

## DINAMICA DEI FLUSSI EVAPOTRASPIRATIVI IN SISTEMI ARBOREI ETEROGENEI

G. Rallo<sup>1</sup>, C. Agnese<sup>1</sup>, C. Cammalleri<sup>2</sup>, M. Minacapilli<sup>1</sup> & G. Provenzano<sup>1</sup>

- (1) Dipartimento di Ingegneria e Tecnologie Agro-Forestali, Università degli Studi di Palermo, Italia, e-mail: [rallo.giovanni@gmail.com](mailto:rallo.giovanni@gmail.com)
- (2) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università degli Studi di Palermo, Italia.

### SOMMARIO

*Nel seguente lavoro, con riferimento ad un oliveto caratterizzato da un basso grado di ricoprimento, pari a circa 35%, è stata analizzata la dinamica dei flussi evaporativi e traspirativi sulla base delle misure di traspirazione ottenute attraverso l'ausilio della tecnica di Granier e di evapotraspirazione dedotte con uno scintillometro (DBSAS-SLS20, Scintec AG). Tale dinamica è stata posta in relazione con l'andamento dei contenuti idrici del suolo e dello stato idrico della pianta, attraverso la misura dei potenziali idrici xilematici. Lo studio, condotto nel territorio di Castelvetro (TP) nella stagione irrigua 2008, ha permesso di individuare la relazione tra flussi traspirativi ed evapotraspirativi, misurati nei giorni immediatamente precedenti e successivi gli interventi irrigui, ed ha inoltre consentito di evidenziare l'entità dello stress causato dalle condizioni idriche osservate nel suolo.*

### 1 INTRODUZIONE

Il fenomeno dell'evapotraspirazione (ET) riveste un ruolo fondamentale nella stesura del bilancio idrologico degli ecosistemi, naturali o modificati dall'uomo, come pure di quelli agrari; dal forte legame tra i flussi d'evapotraspirazione e i processi anabolici delle piante, consegue che tali flussi sono i principali regolatori della produzione primaria di qualsiasi ecosistema (Law *et al.*, 2002).

Il contributo dell'evaporazione dal suolo e della traspirazione della pianta sul totale dell'evapotraspirazione di un determinato ecosistema sono molto variabili sia nel tempo che nello spazio (Ferretti *et al.*, 2003).

Nei sistemi arborei "dispersi", caratterizzati da un parziale ricoprimento spaziale, la modellazione dell'evaporazione dal suolo e della traspirazione dalla pianta appare spesso difficile a causa del numero elevato di variabili da cui dipendono i singoli processi e, soprattutto, della difficile interpretazione del loro legame funzionale. In particolare, tale modellazione è particolarmente complessa nei periodi che seguono un evento piovoso o un intervento irriguo, durante i quali il processo d'evapotraspirazione è più intenso e le grandezze fondamentali, conduttanza del suolo e della canopy, variano rapidamente (Huxman *et al.*, 2004).

Nella presente memoria un set di misure acquisite durante la stagione irrigua 2008

all'interno di un oliveto irrigato a goccia, ha permesso di approfondire la dinamica dei flussi evapotraspirativi sulla base delle misure dei flussi linfatici, ottenute attraverso l'ausilio della tecnica di *Granier* (1985) e dei flussi di evapotraspirazione dedotti con uno scintillometro laser (*DBSAS-SLS20, Scintec AG*). Viene altresì studiata la dinamica dei contenuti idrici del suolo e quella dello stato idrico della pianta, attraverso la misura dei potenziali idrici xilematici.

## 2 MATERIALI E METODOLOGIA SPERIMENTALE

### 2.1 Descrizione dell'area di studio

Le attività sperimentali sono state condotte presso l'azienda agricola "Tenuta Rocchetta" all'interno del territorio di Castelvetro (TP). L'azienda ha un'estensione di circa 30 ha, ed è individuata geograficamente dalle coordinate Est: 310600 m e Nord: 4168500 m (UTM ED-50 33° fuso Nord). L'area di studio presenta un'altitudine media di circa 123 m s.l.m., con una morfologia piuttosto pianeggiante. L'azienda è specializzata nella coltivazione di olive da mensa della varietà "Nocellara del Belice", e la disposizione delle piante segue una geometria rettangolare con piante distanti 8 m tra le file e 5 m sulla fila; la densità di impianto è pertanto di circa 250 piante/ettaro.

