



USO DELLA TECNICA SCINTILLOMETRICA A SUPPORTO DELLA STIMA DEI CONSUMI EVAPOTRASPIRATIVI DELL'OLIVO

C. Agnese¹, C. Cammalleri², M. Minacapilli¹, G. Rallo¹, G. Provenzano¹, D. Pumo¹

(1) Dipartimento di Ingegneria e Tecnologie Agro-Forestali, Università di Palermo

(2) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo

SOMMARIO

L'uso razionale della risorsa idrica in agricoltura richiede, unitamente all'adozione di tecniche irrigue avanzate che assicurino la migliore efficienza degli interventi irrigui, l'individuazione dei tempi e dell'entità dei singoli interventi. Perché questi ultimi obiettivi siano raggiunti è necessario stimare con precisione i consumi di evapotraspirazione delle colture che, nell'ambiente mediterraneo, caratterizzato da un periodo vegetativo tipicamente non in fase con quello piovoso, si manifestano sotto condizioni di stress idrico. Nel presente lavoro è descritta un'applicazione a una piantagione di oliveto della tecnica scintillometrica, che permette una stima indiretta del flusso di calore latente attraverso l'equazione del bilancio energetico. Più in particolare, lo scintillometro è uno strumento ottico, che misura il flusso di calore sensibile dal sistema suolo-pianta sulla base degli effetti che tale flusso induce sull'indice di rifrazione della luce coerente emessa da un trasmettitore; misurando contemporaneamente la radiazione netta e il flusso di calore nel suolo, è possibile dedurre il flusso di evapotraspirazione come termine residuo dell'equazione che esprime il bilancio energetico di superficie. Sono in particolare presentati i risultati di un'indagine sperimentale effettuata nel corso della stagione irrigua 2007 nell'area di Castelvetro, tipicamente vocata alla coltura dell'olivo. I dati di evapotraspirazione giornaliera ottenuti mediante la tecnica scintillometrica sono stati quindi confrontati con i corrispondenti valori stimati utilizzando il modello Agroidrologico SWAP, la cui applicazione ha richiesto una approfondita caratterizzazione biofisica dell'area di studio. I dati di evapotraspirazione giornaliera ottenuti mediante la tecnica scintillometrica sono stati confrontati con i corrispondenti valori stimati utilizzando sia il modello agroidrologico SWAP che la procedura semplificata proposta di recente dalla FAO che prevede l'adozione di un coefficiente colturale $K_{c,r}$ che tiene conto delle eventuali condizioni di stress idrico.

Parole chiave: evapotraspirazione effettiva, olivo, scintillometro

1 INTRODUZIONE

La prevista riduzione, nel breve e nel medio termine, della risorsa idrica complessivamente disponibile nel territorio siciliano (D'Asaro *et al.*, 2008), unitamente alla crescita del conflitto tra l'uso della stessa in agricoltura e negli altri comparti, rende

sempre più pressante l'esigenza che la produzione agricola venga assicurata migliorando l'efficienza idraulica dei sistemi di dispensa dell'acqua alle colture e individuando i tempi di intervento irriguo più idonei allo sviluppo delle stesse. Non è un caso, pertanto, che la ricerca, soprattutto nell'ultimo ventennio, si sia indirizzata verso lo sviluppo di strumentazioni in grado di fornire una stima attendibile dei flussi di calore, sensibile e latente della coltura (Rana & Katerji, 2000), incrementando al contempo gli sforzi verso una modellazione dei processi di scambio idrico ed energetico nel continuum suolo-pianta-bassa atmosfera (SPA), che risulti più aderente alle complesse interazioni che caratterizzano il sistema (van Dam *et al.*, 1997; Santini, 1990; Bastiaanssen *et al.*, 2007).

