporale dei consumi evapotraspirativi e dei restanti termini del bilancio idrologico utili per la gestione irrigua comprensoriale.

L'uso integrato della modellistica idrologica e di dati remoti ha anche permesso di identificare e proporre una semplice metodologia per la stima diretta dell'evapotraspirazione effettiva basata sull'applicazione dell'equazione di Penman-Monteith, nella quale il termine di resistenza della coltura è stimato in funzione di un indice termico di vegetazione ottenuto da dati remoti acquisiti dal sensore MODIS. La validazione di tale metodologia, condotta su un periodo di 4 anni, ha evidenziato risultati soddisfacenti in termini di stima di evapotraspirazione effettiva con un errore, espresso in termini di *RMSE* pari a $0.52 \text{ mm giorno}^{-1}$ e un indice di efficienza di Nash uguale a 0.30.

Lo sviluppo delle attività condotte nel triennio potranno essere utilmente utilizzate per migliorare la stima dei valori di evapotraspirazione effettiva a differenti scale spaziali e in ambienti caratterizzati da condizioni di stress idrico. Tali stime potranno permettere una più oculata pianificazione della gestione irrigua, oltre che di verificare ed eventualmente modificare i criteri di programmazione normalmente utilizzati, in un'ottica più generale di ottimizzazione e salvaguardia delle risorse idriche.

Bibliografia

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper (56), Rome, Italy.
- Allen R.G., Pereira L.S., 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrig. Sci.* 28, pp. 17–34.
- Amato M., De Lorenzi F., Olivieri B., 1993. Riflettometria nel dominio del tempo (TDR) per la misura dell'umidità volumetrica del terreno. I. principi generali ed applicazioni. *Rivista di Agron.*, 27, 1, pp. 1-8.
- Anderson M.C., Allen R.G., Morse A., Kustas, W.P., 2012. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sens. Environ.*, 122, pp. 50–65.
- Assessorato Agricoltura e Foreste Regione Sicilia. SIAS. Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano. www.sias.regione.sicilia.it
- Bagarello V., Iovino M., Elrick D., 2004. A Simplified Falling-Head Technique for Rapid Determination of Field-Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, pp. 66-73.
- Baker J.M., Lascano R.J., 1989. The spatial sensitivity of time-domain reflectometry. *Soil Science.* 147(5), pp. 378-384
- Baumhardt R.L., Lascano R.J., Evett S.R., 2000. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, pp. 1940–1946.
- Bono et al., 1998. Carta dei suoli dell'area Castelvetro est: Contrada Seggio e limitrofe. Regione Siciliana, Assessorato Agricoltura e Foreste.

- Brivio P.A., Ventura A.D., Rampini A., Schettini R., 1992. Automatic selection of control points from shadow structures. *Int. J. of Rem. Sens.* 13, pp. 1853 – 1860.
- Burba G., Anderson D., 2005. Introduction to the eddy covariance method: General guidelines and conventional workow. LI-COR, Inc.
- Burgess S.S.O., Adams M.A., Bleby T.M., 2000. Measurements of sap flow in roots of woody plants: a commentary. *Tree Physiol.* 20, pp. 909-913.
- Burman, R.D., Nixon P.R., Wright J.L., Pruitt W.O., 1980b. Water requirements, In: Jensen, M.E. (Ed.), *Design of Farm Irrigation Systems*. ASAE Mono., Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, pp. 189-232.
- Burman R.D., Wright J.L., Nixon P.R., Hill R.W., 1980a, Irrigation management-water requirements and water balance, In: *Irrigation, Challenges of the 80's*, Proc. of the Second National Irrigation Symposium. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, pp. 141-153.
- Cammalleri C., 2011. Modelling water and energy balance of the land-atmosphere system Causing high resolution remote sensing data. Tesi di dottorato. Università degli studi di Palermo, 279 pp.
- Cammalleri C., Agnese C., Ciraolo G., Minacapilli M., Provenzano G., 2013. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. *Agric. Water Manage.* 120, pp. 89-97.
- Celia M.A., Bouloutas E.T., Zarba, R.L., 1990. A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resour. Res.*, 26, pp. 1483-1496.
- Ciraolo C., Minacapilli M., Sciortino M., 2007. Stima dell'evapotraspirazione effettiva mediante telerilevamento aereo iperspettrale. *Rivista di Ing. Agr.* 2, pp. 49-60.
- D'Urso G., Menenti M., Santini A., 1999. Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management. *Agric. Water Manage.* 40, pp. 291-302.
- D'Urso G., 2001. Simulation and management of on-demand irrigation systems: a combined agrohydrological and remote sensing approach. Monography, Wageningen University, 174 pp.

