

VALUTAZIONE DEL BILANCIO IDRICO IN UNA FORESTA DECIDUA ALPINA

ASSESSMENT OF A WATER BALANCE IN A DECIDUOUS ALPINE FOREST

Emanuele Eccel*, Giambattista Toller, Luca Ghielmi, Cristina Salvadori, Nicola La Porta.

Istituto Agrario di S. Michele all'Adige – Dip. Valorizzazione delle Risorse Naturali Via Mach, 1 – 38010 S. Michele (TN)

* Corresponding Author: Tel. +39 0461 615397; E-mail: emanuele.eccel@iasma.it Fax +39 0461 650956

Received 27/06/2006 – Accepted 22/03/2007

Riassunto

E' stato impostato un bilancio idrico in un querceto termofilo nelle Alpi italiane. Nell'area sperimentale, appartenente alla rete europea di monitoraggio integrato (ICP IM), esiste dal 1993 una stazione meteorologica che ha fornito la serie di dati per la modellistica. L'approccio seguito è stato adattato dal protocollo stabilito per uno studio pilota europeo; il metodo di calcolo per l'evapotraspirazione è quello di Penman-Monteith "ad un passo", con calcolo dei coefficienti di resistenza all'evapotraspirazione in base a valori reperiti in letteratura ed adattati a una formulazione giornaliera del bilancio. La strumentazione di misura installata ad hoc nel sito e le misure condotte (precipitazione sotto chioma, umidità del suolo, LAI) hanno consentito di verificare sperimentalmente i risultati delle singole parametrizzazioni. Il modello di bilancio idrico, ed in particolare la traspirazione relativa, consentono di descrivere bene periodi siccitosi registrati negli scorsi anni, in particolare nel 2003, quando fu registrata una siccità eccezionale. Non è stato possibile evidenziare una chiara correlazione tra il deficit idrico ed i parametri vegetazionali (defoliazione e discolorazione) dello stesso anno, rilevati sulle specie arboree dell'area in esame, sia nell'anno 2003 che nel precedente decennio, anche se più piante della media hanno aumentato la percentuale di defoliazione nel 2004.

Parole chiave: bilancio idrico, siccità, foresta decidua, danni forestali

Abstract

A water balance has been set up in a thermophilous oak grove in the Italian Alps. In the experimental site, belonging to the European network of integrated monitoring (ICP IM), a meteorological station is operated since 1993, which provided data series for models. The calculation approach has been adapted from a protocol developed for a European pilot study. A Penman – Monteith's "one step" method has been used for calculation of evapotranspiration; resistance coefficients have been evaluated according to values found in literature and adapted to a daily step for the water balance model. The equipment installed ad hoc in the site and measures performed (under-canopy precipitation, soil moisture, LAI) allowed an experimental verification of the results of single parameterizations. The water balance model, and particularly relative transpiration, allowed a good description of the dry periods of last years, and particularly for 2003, during which an unprecedented drought was recorded. For the tree species growing in the area, no correlation was detected between water stress and the crown condition indices - defoliation and discoloration - within the same year, both in 2003 and along the previous ten years. Nevertheless, in 2004 defoliation raised in more plants than the average.

Keywords: water balance, drought, deciduous forest, forest damages

Introduzione

La questione del generale declino della quercia è stata affrontata sia in Italia (Ragazzi e Dellavalle 2000) che, più in generale, a livello europeo (Thomas *et al.* 2002). La resistenza alla siccità può essere ritenuta un elemento discriminante nella capacità di molte specie arboree dei climi temperati di confrontarsi con gli effetti del cambiamento climatico in atto. Gli scenari più accreditati prevedono un generale aumento della temperatura, associato ad una costanza o ad un leggero decremento degli afflussi idrici (Hasenauer *et al.* 1999; Kramer *et al.* 2000; Lexer *et al.* 2002; Sabaté *et al.* 2002).

Anche se sono noti meccanismi efficienti che aiutano il genere *Quercus* a sopportare la siccità (Abrams 1990; Thomas e Gausling 2000; Gieger e Thomas 2002), quest'ultima è stata identificata come il principale agente di danno per i querceti italiani (Cellerino e Gennaro

2000), assieme ad altri agenti biologici che sono generalmente ritenuti responsabili del declino del genere nel nostro paese.