E' indubbio che l'attendibilità sia delle misurazioni che dei modelli interpretativi sia più elevata in presenza di colture intensive, di tipo erbaceo, derivando in ambedue i casi dall'omogeneità spaziale del fattore di ricoprimento del suolo, che induce condizioni di elevata regolarità delle caratteristiche dinamiche della regione più superficiale dello strato limite atmosferico (ASL), in cui avvengono gli scambi di quantità di moto ed energia termica tra la vegetazione e l'atmosfera. Simile regolarità ha poi l'apparato radicale, che si sviluppa prevalentemente in direzione verticale. Sono numerose in tale contesto, le campagne di misura proficuamente effettuate con le tecniche micro- meteorologiche recentemente sviluppate (apparato per la stima dell'indice di Bowen, torre "eddy-covariance", scintillometro) e le applicazioni di modelli di simulazione a fondamento fisico (van Dam *et al.*, 1997), o basate su ipotesi semplificate (Allen *et al.*, 1998).

Diversamente, nel caso delle colture arboree, la disomogeneità nella scabrezza induce una corrispondente disomogeneità nello strato limite che si deforma nelle zone di confine tra la chioma e il terreno nudo, essendone influenzato in maniera differente. Analogamente, la geometria radicale perde la simmetria piana, dando luogo a uno sviluppo irregolare degli apparati nelle tre dimensioni. Più complessa è inoltre la schematizzazione del processo di estinzione della radiazione solare incidente nel percorso dalla chioma al suolo (Campbell & Norman, 1998).

Nel presente lavoro vengono descritti i primi risultati di una campagna di misure condotta in una piantagione di oliveto durante la stagione irrigua 2007, nella quale i flussi di evapotraspirazione sono stati ottenuti sperimentalmente con la tecnica scintillometrica (De Bruin *et al.*, 2002), procedendo successivamente al confronto dei valori misurati con quelli dedotti con modelli di bilancio idrologico del sistema SPA; in particolare sono stati utilizzati il modello a fondamento fisico SWAP, che si basa sulla risoluzione dell'equazione di Richards, con l'aggiunta di un termine di suzione radicale (van Dam *et al.*, 1997), e la procedura semplificata FAO 56 (Allen *et al.*, 1998), in cui la porzione di suolo esplorata dall'apparato radicale è rappresentata schematicamente come un serbatoio. Durante la campagna sperimentale, è stato anche monitorato il contenuto idrico nel suolo a differenti profondità con la tecnica della riflettometria nel dominio del tempo, TRD.

2 MATERIALI E METODI

2.1 La tecnica scintillometrica

Lo scintillometro è uno strumento ottico, che consiste di un trasmettitore di luce coerente e di un ricevitore che misura le fluttuazioni d'intensità (o "scintillazioni") che

il segnale luminoso subisce attraversando l'atmosfera turbolenta. Tali fluttuazioni sono dovute a un fenomeno di diffrazione indotto dalla disomogeneità dell'indice di rifrazione dell'aria, n , che essendo dipendente dalla temperatura (densità) può essere correlato al flusso di calore sensibile, H . I parametri direttamente misurati dallo scintillometro sono il parametro di struttura dell'indice di rifrazione, C_n^2 , che descrive l'ampiezza delle fluttuazioni dell'indice di rifrazione dell'aria e la cosiddetta "inner scale", che denota la dimensione dei vortici turbolenti alla transizione tra le regioni inerziale e dissipativa dello spettro.

Utilizzando l'approccio teorico proposto da *Thiermann & Grassl* (1992) e in accordo con la teoria di similarità di Monin-Obukhov (*Brutsaert*, 2005), a partire dalle misure di C_n^2 e l_0 è possibile stimare il flusso di calore sensibile, H (W/m^2) mediante la seguente espressione:

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

in cui ρ è la densità dell'aria, c_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante, u^* è la velocità di attrito mentre θ^* rappresenta la scala di temperatura. Per ulteriori 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 λET 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 modello DBSAS SLS20 (Figura 1).

2.2 Stima dell'evapotraspirazione effettiva mediante modelli di bilancio idrico

Uno schema classico per la stima dei flussi di evapotraspirazione effettiva dalle colture agrarie è quello basato sulla stesura e risoluzione del bilancio idrico nel sistema SPA. Seguendo tale approccio, poiché lo scambio idrico nel suolo agrario è essenzialmente governato dai gradienti verticali del potenziale totale dell'acqua nel suolo, la risoluzione del bilancio idrologico presuppone l'esatta ricostruzione dell'evoluzione temporale del contenuto idrico nel suolo. A tal proposito la letteratura scientifica offre numerose procedure e modelli più o meno complessi (*Bastiaanssen et al.*, 2007) che consentono di simulare tutti i termini del bilancio idrico nel sistema SPA. In generale è possibile distinguere due principali classi di modelli di bilancio idrologico che si differenziano, fondamentalmente, per la schematizzazione adottata nella simulazione della dinamica dell'acqua nel suolo. In particolare la classe dei cosiddetti modelli "a base fisica" descrive il suolo agrario come un sistema trifasico governato da flussi idrici monodimensionali che vengono descritti dalla ben nota equazione di Richards:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] + S(z, t) \quad (3)$$