-
- Dalton F.N., van Genuchten M.Th., 1986. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*. 38, pp. 237-250.
- Dane J.H., Hopmans J.W., 2002a. Water retention and storage. Laboratory methods: hanging water column, in Dane J. H., Topp G. C., *Methods of Soil Analysis, Physical Methods, Part 4*. Madison, 680-683.
- Dane J.H., Hopmans J.W., 2002b. Water retention and storage. Laboratory methods: pressure plate extractor, in Dane J. H., Topp G. C., *Methods of Soil Analysis, Physical Methods, Part 4*. Madison, 255-293.
- Dasberg S., Hopmans J.W., 1992. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, pp. 1341-1345.
- Dirksen C., Dasberg S., 1993. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, pp. 660-667.
- Doorenbos J., Pruitt W.O., 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, *Irrigation and Drainage Paper no. 24*, FAO-ONU, Rome, Italy, 168 pp.
- Doorenbos J., Pruitt W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, FAO-ONU, Rome, *Irrigation and Drainage Paper no. 24 (rev.)*, 144 pp.
- Droogers P., 2000. Estimation actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. *J. Hydrol.* 229, pp. 50-58.
- FAO, 2011. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.
- Feddes R.A., Kowalik P.J., Zaradny H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. Pudoc, Centre Agric. Publ. Doc., Wageningen
- Fernandez J.E., Palomo M.J., Diaz-Espejo A., Chlotier B.E., Green S.R., Giron I.F., Moreno F., 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agric. Water Manage.* 51, pp. 99-123.

-
- Ferré P.A., Topp G.C., 2002. Time domain reflectometry. In *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*. Madison, Wisconsin, pp. 434-446.
- Ford C.R., Goranson C.E., Mitchell R.J., Will R.E., Teskey R.O., 2004. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees. *Tree Physiol.* 24, pp. 951–960.
- Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., et al., 2002. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Rem. Sens. of Env.* 83(1–2), pp. 287–302.
- Giorio P., Fragnito F., 2002. L'impiego della tecnica della velocità dell'impulso di calore compensato per la stima del flusso linfatico dell'olivo. Atti del "Convegno Internazionale di Olivicoltura - VI Giornate Scientifiche SOI", Spoleto, Italia, 22-25 aprile 2002.
- Global Modeling and Assimilation Office, 2004. File specification for GEOSDAS gridded output version 5.3, report. Greenbelt, Md: NASA Goddard Space Flight Cent.
- Goldstein G.G., Andrade J.L., Meinzer F.C., Holbrook N.M., Cavelier J., Jackson P., Celis A., 1998. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant Cell Environ.* 21, pp. 397–406.
- Granier A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.* 42(2), pp. 193-200.
- Granier A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology.* 3, pp. 309-320.
- Green S.R., Clothier B.E., 1988. Water Use of Kiwifruit Vines and Apple Trees by the Heat-Pulse Technique. *J. of Exp. Botany.* 39(1), pp. 115-123.
- Green S.R., Clothier B.E., 1988. Water use of Kiwifruit vines and Apple trees by heat-pulse technique. *J. of Exp. Botany.* 39, pp. 115-123.
- Guerschman J.P., Van Dijk A.I.J.M., Mattersdorf G., Beringer J., Hutley L.B., Leuning R., Pipunic R.C., Sherman B.S., 2009. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS

-
- data reproduces flux observations and catchment water balance observations across Australia. *J. Hydrol.* 369, pp. 107–119.
- Gupta H.V., Sorooshian S., Yapo P.O., 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering.* 4(2), pp. 135-143.
- Guzinski R., Nieto H., Stisen S., Fensholt R., 2015. Inter-comparison of energy balance and hydrological models for land surface energy flux estimation over a whole river catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, pp. 2017–2036.
- Heimovaara T.G., 1993. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, pp. 1410-1417.
- Herkelrath W.N., Hamburg S.P., Murphy F., 1991. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 27(5), pp. 857-864.
- Huete A., Justice C., van Leeuwen W., 1999. Modis vegetation index (MOD 13) Algorithm theoretical basis document. NASA document http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf
- Jensen M.E., 1968. Water consumption by agricultural plants, In: Kozlowski, T.T. (Ed.), *Water Deficits and Plant Growth*, Vol. II. Academic Press, Inc., New York, NY, pp. 1–22.
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. (Eds.), 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. Am. Soc. Civ. Eng. Manual. 70, 332 pp.
- Jin Y., Schaaf C.B., Woodcock C.E., Gao F., Li X., Strahler A.H., et al., 2003. Consistency of MODIS surface BRDF/Albedo retrievals: 2. Validation. *J. of Geophys. Res.*, 108(D5), 4159.
- Jones H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. of Exp. Botany.* 55(407) pp. 2427-2436
- Kennedy J.B., Neville A.M., 1986. *Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists*, Third Edition, New York: Harper & Row.
-

-
- Knight J.H., 1992. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resour. Res.* 28, pp. 2345-2352.
- Lacape M.J., Wery J., Annerose D.J.M., 1998. Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *Field Crop Res.* 57, pp. 29–43.
- Logsdon S.D., Jordahl J., Karlen D.L., 1993. Tillage and crop effects on ponded and tension infiltration rates. *Soil Till. Res.* 28 (2), pp. 179–189.
- Lu P., Biron P., Breda N., Granier A., 1995. Water relations of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) under soil drought in the Vosges mountains: water potential, stomatal conductance and transpiration. *Ann. Sci. For.* 52, pp. 117–129.
- Lu P., Urban L., Zhao P., 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Bot. Sin.* 46, pp. 631–646.
- Lucht W., Schaaf C.B., Strahler, A.H., 2000. An Algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 38, pp. 977–998.
- Ludwig F., Jewitt R.A., Donovan L.A., 2006. Nutrient and water addition effects on day- and nighttime conductance and transpiration in a C3 desert annual. *Oecologia.*
- Marshall D.C., 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiol.* 33, pp. 385-396
- Merriam J.L., 1966. A management control concept for determining the economical depth and frequency of irrigation. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 9 pp. 492-498.
- Meyers T.P., Hollinger S.E., 2004. An assessment of storage terms in the surface energy balance of corn and soybean. *Agr. Forest Meteorol.* 125, pp. 105-115.
- Monteith J.L., 1965. "Evaporation and environment". *Symposia of the Society for Exp. Biol.* 19 pp. 205–224.
- Monteith J.L., Unsworth M. H., 1990. *Principles of Environmental Physics*, 2nd edn, Edward Arnold: New York, 244 pp.

-
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. of the ASABE*. 50(3), pp. 885–900.
- Mu Q., Heinsch F.A., Zhao M., Running S.W., 2007, Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*. 111, pp. 519-536.
- Mu Q., Zhao M., Running, S.W., 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*. 115(8), pp. 1781-1800.
- Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., et al., 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 83(1–2), pp. 214 –231.
- Nadler A., Dasberg S., Lapid I., 1991. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, pp. 938-943.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. of Hydr.* 10(3), pp. 282-290.
- Newman E.I., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.*, 3, pp. 139-45
- Nino P., Guarino P., 2011. La valutazione delle perdite nelle reti irrigue in pressione: un'esperienza di campo la valutazione delle perdite nelle reti irrigue in pressione: un'esperienza di campo. INEA, collana RISORSE IDRICHE.
- Noborio K., 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 31, pp. 213-237.
- Paltineau I.C Starr J.L., 1997. Real-time water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61, pp. 1576-1585.
- Pasquale G., D'Andria R., Fragnito F., Calandrelli D., Morelli G., 2002. Traspirazione dell'olivo stimata come flusso di linfa mediante la tecnica della velocità dell'impulso di