La stima del deficit idrico è stata assunta come base per una valutazione degli effetti degli agenti meteorologici sulla salute del bosco. L'impatto degli agenti abiotici sulla salute delle foreste trentine, anche quando essi lavorano come precursori per l'azione di agenti biotici, è riassunto in Ambrosi *et al.* (2002); in tale lavoro è stata considerata anche l'area sperimentale di Pomarolo – Savignano, come una delle due aree interessate dal progetto EFOMI. Negli ultimi 25 anni le ricerche svolte sul cosiddetto "deperimento della foresta" hanno mostrato come questo fenomeno possa essere in molti casi un indiretto risultato degli effetti della pressione antropica, quali l'inquinamento, le modificazioni climatiche, i cambia-

menti nell'uso del territorio collegati alla evoluzione degli ecosistemi (Innes, 1993). E' adesso generalmente riconosciuto che tutti questi fattori possono produrre profondi cambiamenti negli ecosistemi forestali, agendo come una miscela di agenti di sofferenza che con un'azione sinergica si potenziano a vicenda (Van Leeuwen *et al.*, 2000).

Area di indagine

Inquadramento geografico - climatico

L'area di monitoraggio integrato permanente di Savignano - Pomarolo (680 m s.l.m., Vallagarina, Trentino) è classificabile più come una foresta mista termofila che come un querceto. Nonostante ciò, vista la preponderanza numerica della specie e l'interesse ecologico, si è ritenuto utile focalizzare le indagini sulla roverella (*Quercus pubescens* Willd.).

La temperatura media annua è di 10,5 °C, la piovosità di 1250 mm. L'area può essere inquadrata nella fascia climatica "Cfb" di Köppen ("Clima delle medie latitudini con inverno mite, nessuna stagione secca ed estate fresca"). Secondo la classificazione di Pavari (1916) l'area è classificabile come *Castanetum*, del tipo caldo, senza periodo siccitoso estivo. Il regime pluviometrico è caratterizzato da quantitativi nella norma per la regione alpina sudorientale, con valori sensibilmente più elevati che nel fondovalle sottostante. I massimi afflussi si misurano normalmente in tarda primavera e in autunno. Il periodo mediamente più secco è quello invernale; specialmente nella seconda parte dell'inverno, ma anche all'inizio della primavera, non sono rari lunghi periodi senza precipitazioni. I periodi piovosi più lunghi sono più probabili in autunno. Maggiori dettagli sul clima dell'area sono riportati in Eccel (2005).

Caratteristiche dei suoli

Sono state eseguite analisi accurate delle caratteristiche fisiche del suolo mediante misure con piastra di Richards a carico variabile. Le analisi di tessitura del suolo sono state eseguite per tre campioni di 10 cm l'uno, prelevati a profondità crescenti. Le misure sono state eseguite secondo gli standard del "Decreto Ministeriale" nr.173, 1/8/1997.

Una dettagliata indagine pedologica sull'area è stata ese-

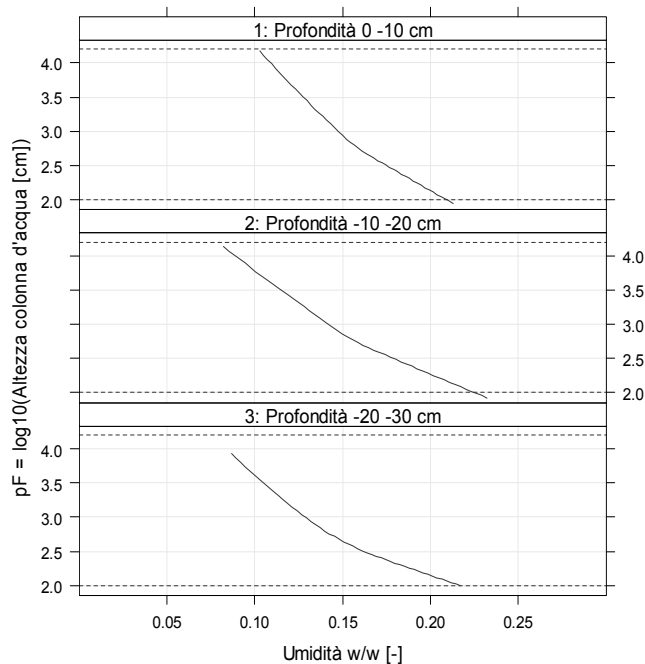


Fig. 1 – Curve di ritenzione idrica (valori medi) per tre profondità di suolo. A cura dell'Università di Brescia

Fig. 1 – Soil water retention curves at three depths (by Brescia University)

guita da Corradini e Sartori (2005), dal cui lavoro si evincono le seguenti caratteristiche:

- substrato pedogenetico calcareo ("Calcari grigi di Noriglio"), coperto da uno strato sottile di deposito glaciale;
- suolo "luvisol", da superficiale a moderatamente profondo (40 - 70 cm), acido; drenaggio buono;
- orizzonte organico classificabile come "Amphimull"; secondo gli autori, la relativamente scarsa attività delle formazioni di humus è da ricollegare probabilmente all'esposizione sud e quindi alla tendenza alla siccità estiva.