nella quale h è il potenziale idrico nel suolo, t è il tempo, z è la coordinata verticale assunta positiva verso l'alto, $C=d\theta/dh$ è la capacità idrica differenziale, θ è l'umidità del suolo, $K(h)$ è la relazione che lega la conducibilità idraulica del suolo, K , al potenziale e

$S(z,t)$ rappresenta il volume idrico estratto dall'apparato radicale della coltura, variabile con continuità nella zona esplorata dalle radici in dipendenza non solo delle caratteristiche delle colture, ma anche dei valori del potenziale dell'acqua e della domanda traspirativa esterna. Fra i modelli basati sulla schematizzazione sopra descritta quello proposto da *van Dam et al.* (1997) e noto con l'acronimo SWAP, è sicuramente uno dei più noti ed è stato anche testato in zone diverse del bacino del Mediterraneo (*Minacapilli et al.*, 2008). Nel modello SWAP le proprietà idrauliche del suolo, ossia le relazioni che legano θ a h e la conducibilità idraulica, K , a θ (o a h) sono espresse dalle ben note relazioni di Mualem-van Genuchten (*van Genuchten*, 1980) in cui figurano cinque parametri caratteristici del suolo: il contenuto idrico residuo, θ_r , il contenuto idrico a saturazione, θ_s , la conducibilità idraulica alla saturazione, K_{sat} e i parametri empirici α e n [-]. La funzione $S(z,t)$ che compare nell'equazione (3) viene calcolata mediante la seguente espressione, originariamente proposta da *Feddes et al.* (1978):

$$S(z,t) = \alpha(h) \rho(z) T_p \quad (4)$$

in cui $\rho(z)$ è una funzione che rappresenta la distribuzione della densità radicale con la profondità, T_p è la traspirazione potenziale e $\alpha(h)$ è una funzione di risposta della pianta allo stress idrico. La traspirazione potenziale T_p è invece data da:

$$T_p = ET_p F_c \quad (5)$$

in cui F_c è il fattore di ricoprimento della coltura al suolo, mentre ET_p è l'evapotraspirazione "potenziale" calcolabile o con la ben nota equazione di Penman-Monteith (*Monteith e Unsworth*, 1990) o come prodotto tra il valore dell'evapotraspirazione della coltura di riferimento (ET_0) ed il coefficiente colturale K_c (*Allen et al.*, 1998).

Una diversa categoria di modelli di bilancio idrologico fa invece ricorso ad una schematizzazione semplificata del suolo agrario, assimilato ad un serbatoio di data capacità massima, definita capacità idrica utilizzabile (TAW da Total Available Water), in cui i flussi uscenti (traspirazione ed evaporazione) vengono stimati come aliquote dell'evapotraspirazione in funzione di coefficienti di natura empirica. Seguendo tale approccio la FAO nel quaderno n°56 (*Allen et al.*, 1998), ha proposto una procedura semplificata per la stesura del bilancio idrologico e per la stima dei fabbisogni irrigui in cui l'evapotraspirazione effettiva viene calcolata come:

$$ET = K_{c,r} ET_0 = K_c K_s ET_0 \quad (6)$$

in cui $K_{c,r}$ è il coefficiente colturale in condizioni effettive ed espresso come prodotto tra il coefficiente colturale K_c e il coefficiente di stress K_s (0-1) adottato dalla FAO per tenere in conto degli eventuali periodi in cui i tassi ridotti di umidità nel suolo non consentono alla coltura di mantenere un flusso evapotraspirativo pari a quello potenziale. Tale coefficiente, come ampiamente descritto nel FAO 56, viene calcolato in funzione della TAW e della aliquota di questa ultima che la coltura può attingere in assenza di stress (RAW, Readily Available Water). Nell'ambito della procedura FAO, la relazione che lega TAW e RAW è data da:

$$RAW = pTAW \quad (7)$$

con p , coefficiente empirico, detto di "deplezione", variabile essenzialmente in funzione della tipologia colturale e le cui modalità di stima sono descritte nel già citato FAO 56.