- calore compensato ed effetti dei parametri ambientali e fisiologici in due diversi regimi idrici nel sud Italia. Proceedings of Convegno Nazionale di olivicoltura, Spoleto, Italy 22-23 Aprile 2002., pp.13-218.
- Pellegrino A., Goz' e E., Lebon E., Wery J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *Europ. J. Agronomy*. 25, pp. 49–59.
- Pellegrino A., Lebon E., Voltz M., Wery J., 2004. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant Soil*. 266, pp. 129–142.
- Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A*, 194, pp. 120-145.
- Philip J.R., 1966. Plant water relations: Some physical aspects. *Ann. Rev. Pl. Physiol*. 17 pp. 245-268.
- Provenzano G., Rallo G., Ghazouani H., 2015. Assessing Field and Laboratory Calibration Protocols for the Diviner 2000 Probe in a Range of Soils with Different Textures. *J. Irrig. Drain Eng*. 10.
- Prueger J.H., Hatfield J.L., Kustas W.P., Hipps L.E., MacPherson J.I., Parkin d T.B., 2005. Tower and aircraft eddy covariance measurements of water vapour, energy and carbon dioxide fluxes during SMACEX. *J. Hydrometeorol*. 6(6), pp. 954-960.
- Ragab R., 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environ. Model. Softw*. 17, pp. 345–361.
- Rallo G., Baiamonte G., Manzano Juárez J., Provenzano G., 2014. Improvement of FAO-56 model to estimate transpiration fluxes of drought tolerant crops under soil water deficit: Application for olive groves. *J. Irrig. Drain. Eng*. 10.1061.
- Rallo G., 2010. Misura e Modellazione degli Scambi Idrici nel Sistema Continuo SPA e approfondimenti sulle Funzioni di Stress Idrico: Applicazione alla coltura dell'Olivio. Tesi di dottorato. Università degli studi di Palermo. 178 pp.
- Rallo G., Provenzano G., 2013. Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea* L.) to soil water deficit conditions. *Agr. Water Manage*. 120, pp. 79–88.

-
- Ramoelo A., Majozi N., Mathieu R., Jovanovic N., Nickless A., Dzikiti, S., 2014. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. *Remote Sensing*. 6(8), pp. 7406-7423.
- Ratliff L.F., Ritchie J.T., Cassel D.K., 1983. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, pp. 770–775.
- Richards L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *J. Appl. Phys.* 1, pp. 318–333.
- Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., Jones R., Knight F., Ogden J., Wendroth O., 2008. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Water-Scale Observatories: a review. *Vadose Zone J.* 7 pp. 358-389.
- Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., Friedman S.P., 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurements in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone J.* 2 pp. 444-475.
- Roth K., Schulin R., Fluhler H., Attinger W., 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26(10), pp. 2267-2273.
- Rouse j.W., Haas R.H., Schell J. A., Deering D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: earth resources technology satellite - symposium, 3., Washington.
- Ruhoff A.L., Paz A.R., Aragao L.E.O.C., Mu Q., Malhi Y., Collischonn W., Rocha H.R., Running S.W., 2013. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Scie. J.* 58, pp. 1-19.
- Sakuratani T., Aoe T., Higuchi. H., 1999. Reverse flow in roots of *Sesbania rostrata* measured using the constant power heat method. *Plant Cell Environ.* 22, pp. 1153-1160.
- Sakuratani T., 1984. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. *J. Agric. Meteorol.* 40, pp. 273-277.
-