Per l'irrigazione è utilizzato un impianto microirriguo con 4 gocciolatori a pianta (due a destra e due a sinistra) di tipo on-line e portata nominale di 8 l/h ciascuno.

### 2.2 Installazioni sperimentali

Nel corso della stagione irrigua 2008 il sito sperimentale è stato oggetto di misure di evapotraspirazione effettiva, derivate mediante tecnica micro-meteorologica, misure di flussi traspirativi e di stato idrico della pianta e misure di contenuto idrico del suolo. Dalla stazione n. 302 del Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS), limitrofa all'area d'indagine, sono stati acquisiti i principali dati meteorologici a scala oraria. I valori orari di evapotraspirazione sono stati ottenuti mediante un'installazione micro-meteorologica, che include uno scintillometro laser.

Lo scintillometro laser è uno strumento ottico, che consiste di un trasmettitore di luce coerente e di un ricevitore che misura le fluttuazioni d'intensità ("scintillazioni") che il segnale subisce al passaggio attraverso l'atmosfera turbolenta. Le scintillazioni sono dovute alla diffrazione indotta dalla disomogeneità dell'indice di rifrazione dell'aria,  $n$ , che essendo dipendente principalmente dalla temperatura, può essere correlato al flusso di calore sensibile,  $H$  [ $W m^{-2}$ ]. I parametri direttamente acquisibili dallo scintillometro sono il parametro di struttura dell'indice di rifrazione dell'aria,  $C_n^2$  [ $m^{-2/3}$ ], che descrive l'ampiezza delle fluttuazioni dell'indice stesso e la cosiddetta *inner scale*,  $l_0$  [m], che denota la dimensione dei vortici turbolenti alla transizione tra le regioni inerziale e dissipativa dello spettro turbolento.

Utilizzando l'approccio proposto da *Thiermann & Grassl* (1992), basato sulla teoria di similarità atmosferica di Monin-Obukhov (*Brutsaert*, 2005; *Stull*, 1998), a partire dalle misure di  $C_n^2$  e  $l_0$  è possibile stimare il flusso di calore sensibile mediante la seguente relazione:

$$H = -\rho c_p u^* \theta^* \quad (1)$$

in cui  $\rho$  è la densità dell'aria [ $kg m^{-3}$ ],  $c_p$  è il calore specifico dell'aria a pressione



costante [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $u^*$  è la velocità di attrito [ $\text{m s}^{-1}$ ] e  $\theta^*$  è la scala di temperatura [K]. Per altri dettagli sui principi teorici a cui brevemente si è fatto cenno, e in particolare sull'approccio di *Thiermann & Grassl* (1992), si rimanda alla letteratura specifica (*de Bruin et al.*, 2002).

Noto il flusso di calore sensibile, è possibile ricavare il flusso di calore latente,  $\lambda ET$  [ $\text{W m}^{-2}$ ], dall'equazione del bilancio energetico:

$$\lambda ET = R_n - H - G_0 \quad (2)$$

nella quale il flusso di radiazione netta,  $R_n$ , e il flusso di calore del suolo,  $G_0$ , sono misurati mediante appositi sensori.

Nell'indagine condotta è stato utilizzato uno scintillometro *Scintec AG* modello *DBSAS SLS20*, le cui caratteristiche sono riassunte in Figura 1.