All'interno dell'area sperimentale è rilevabile un'elevata disomogeneità dei suoli, a causa dell'irregolarità morfologica, che favorisce la formazione di buche con accumulo di terreno, così come punti di erosione, dove lo strato di terreno è più superficiale. In generale, lo strato di suolo è poco profondo in tutta l'area. Il terreno è a medio impasto, con scheletro in percentuale superiore negli strati più bassi (Tab. 1). Il contenuto di materia organica è relativamente elevato.

La curva di ritenzione idrica, come risulta dalle misure condotte con piastra di Richards, è rappresentata in Fig. 1, ricavata interpolando i valori analitici. Il contenuto disponibile di acqua (differenza tra contenuti a capacità di campo e al punto di appassimento) aumenta con la profondità.

Metodi

Dati meteorologici

Per quanto riguarda i dati meteo convenzionali, essi sono stati misurati presso la stazione meteorologica che si

Tab. 1 – Misure di indice di area fogliare (LAI) rilevate in campo e relativa deviazione standard

Tab. 1 – Field Leaf Area Index (LAI) measurements and standard deviation

	LAI medio [m ² m ⁻²]	σ [m ² m ⁻²]
14-mag-03	5.3	1.0
4-giu-03	5.8	1.1
6-ago-03	5.5	0.9
22-ago-03	4.9	0.6
8-ott-03	4.0	1.1
5-nov-03	3.3	0.6
16-dic-03	1.2	0.4
21-apr-04	2.4	1.3
19-mag-04	5.0	1.4

trova in prossimità dell'area sperimentale, attiva dal 1992. I dettagli sulle misure e sul loro trattamento sono indicati in Eccel (2005). Procedure di omogeneizzazione significative sono state applicate sulla velocità del vento e sulla radiazione solare, per consentire un confronto dei dati registrati con quelli ricostruiti (caso del vento), o per utilizzare dati raccolti con lo strumento meccanico assieme a quelli misurati con lo strumento elettronico (caso della radiazione solare). La ricostruzione di dati mancanti si è resa necessaria per poter disporre di una serie completa di dati per tutto il periodo. Ai fini della validazione del modello di bilancio idrico, nel terreno dell'area sono state installate sonde di misura dell'umidità di due tipi diversi:

- due sonde capacitive multilivello Sentek "EasyAG", dotate di 4 sensori, da 10 a 50 cm di profondità; le misure, semiorarie, sono state raccolte con un acquisitore Campbell Sci. CR10x;
- una rete di 19 coppie di conduttori in acciaio lunghi 50 cm, infissi nel suolo, ad una distanza di 5 cm l'uno dall'altro, per misure da condurre con tecnica TDR; è stato impiegato uno strumento Tektronix 1502c. I conduttori sono stati installati presso i 15 raccoglitori di deposizioni sotto chioma (una coppia per punto) e presso i due punti di misura con sonda capacitiva (due coppie per punto), per eseguire confronti tra le due tecniche di misura.

La non trascurabile presenza di dati meteo mancanti ha orientato la scelta verso il calcolo di evapotraspirazione su base giornaliera. Tale approccio è previsto dagli standard dell'Irrigation and drainage paper nr. 56 della FAO (Allen *et al.*, 1998, da qui in poi indicato come "FAO 56"). In seguito si farà costante riferimento a questo manuale.

Calcolo dell'evapotraspirazione

Nello studio pilota europeo di Klap *et al.* (1997) vengono illustrati criteri generali per la definizione ad ampia scala (europea) degli indici di stress idrico. Questo approccio sarà indicato in seguito, per semplicità, come "Wageningen". In tale rapporto, la formulazione proposta per il calcolo dell'evapotraspirazione è quella di Penman-Monteith, anche se non vengono forniti dettagli su come applicare la formula al caso specifico dell'ambiente forestale. Si tratta, infatti, di determinare l'evapotraspirazione reale (e non solo quella potenziale) per un tipo di vegetazione che mal si presta a standardizzazioni per quanto riguarda la risposta alle forzanti fisiche che inducono la traspirazione. Per le colture agrarie, al contrario, la prassi normalmente seguita prevede l'applicazione di coefficienti colturali (K_c) ai valori potenziali, e tali coefficienti si trovano tabellati per tipo di cultura, stadio vegetativo e condizioni climatiche.