2.3 Descrizione dell'area di studio e delle indagini effettuate

L'area di studio è stata localizzata all'interno dell'azienda agricola "Consiglio", ricadente nel territorio di Castelvetrano (TP) e specializzata nella coltivazione di olive da mensa della varietà "Nocellara del Belice". Dal punto di vista colturale all'interno dell'azienda la piantagione di oliveto si presenta suddivisa in diversi appezzamenti disetanei con geometria del sesto rettangolare e piante distanti mediamente 8 metri tra le file e 5 metri sulla fila. La densità d'impianto è di quasi 250 piante ad ettaro. L'irrigazione avviene attraverso il metodo della microirrigazione a spruzzo ed a goccia. La figura 1a mostra l'estensione totale dell'azienda e la localizzazione, in essa, delle installazioni sperimentali.

Dal punto di vista pedologico, nell'area di studio il suolo è stato classificato come Franco-Sabbioso-Argilloso con percentuale medie di argilla, limo e sabbia rispettivamente pari al 24, 16 e 60%. La determinazione delle proprietà idrauliche ha comportato il prelievo di due campioni di suolo indisturbato ($D = 8$ cm; $h = 5$ cm) ad ognuna delle seguenti profondità: 5 cm, 25 cm, 45 cm, 65 cm e 85 cm. Su ogni campione è stata condotta una prova di laboratorio, al fine di ricavare, nell'ipotesi di assenza di fenomeni di isteresi, la curva di ritenzione, $h(\theta)$, esplorando potenziali matriciali h da valori prossimi a zero fino a -15.000 cm. È stata inoltre condotta, per ogni campione, una prova di conducibilità idraulica in condizioni sia sature che insature con valori di potenziale compresi tra -1 cm e -20 cm. La conoscenza delle coppie sperimentali di punti θ - h e K - h ha quindi consentito di stimare mediante il codice RETC (*van Genuchten, 1980*), i parametri α , n , θ_s , θ_r e K_{sat} delle relazioni $\theta(h)$ e $K(h)$ utilizzate in SWAP, oltre ai valori TAW e RAW utilizzati nella schematizzazione FAO. Le Tabelle 1 e 2 riportano i parametri principali utilizzati come input ai modelli SWAP e FAO 56.

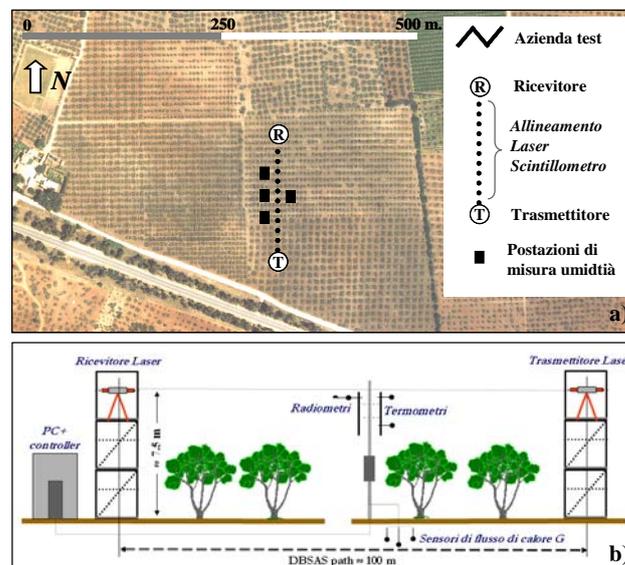


Figura 1. a) Localizzazione dell'azienda Test e posizionamento della installazione sperimentale; b) particolare della disposizione dei sensori dello scintillometro Scintec DBSAS SLS20.