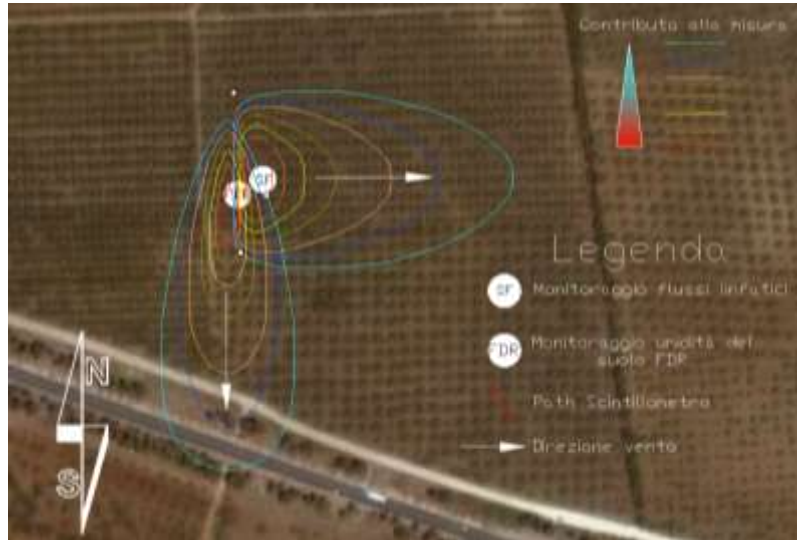
	<b>Lunghezza d'onda</b>	670 nm (rosso)
	<b>Sorgente di luce</b>	diode laser (classe IIIa)
	<b>Numero sorgenti e distanza</b>	n. 2 d=2.7 mm
	<b>Divergenza fascio</b>	5 mrad
	<b>Distanza T - R</b>	L=50÷250 m
	<b>Temp. di funzion.</b>	-20°C ÷ +50 °C
	<b>Dimensioni (LxLxH)</b>	0.65 m x 0.11 m x 0.11 m
	<b>Peso</b>	2.9 kg (T) 2.7 kg (R)
	<b>Range caratteristici</b>	
	$C_n^2$	$1 \times 10^{-6} \div 3 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$
	$l_0$	2 ÷ 16 mm

**Figura 1.** Caratteristiche tecniche dello scintillometro DBSAS-SLS20, Scintec AG.

La strumentazione accessoria dell'installazione è costituita da un piranometro, per la misura della radiazione solare incidente,  $R_s$ , da un radiometro netto (pir-radiometro), per la misura della radiazione netta,  $R_n$ , da 3 piastre di flusso poste alla profondità di 0.10 m, per la determinazione del flusso di calore nel suolo,  $G_0$ , da un barometro, per la misura della pressione atmosferica,  $P_a$ , e da due termometri ventilati tipo Pt1000, per la stima della differenza di temperatura dell'aria lungo la verticale dalla chioma fino ad una quota di 2 m al disopra della stessa. Il complesso della strumentazione è collegato, tramite una centralina e un sistema connessione RS232, ad un computer per la registrazione in contemporanea di tutti i dati acquisiti.

La scelta delle piante dove installare le sonde *sap flow*, e sulle quali eseguire il monitoraggio del potenziale idrico xilematico e del contenuto idrico del suolo, è stata definita considerando l'area d'influenza della misura scintillometrica (*footprint*) nelle due condizioni di vento (velocità media di un periodo di quattro anni,  $U=2.5 \text{ m s}^{-1}$ ) ortogonale e parallelo alla direzione del raggio laser.

Nella Figura 2 è riportata la zona nella quale sono state installate le apparecchiature sperimentali.



**Figura 2.** Localizzazione dei siti di misura del flusso linfatico (SF) e del contenuto idrico del suolo (FDR). Posizione dello scintillometro e del relativo footprint calcolato nelle due ipotesi di vento ( $U=2.5 \text{ m s}^{-1}$ ) ortogonale e parallelo alla direzione del raggio laser.

La misura diretta dei flussi traspirativi della pianta è stata eseguita utilizzando il metodo *Granier* (1985), basato sul principio di dissipazione termica. La tecnica utilizza sensori, costituiti da una coppia d'aghi, ciascuno contenente una termocoppia e avvolti con un rivestimento resistivo. La differenza di temperatura,  $\Delta T$  [K], che si genera tra il sensore superiore (costantemente riscaldato) e quello inferiore (che registra la temperatura del legno), è un indice dell'attività traspirativa della pianta, e, attraverso l'equazione di *Granier* (1985) può essere legata alla densità di flusso,  $v$  [ $\text{ml cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ]:

$$v = 0.714 \left( \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T} - 1 \right)^{1.231} \quad (3)$$

nella quale  $\Delta T_{\max}$  [K] rappresenta il massimo valore giornaliero misurato per il differenziale termico, cui corrisponde la condizione di assenza di flusso. Per la stima di  $\Delta T_{\max}$  è stata seguita la procedura di *Lu et al.* (2004), nella quale la condizione di assenza di flusso è individuata mediante analisi di regressione della sequenza di valori di  $\Delta T_{\max}$  misurati in 10 giorni.