- Santini A., 1997. Contenuto d'acqua del suolo. in *Metodi di Analisi Fisica del Suolo*, Parte VIII, M. Pagliai ed., Ministero per le Politiche Agricole, Franco Angeli, Milano, Italia, pp.1-35
- Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251(3-4), pp. 163-176.
- Shuttleworth W.J, Wallace J.S., 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 111, pp. 839–855.
- Šimunek J., Šejna M., van Genuchten M.Th., 1999. 'The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. IGWMC-TPS 53, Version 2.0, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
- Šimunek J., van Genuchten M.Th, Šejna M., 2011. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. In: *Technical Manual, Version 2*. PC Progress, Prague, Czech Republic, 258 pp.
- Smith D.M., Allen S.J., 1996. Measurement of sap flow in plant stems. *J. Exp. Bot.* 47(12), pp. 1833-1844.
- Snyder K.A., Richards J.H., Donovan L.A., 2003. Nighttime conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night? *J. Exp. Bot.*, 54, pp. 861–865.
- Strahler A.H., Muller J.P., Modis Sciences Team Members, 1999. MODIS BRDF albedo product. Algorithm theoretical basis document version 5.0, 53. NASA Document http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf.
- Su Z., 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of the turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth Sciences*. 6(1), pp. 85-99.
- Szeicz G., Long I.F., 1969. Surface resistance of crop canopies. *Water Resour. Res.*, 5, pp. 622–6.

-
- Topp G.C., Davis J.L., 1985. Measurements of soil water content using Time Domain Reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, pp. 19-24.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16(3), pp. 574-582.
- Topp, G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, pp. 678-684.
- Twine T.E., Kustas W.P., Norman J.M., Cook D.R., Houser P.R., Meyers T.P., Prueger J. H., Starks P.J., Wesely M.L., 2000. Correcting eddy covariance flux underestimates over a grassland. *Agr. Forest Meteorol.* 103(3), pp. 279-300.
- van Dam J.C., Huygen J., Wesselin J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Walsum P.E.V., Groenendijk P., van Diepen C.A., 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil–Water– Atmosphere–Plant environment. Report 71, Sub department of Water Resources, Wageningen University, Technical document 45, Alterra Green World Research, Wageningen, The Netherlands, 167 pp.
- van Genuchten M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, pp. 892-898.
- van Genuchten M.Th., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone, Unpublished Research Report, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
- van Genuchten M.Th., Leij F.J., Yates S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions for unsaturated soils. U.S. Salinity Laboratory, Riverside, Ca.
- Vanclooster M., Viane P., Diels J., Christiëns K., 1994. Wave: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and user's manual (release 2.0). Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.

- Vogel T., 1987. SWMII - Numerical model of two-dimensional flow in a variably saturated porous medium, Research Rep. No. 87, Dept. of Hydraulics and Catchment Hydrology, Agricultural Univ., Wageningen, The Netherlands
- Vrugt J.A., Hopmans J.W., Šimůnek J., 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(4), pp. 1027-1037.
- Wan Z., 1999. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) Version 3.3, April 1999" NASA document http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf.
- Williams E.L., Walter L.M., Ku T.C.W., Ling G.K.W., Zak D.R., 2003. Effects of CO₂ and nutrient availability on mineral weathering in controlled tree growth experiments. *Global Biogeochem. Cy.*, 17(2), pp. 1041.
- Wilson K.B., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D., Berbigiere P., Bernhofer C., Ceulemans R., Dolman H., Field C., Grelle A., Ibrom A., Law B.E., Kowalski A., Meyers T., Moncrie J., Monson R., Oechel W., Tenhunen J., Valentini R., Verma S., 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agr. Forest Meteorol.* 113, pp. 223-243.
- WWAP (World Water Assessment Programme), 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO.
- WWAP (World Water Assessment Programme), 2014. The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. Paris, UNESCO.
- Zegelin S.J., White I., Jenkins D.R., 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 25(11), pp. 2367-2376.