<i>Parametri</i>	<i>Valori</i>
<i>Potenziali critici del terreno utilizzati nella funzione $\alpha(h)$ della eq. (4)</i>	
h_2 (Valore del potenziale alla capacità di campo) (cm)	-25
h_3 (Valore critico del potenziale al di sotto del quale $\alpha < 1$) (cm)	-1500
h_4 (Valore del potenziale in corrispondenza del punto di appassimento) (cm)	-16000
<i>Parametri relativi alla vegetazione</i>	
F_c (Fattore di ricoprimento al suolo) (-) – K_c (Coefficiente colturale) (-)	0.35 - 0.60
Profondità massima dell'apparato radicale (cm)	100

Tabella 1. Parametri principali adottati per le simulazioni con il modello SWAP

<i>Parametri</i>	<i>Valori</i>
Capacità di campo, θ_{fc} [cm^3/cm^3]	0.42
Punto di appassimento, θ_{wp} [cm^3/cm^3]	0.10
Capacità idrica utilizzabile TAW [mm/m]	310
Coefficiente di deplezione, p	0.65
Coefficiente colturale K_c (-)	0.60
Profondità massima dell'apparato radicale (cm)	100

Tabella 2. Parametri principali adottati per le simulazioni con il modello FAO 56

La sperimentazione condotta durante la stagione irrigua 2007 è consistita nell'acquisizione di 68 misure scintillometriche giornaliere nel periodo compreso tra fine giugno e fine settembre. Durante la campagna sperimentale sono state condotte misure di contenuto idrico in corrispondenza degli apparati radicali delle piante (20 – 70 cm) mediante la tecnica della riflettometria nel dominio del tempo (TDR).

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

L'analisi dei risultati ottenuti dalla campagna di misure scintillometriche condotta durante la stagione estiva 2007 è sinteticamente riportata nei grafici rappresentati nelle figure 2.a, 2.b e 2.c, che mostrano gli andamenti temporali dei flussi energetici a scala oraria misurati rispettivamente nei periodi 26-29 giugno, 14-17 luglio e 27-30 luglio. I suddetti periodi compendiano l'intera variabilità osservata durante le 68 giornate di acquisizione e mostrano chiaramente il diverso comportamento della coltura prima e dopo l'irrigazione. Più dettagliatamente le misure effettuate a fine giugno (Figura 2.a), circa un mese prima del primo intervento irriguo (25 luglio), indicano valori di flusso di calore latente compresi nell'intervallo 210÷250 W/m^2 , cui corrispondono valori giornalieri di evapotraspirazione, compresi tra 2.0 e 2.4 mm/d.

A distanza di circa due settimane (Figura 2.b) i flussi evapotraspirativi risultano inferiori di circa il 37% (1.0 ÷ 1.6 mm/d) rispetto a quelli stimati nel periodo precedente, evidenziando una condizione di stress idrico della coltura.

In seguito al primo intervento irriguo (25 luglio, Figura 2.c), in cui è fornito un volume pari a circa 215 m^3/ha , si nota un recupero dei flussi evapotraspirativi tale da annullare la fase di stress precedente l'irrigazione.

I valori di evapotraspirazione effettiva giornaliera, ET, ricavati con la tecnica scintillometrica, hanno permesso da un lato di stimare direttamente il coefficiente colturale $K_{c,r}$, che compare nella (6), dall'altro di verificare l'affidabilità dei due modelli SWAP e FAO 56.