Il flusso traspirativo,  $Q_r$  [ $\text{ml min}^{-1}$ ], della pianta è ottenuto moltiplicando la densità di flusso per la superficie conduttiva  $S$  [ $\text{cm}^2$ ], che è funzione dello spessore del sapwood e del diametro del fusto della pianta. La determinazione dello spessore della parte conduttiva del tronco è stata eseguita per via colorimetrica su carote di legno estratte da più punti del tronco di piante d'olivo con il succhiello di *Pressler*. Le carote estratte sono state immerse all'interno di un liquido colorante (metil-arancio) che, reagendo con la linfa mette in risalto la parte conduttiva. La carota di legno colorata è stata quindi acquisita come immagine e, attraverso una procedura di *image analyzing*, eseguita col programma *Image-Pro*, sono stati costruiti i profili di variazione di intensità di colore e

sulla base di quest'ultimi, determinato lo spessore della parte conduttiva.

Per il passaggio dai valori dei flussi traspirativi ottenuti alla scala di pianta a quelli alla scala di campo, è stato utilizzato il rapporto tra l'indice d'area fogliare medio delle piante contenute all'interno del footprint dello scintillometro,  $\overline{LAI}$  [ $m^2m^{-2}$ ], ed il  $LAI$  della pianta cui è riferita la misura di sap flow [ $m^2m^{-2}$ ]. Questo fattore è risultato pari a circa 1.2.

Lo stato idrico della pianta è stato monitorato, misurando il potenziale idrico dello xilema e dell'asse con la camera pressiometrica di Scholander (Turner & Jarvis, 1982), utilizzando per ambedue le misure rametti di un anno d'età.

In particolare, la misura del potenziale idrico dell'asse, effettuata su rametti insacchettati, è quella maggiormente correlata allo stato idrico del suolo; inoltre essa è poco influenzata da variazioni repentine delle condizioni ambientali (passaggio di nuvole, raffiche di vento, ecc.), che possono verificarsi durante la giornata. Le misure di potenziale sono state eseguite nel giorno immediatamente precedente e in quello seguente ciascun intervento irriguo, al terzo o al quarto giorno dopo l'adacquamento, oltre che ad intervalli regolari di 5 giorni fino all'adacquamento successivo. A livello giornaliero le misure di potenziale sono state effettuate a intervalli di due ore a partire dall'istante immediatamente prima dell'alba fino al crepuscolo.

L'andamento temporale del contenuto idrico del suolo è stato monitorato utilizzando la tecnica FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) con il sensore *Diviner2000* della *Sentek*, il cui uso richiede l'installazione di appositi pozzetti d'ispezione nel suolo. Con tale tecnica è possibile acquisire misurazioni a diverse profondità in corrispondenza dell'apparato radicale delle colture, ottenendo così i profili d'umidità del suolo. I pozzetti di misura sono stati installati tra due piante nella zona in cui, dopo l'intervento irriguo, sono attese le maggiori variazioni di contenuto idrico. In particolare, sono stati installati 5 pozzetti di misura, uno nella mezzeria tra le due piante (A3), gli altri in prossimità degli erogatori (Figura 3).

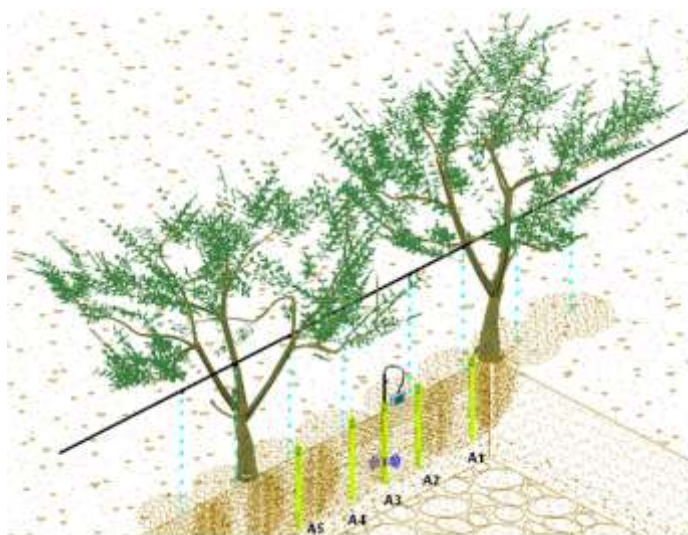


Figura 3. Schema di installazione dei pozzetti FDR.

### 3 RISULTATI E DISCUSSIONI

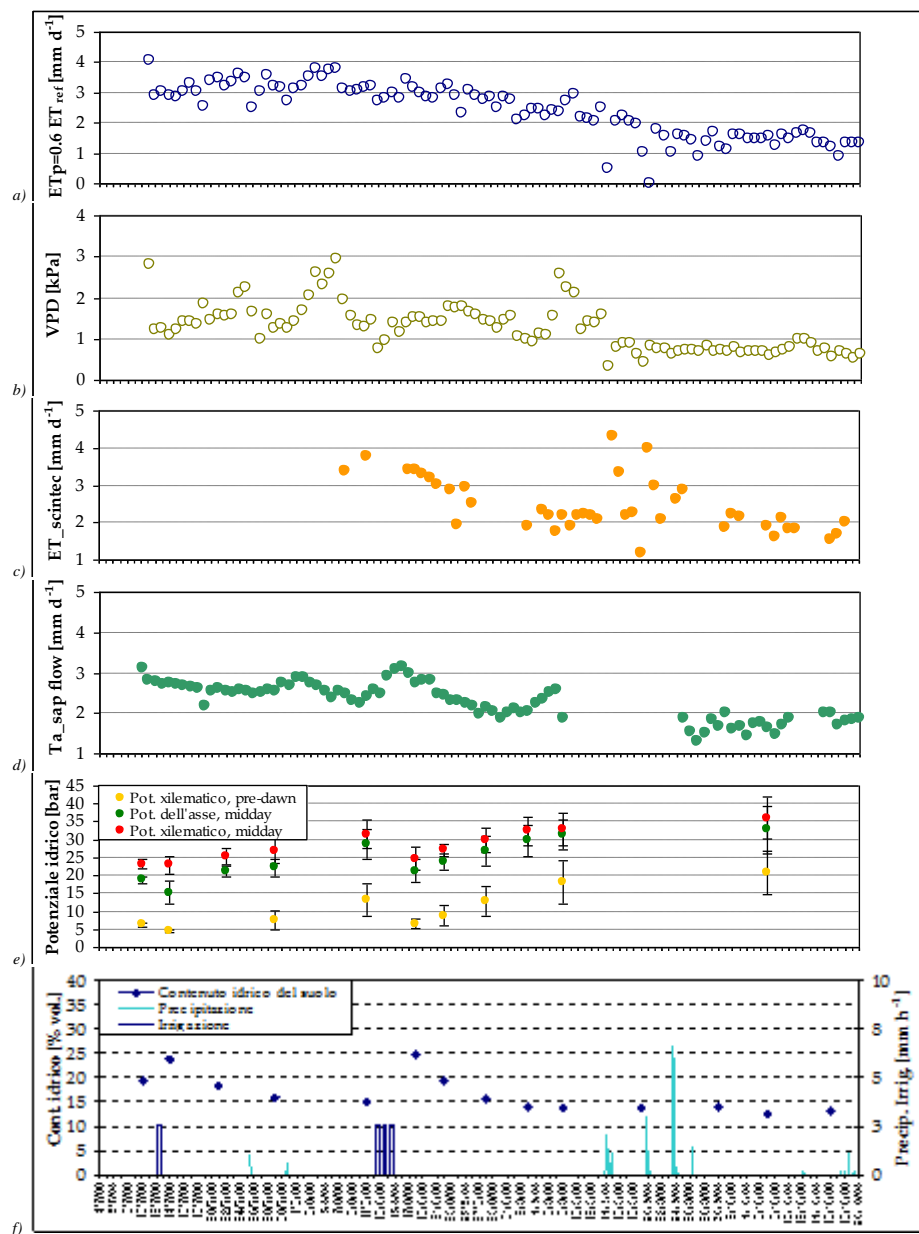
Nella Figura 4 sono riportati gli andamenti temporali dei flussi evapotraspirativi (Figura 4c) e traspirativi (Figura 4d), misurati rispettivamente con la tecnica scintillometrica e con i sap flow.

Nella stessa figura sono riportate le serie temporali della domanda evapotraspirativa dell'ambiente (Figura 4a), espressa in termini di evapotraspirazione massima della coltura (Allen *et al.*, 1998), del deficit di pressione di vapore (VPD, Figura 4b), dello stato idrico della pianta (Figura 4e), descritto in termini energetici attraverso i potenziali idrici xilematici "pre-dawn" e "mid-day" e il potenziale idrico dell'asse "mid-day", e dello stato idrico del suolo (Figura 4f), definito dal contenuto idrico misurato con la tecnica FDR ed espresso come media pesata con il fattore densità radicale.