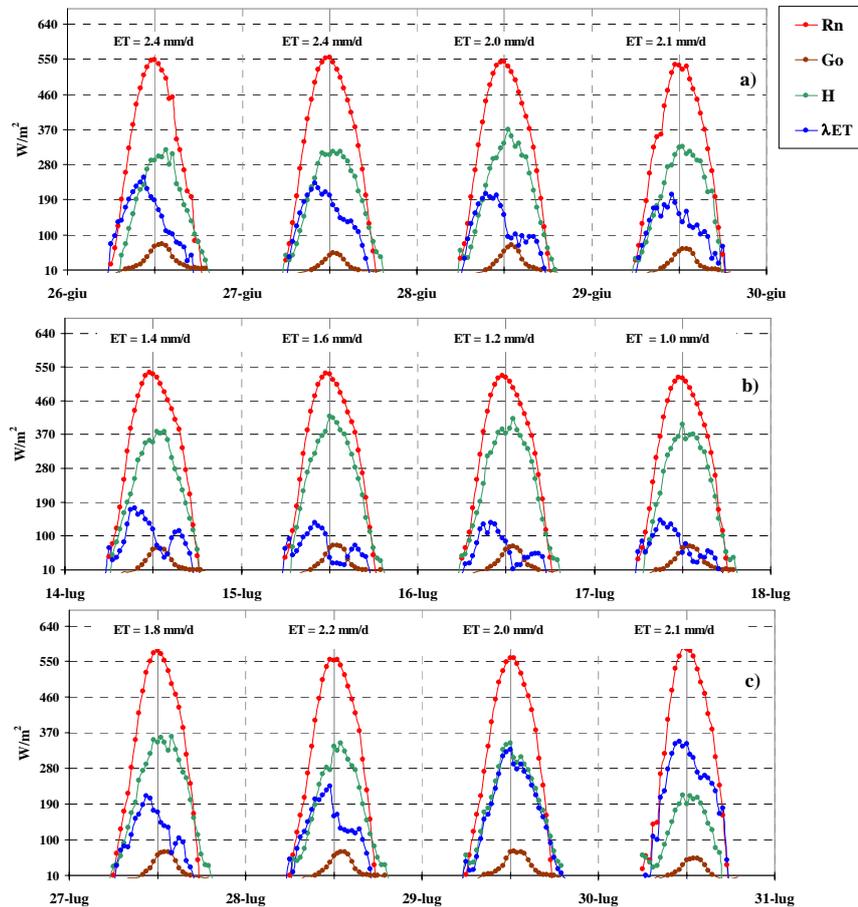


Figura 2. Flussi energetici misurati con la tecnica scintillometrica e valori giornalieri di evapotraspirazione effettiva, ET.

Nel grafico di figura 3 sono riportati i valori “sperimentali” di $K_{c,r}$, ottenuti come rapporto tra il valore “misurato” di ET e l’evapotraspirazione della coltura di riferimento, ET_0 , calcolato mediante l’espressione di Penman-Monteith modificata dalla FAO. I valori ottenuti ricadono nell’intervallo $0.2 \div 0.6$; i valori minimi sono riferiti alla più intensa fase di stress idrico della coltura, quella immediatamente precedente il primo intervento irriguo, mentre i valori massimi sono concentrati nel periodo susseguente il terzo adacquamento. In particolare per quest’ultimo periodo si nota che i valori di $K_{c,r}$ risultano prossimi al valore 0.6, quindi al valore del coefficiente colturale, K_c , stimato in ambito FAO per l’olivo, con copertura del suolo pari al 30%; i dati sperimentali suggeriscono pertanto che lo stato idrico della coltura sia prossimo a quello potenziale, tesi che ragionevolmente si accorda con l’andamento degli interventi irrigui.

Nella figura 4, i valori di ET misurati con lo scintillometro sono confrontati con quelli ottenuti dall’applicazione dei modelli SWAP e FAO 56. Dall’esame del grafico, si evince in primo luogo un discreto accordo tra i valori misurati e le stime ottenute con il modello SWAP; l’accordo è molto minore con i valori di ET ottenuti con l’approccio

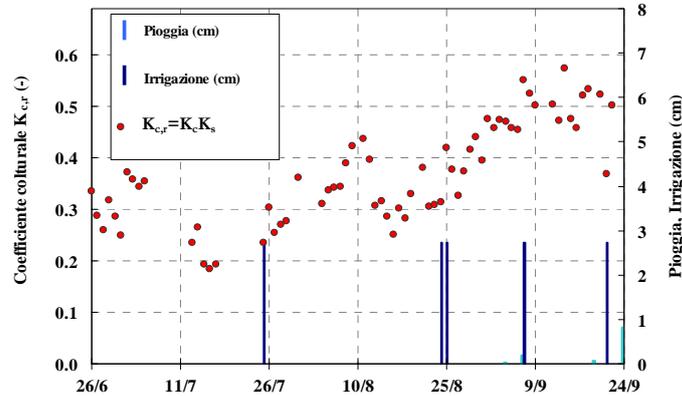


Figura 3. Andamento temporale del coefficiente culturale $K_{c,r}$

FAO 56, per i quali si riscontra una sottostima sistematica, particolarmente evidente nel periodo che va dal 19/7 fino alla seconda irrigazione (24/8). Durante l'ultimo periodo di simulazione (25/8÷22/9), in cui gli interventi irrigui sono stati più frequenti, ambedue i modelli forniscono valori leggermente sottostimati, per circa 0.35 mm/d. Il confronto dei valori di contenuto idrico simulati con quelli misurati, condotto a partire dal 19/7, (Fig. 4b), ha confermato la migliore affidabilità del modello fisico SWAP, rispetto al modello FAO56.