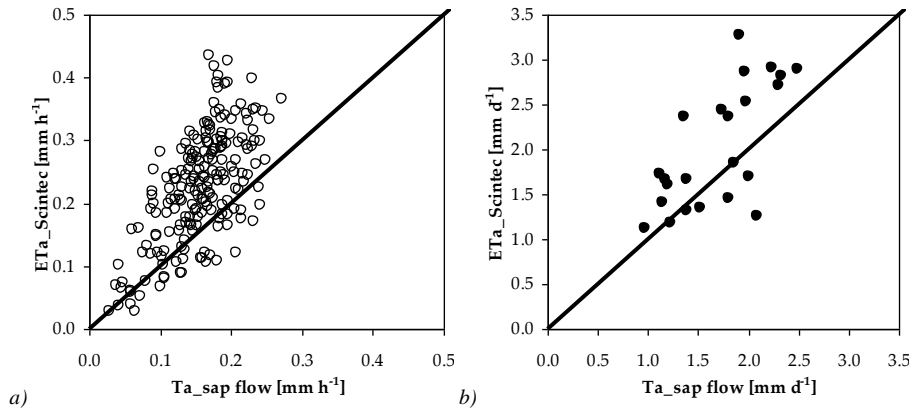
Osservando la figura si nota che, durante la fase iniziale della sperimentazione (prima decade di luglio), il flusso traspirativo dell'olivo assume valori intorno a circa 2.5 mm; una condizione d'assenza di stress idrico (Rallo, 2010), evidenziata dai corrispondenti valori del contenuto idrico del suolo (superiori al valore critico del 18%) e dei potenziali xilematici pre-dawn (inferiori al valore critico di 5 bar). Dopo tale periodo, si osserva una diminuzione dell'attività traspirativa della pianta, cui a fine Luglio, in concomitanza di due apporti meteorici, fa seguito una leggera ripresa; data l'entità piuttosto ridotta di tali apporti, la ripresa traspirativa potrebbe essere spiegata dall'elevata densità dell'apparato radicale in superficie (Rallo *et al.*, 2009). Un'altra spiegazione potrebbe risiedere nell'incremento della domanda ambientale, dovuto ad un aumento del deficit di pressione di vapore. Dai primi giorni di agosto fino all'intervento irriguo del 12/08 si osserva una riduzione progressiva dei flussi traspirativi.

E' interessante osservare la dinamica del contenuto idrico del suolo e quella dei potenziali xilematici pre-dawn nello stesso periodo. In particolare, i valori del contenuto idrico, pari a circa il 25% all'inizio della sperimentazione, si riducono progressivamente sino ad un valore minimo del 15% prima dell'intervento irriguo del 12/08; la fase di essiccamento registra, per la pianta, il passaggio da una condizione di soddisfacimento pieno della domanda ambientale a una condizione limitante dei consumi traspirativi. La fase di stress ha inizio, in particolare, quando il contenuto idrico del suolo scende sotto la soglia critica del 18%. Come atteso, al trend decrescente del contenuto idrico corrisponde un incremento progressivo del potenziale xilematico (pre-dawn), da un valore minimo di circa 5 bar fino ad un valore massimo di poco inferiore a 15 bar. Nel periodo successivo all'intervento irriguo del 12/08, la dinamica dei flussi traspirativi segue ancora e con una migliore approssimazione, quella dello stato idrico del suolo e della pianta. Le misure scintillometriche, effettuate a partire da questa data, permettono ancora di evidenziare come i valori relativamente elevati che i flussi evapotraspirativi raggiungono nei giorni immediatamente successivi l'adacquamento, e pari approssimativamente a 3.5 mm, decrescono fino a circa 2.0 mm, un valore prossimo a quello dei flussi traspirativi misurati con i sap flow. Le maggiori differenze tra le due misure di flusso si osservano nei giorni immediatamente seguenti l'adacquamento, quando la componente evaporativa del suolo, misurata solamente dallo scintillometro, è relativamente più consistente.

La Figura 5 riporta il confronto tra i flussi di evapotraspirazione effettiva, misurati con lo scintillometro e i flussi di traspirazione, misurati col sap flow, sia a scala oraria (Figura 5a), che giornaliera (Figura 5b).



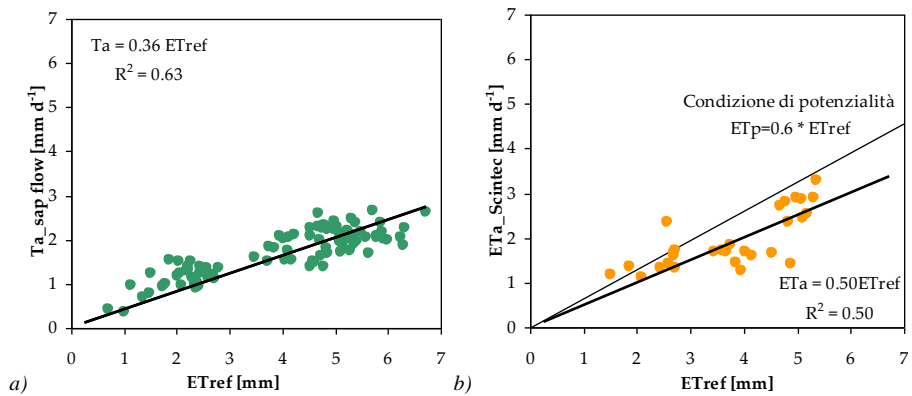
**Figura 4.** Serie temporali della domanda ambientale espressa in termini di evapotraspirazione potenziale *a)*, deficit di pressione di vapore *b)*, evapotraspirazione reale misurata con lo scintillometro *c)*, traspirazione reale misurata con la tecnica *sap flow* *d)*, potenziali idrici xilematici *e)* e contenuti idrici medi del profilo di suolo 0-120 cm *f)*.



**Figura 5.** Confronto tra i valori dei flussi di evapotraspirazione, misurati con lo scintillometro, e i flussi di traspirazione, misurati con i *sap flow*, eseguito a scala oraria 5a) e giornaliera 5b).

Alla scala oraria (Figura 5a) è possibile osservare che la differenza tra i flussi orari di evapotraspirazione e di traspirazione, aumenta col valore di *ET* misurato con lo scintillometro, a causa della accresciuta influenza della componente evaporativa del suolo. Per i valori medio/bassi, la dispersione dei dati intorno alla retta 1:1 sottolinea invece la sostanziale assenza di processi evaporativi dal suolo, ed il buon accordo tra le due tecniche di misura. Il confronto degli stessi dati, aggregati a scala giornaliera (Figura 5b) presenta un andamento simile al precedente; tuttavia, l'esiguo numero di dati acquisiti non permette di approfondire ulteriormente l'analisi.

In Figura 6 sono riportate i valori dei flussi traspirativi ed evapotraspirativi effettivi in funzione dell'evapotraspirazione della coltura di riferimento, calcolata seguendo la procedura descritta nel quaderno FAO n. 56. Dall'analisi della regressione  $T_a-ET_{ref}$  (Figura 6a), ottenuta imponendo il passaggio della retta per l'origine degli assi, si evince che i flussi traspirativi dell'olivo sono inferiori a quelli della coltura di riferimento risultando approssimativamente pari al 36% di quest'ultimi.



**Figura 6.** Valori dei flussi effettivi di traspirazione, misurati con le sonde *sap-flow* a) e dei flussi effettivi di evapotraspirazione, misurati con lo scintillometro b) in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento.



Per quanto riguarda i flussi evapotraspirativi reali misurati dallo scintillometro (Figura 6b), si può osservare come le coppie di valori si discostano rispetto alla condizione di assenza di stress, ottenuta considerando un coefficiente colturale pari a 0.6 (Allen *et al.*, 1998). In particolare, nel corso della stagione 2008, i consumi idrici dell'olivo risultano mediamente pari al 50% della richiesta ambientale e pertanto il grado di stress, calcolato come rapporto tra la pendenza della relazione  $ET_a(ET_{ref})$  e  $K_c$ , pari a circa l'80%.

#### **4 CONCLUSIONI**

In questo lavoro è stata affrontata la tematica ampia e complessa della dinamica dei flussi idrici nei sistemi arborei “dispersi”, caratterizzati da un parziale ricoprimento spaziale, nelle condizioni climatiche tipiche della fascia mediterranea.

La sperimentazione è stata condotta su una piantagione di oliveto, caratterizzata da un ricoprimento medio del 35%, ubicata nel territorio di Castelvetrano (TP).