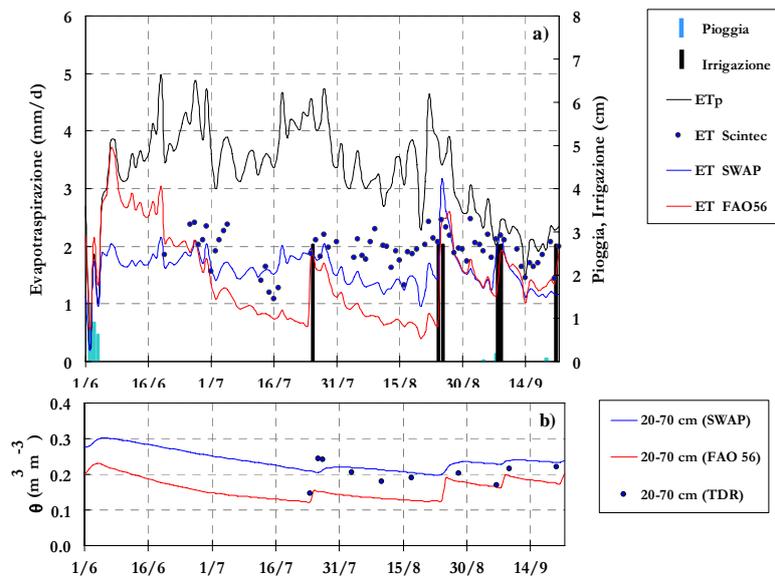


Figura 4. Andamenti temporali dei valori misurati e simulati di a) evapotraspirazione effettiva, ET e b) di contenuto idrico θ .

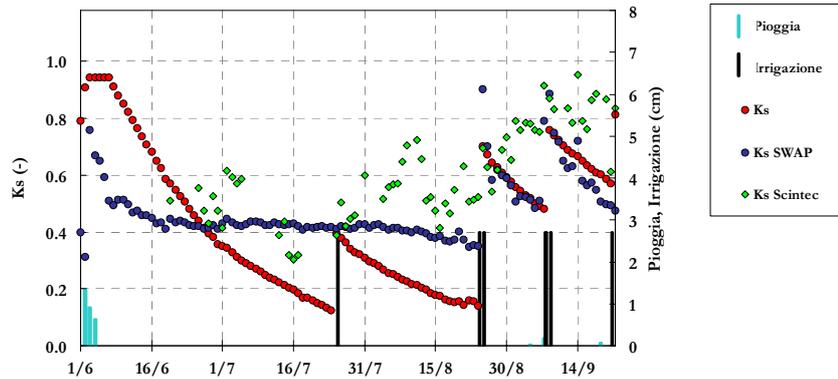


Figura 5. Confronto fra i valori del coefficiente K_s suggeriti dalla FAO e quelli dal modello SWAP e dalle misure scintillometriche.

I confronti fin qui effettuati indicano, pertanto, una sostanziale inadeguatezza della schematizzazione a serbatoio proposta dalla FAO, nella simulazione a medio-lungo termine delle fasi di esaurimento idrico del sistema.

Tale inadeguatezza è rafforzata dal grafico di figura 5, in cui è riportato il confronto tra i coefficienti di stress idrico K_s , calcolati secondo la procedura standard suggerita dal quaderno FAO56, e i valori corrispondenti, $K_{s,SWAP}$ e $K_{s,Scintec}$, riferiti rispettivamente al modello SWAP e alle misure scintillometriche, e definiti con le seguenti espressioni:

$$K_{s,SWAP} = \frac{ET_{SWAP}}{K_c ET_0}; \quad K_{s,Scintec} = \frac{ET_{Scintec}}{K_c ET_0} \quad (8)$$

in cui $K_c=0.60$.

Analogamente a quanto osservato per ET, dall'esame del grafico, emerge che il modello FAO sottostima sistematicamente i coefficienti di stress, calcolando quindi consumi di evapotraspirazione inferiori a quelli misurati dallo scintillometro. D'altra parte, tale sottostima è minore quando gli intervalli di essiccamento sono più brevi, come può osservarsi per l'ultimo periodo di simulazione; un comportamento diverso si osserva invece analizzando i valori di $K_{s,SWAP}$ che mediamente risultano in sostanziale accordo con quelli dedotti dalle misure scintillometriche.

4 CONCLUSIONI

I risultati dell'indagine, nonostante siano opportune ulteriori verifiche sperimentali, hanno dimostrato la potenzialità della tecnica scintillometrica come strumento per la stima dei consumi di evapotraspirazione effettiva delle colture durante la stagione vegetativa. La disponibilità di numerose e significative serie temporali di misure di evapotraspirazione, come dimostrato nell'indagine, rappresenta un aspetto indispensabile per la verifica di applicabilità di approcci modellistici, tra quelli oggi disponibili in letteratura, per la stima dei fabbisogni irrigui delle colture.

Nell'applicazione condotta sono state utilizzate 68 misure di evapotraspirazione effettiva giornaliera su un'area coltivata ad oliveto e su cui è stato installato un

scintillometro Scintec SLS20. I dati ottenuti sono stati utilizzati per testare il modello agrodidrologico SWAP e la nota procedura di bilancio idrico proposta dalla FAO. Dall'applicazione condotta è emersa una discreta affidabilità del modello SWAP nella stima dei flussi evapotraspirativi, mentre la procedura FAO ha mostrato una netta tendenza a sottostimare i flussi evapotraspirativi nei periodi di stress idrico della coltura. L'indagine ha consentito anche di valutare, per l'olivo, i valori dei coefficienti colturali $K_{c,r}$, in cui si tiene conto anche di un coefficiente di stress, K_s . I valori di $K_{c,r}$ ricavati grazie alla disponibilità dei dati sperimentali sono risultati congruenti con quelli suggeriti dalla FAO solo in condizioni prossime a quelle potenziali ($K_s=1$; $K_{c,r}=K_c$) mentre nei periodi di stress i valori di K_s sono risultati in disaccordo con i dati proposti dalla FAO.

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.
- Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R.G., Droogers, P., D'Urso, G., Steduto, P., 2007, Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. *Agric. Water Manage.*, 92, 111-125.
- Brutsaert, W., 2005, *Hydrology: An introduction*, Cambridge University press, pp. 46-50.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998, *Environmental Biophysics*, Springer.
- D'Asaro, F., Agnese, C., Costa, G., Lazzara, P., 2008, Variabilità delle serie storiche di temperatura e precipitazione in Sicilia, *Atti XI Convegno Nazionale di Agrometeorologia*, 46-47.
- De Bruin, H.A.R., Meijninger, W.M.L., Smedman, A.S., 2002, Displaced-beam small aperture scintillometer test. Part I: the WINTEX data-set. *Boundary-Layer Meteorol.* 105 (1), 129-148.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H.: Simulation of field water use and crop yield. Monographs, Pudoc (Centre for Agricultural Publishing and Documentation), Wageningen, 189 pp., 1978.
- Minacapilli, M., Iovino, M., D'Urso, 2008, G. A distributed agro-hydrological model for irrigation water demand assessment. *Agric. Water Managem.*, 95, 123-132.
- Monteith J.L., Unsworth M.H., 1990, Principles of Environmental Physics., E. Arnold Ed., London, pp. 290.
- Rana, G., Katerji, N., 2000, Measurements and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review, *Eur. J. Agr.*, 13 (2-3), 125-153.
- Santini, A., 1990, Modellizzazione del trasporto dell'acqua nel sistema suolo - pianta - atmosfera, *Rivista di Agronomia*, 24, 273-290.
- Thiermann, V., Grassl, H., 1992, The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation. *Boundary-Layer Meteorol.* 58, 367-389.
- Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, 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. Technical Document 45. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre, The Netherlands.
- Van Genuchten, M.T., 1980, A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.