I flussi di evapotraspirazione del sistema, alla scala di campo, sono stati misurati con uno scintillometro, del tipo a piccola apertura, mentre la misura della componente di traspirazione, a scala di singola pianta, è stata effettuata con sonde *sap-flow*, basandosi sulla tecnica proposta da Granier. I dati di flusso, così ottenuti, sono stati confrontati con quelli di potenziale idrico xilematico, descrittori dello stato idrico della pianta, e con quelli di contenuto idrico medio del suolo, cercando di individuare relazioni significative.

La sperimentazione condotta ha evidenziato una forte dipendenza della traspirazione dalle variazioni dello stato idrico del suolo e della pianta.

Il confronto tra i flussi sia a scala oraria che giornaliera ha evidenziato che le maggiori differenze tra i flussi traspirativi e quelli misurati con lo scintillometro si verificano per i valori più alti dei domini, dove è plausibile che il dato di  $ET$  misurato con lo scintillometro risenta in maggior misura della componente evaporativa dal suolo.

Dall'analisi della regressione  $T_a-ET_{ref}$  è emerso che i flussi traspirativi dell'olivo risultano pari a circa il 36% della richiesta evapotraspirativa dell'ambiente. Lo stesso tipo di analisi, condotta sui flussi di evapotraspirazione effettiva misurati con lo scintillometro ha mostrato che, a causa dei periodi di stress che si sono avuti nel corso della stagione 2008, i consumi idrici dell'olivo hanno spiegato mediamente il 50% della richiesta ambientale, evidenziando un grado di stress pari a circa l'80%.

**Ringraziamenti.** Gli autori ringraziano l'ENEA (Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente) che ha messo a disposizione della sperimentazione lo scintillometro e in particolare il dott. M. Sciortino, il dott. F. Monteleone e il sign. F. Anello per la preziosa collaborazione fornita durante le fasi di installazione e gestione della strumentazione. La ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto “AgroOlivio”, finanziato dall'Assessorato Agricoltura e Foreste della Regione Sicilia (Responsabile scientifico Prof. G. Provenzano), e del PRIN 2007, finanziato dal M.I.U.R. (Responsabile scientifico Prof. C. Agnese).

## BIBLIOGRAFIA

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. Crop evapotranspiration. Guideline for computing crop water requirements. *FAO irrigation and drainage paper n. 56*, Rome Italy, 1998, 326 pp.
- Brutsaert, W., Hydrology: An introduction, Cambridge University press, 2005, pp. 46-50.
- de Bruin, H.A.R., Meijninger, W.M.L. & Smedman, A.S. Displaced-beam small aperture scintillometer test. Part I : the WINTEX data-set. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2002, 105(1), 129–148.
- Ferretti D.F., Pendall, E., Morgan, J.A., Nelson, J.A., Le Cain, D. & Mosier, A.R. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Plant and Soil*, 2003, 254, 291–303.
- Granier, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.*, 1985, 42(2), 193 – 200.
- Huxman, T.E., Cable, J.M., Ignace, D.D., Eilts, J.A., English, N.B., Weltzin, J. & Williams, D.G. Response of whole-ecosystem and component CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange to an irrigation pulse in a semi-arid grassland: contrasting geomorphic surfaces and native/non-native species communities, *Oecologia*, 2004.
- Law, B.E., Falge, E., Baldocchi D.D., et al. 2002. Carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation in response to environment. *Agric. For. Meteorol.* 113:97–120.
- Lu, P., L. Urban and P. Zhao. 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Bot. Sin.* 46:631–646.
- Rallo G. *Misura e Modellazione degli Scambi Idrici nel Sistema Continuo SPA e approfondimenti sulle Funzioni di Stress Idrico: Applicazione alla coltura dell'Olivo*. Dissertazione per il titolo di Dottore di Ricerca in Idronomia Ambientale. Università degli studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria e Tecnologie Agroforestali, 2010.
- Rallo G., Accardi, S., Liotta, D., Pollani R. & Provenzano, G. Indagine sperimentale sulla distribuzione spaziale della densità radicale di piante di olivo (*Olea europea*, L.) irrigate a goccia. *IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria*, Ischia Porto, 12-16 settembre 2009.
- Stull, R.B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer Edition, 1988.
- Thiermann, V. & Grassl, H. The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1992, 58, 367–389.
- Turner, M.T., & Jarvis, G.P. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrig. Sci.*, 1982, 9, 289-308.