La formulazione di riferimento per il calcolo dell'evapotraspirazione (ET) secondo Penman-Monteith è data da (FAO 56)

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

dove

λ = calore latente di vaporizzazione

Δ = pendenza della curva temperatura - pressione di vapore saturo

R_n = radiazione netta

G = flusso di calore nel suolo

e_s = pressione di vapore saturo

e_a = pressione di vapore effettiva

ρ_a = densità dell'aria

c_p = calore specifico a pressione costante

γ = costante psicrometrica

r_s = resistenza superficiale della *canopy*

r_a = resistenza aerodinamica

Bilancio radiativo

La componente radiativa della formula di Penman-Monteith (1) ha come forzante il flusso netto radiativo, per le componenti onda corta - onda lunga, entranti nel sistema ed uscenti. Il flusso nel suolo (G) è stato trascurato, come abitualmente viene fatto nelle stime evapotraspirative che non coinvolgono valori istantanei; tale scelta è contemplata anche in "FAO 56" e nel protocollo "Wageningen". Il termine radiativo si riduce pertanto alla sola radiazione netta R_n :

$$R_n = R_s \downarrow (1 - \alpha) + R_L \downarrow - R_L \uparrow \quad (2)$$

dove $R_s \downarrow$ è la radiazione ad onda corta entrante, α è l'albedo e $R_L \downarrow$ e $R_L \uparrow$ sono le radiazioni ad onda lunga, rispettivamente entrante e uscente.

Per il termine di albedo, non essendo disponibili valori misurati in sito, è stato scelto un valore di 0.16 (Rauher 1976).

Il calcolo della radiazione netta ad onda lunga ($R_L \downarrow - R_L \uparrow$) è stato eseguito secondo il metodo proposto da "FAO 56". Tale formulazione richiede la conoscenza di temperatura, pressione di vapore, radiazione ad onda corta entrante (cioè radiazione globale), radiazione di giorno sereno, tutto su base giornaliera. Quest'ultimo termine è stato stimato con una funzione sinusoidale, interpolata da valori strumentali misurati dalla stazione in giorni significativi dell'anno, misurati nell'arco di più anni, in condizioni di particolare limpidezza del cielo.

Resistenze all'evapotraspirazione (r_s e r_a)

L'equazione (1) è stata applicata con un approccio "a un passo" per la stagione vegetativa. È stata quindi necessaria la determinazione delle resistenze r_s e r_a .

La letteratura scientifica relativa alla parametrizzazione della resistenza della *canopy* (r_s) non è particolarmente esaustiva. In generale, i valori sono calcolati per singole specie, tra le quali il genere *Quercus* è di solito rappresentato da *Q. robur* o *Q. petraea*. Kelliher *et al.* (1995) hanno raccolto valori approssimati in condizioni standard, determinati da ricerche precedenti. Secondo questi autori, esiste una differenza sostanziale tra le resistenze stomatiche di specie arboree agricole e quelle di specie forestali, mentre, all'interno della stessa categoria, le dif-

ferenze sono meno rilevanti. Tale principio consente di stimare i parametri di conduttanza (reciproco della resistenza) sulla scorta di misure eseguite in ambienti o per specie anche leggermente differenti da quelle in esame.

I valori di conduttanza reperiti in letteratura si riferiscono a valori istantanei, non a medie giornaliere. Lungo il giorno, la variazione della conduttanza è notevole e differisce da specie a specie anche all'interno del genere *Quercus* (Gieger e Thomas 2002). Il calcolo della conduttanza globale per il sistema pianta – suolo richiede prima una valutazione della conduttanza per la sola vegetazione (G_c). Eccel *et al.* (2005) hanno trovato che, mediando i 24 valori orari di G_c per una giornata, si ottiene un valore ($G_{c,24}$) generalmente diverso da quello ottenuto applicando le relazioni ai valori meteorologici medi giornalieri ($G_{c,mg}$), a causa della non linearità delle equazioni coinvolte.

Essi, dopo aver definito un rapporto (R_{Gc}) tra la conduttanza calcolata nei due modi appena illustrati,

$$R_{Gc} = G_{c,24} / G_{c,mg} \quad (3)$$

hanno trovato che R_{Gc} è ben correlato con un “indice di serenità”, dato dal rapporto tra radiazione globale misurata in un giorno qualunque e la radiazione solare tipica, in condizioni di cielo perfettamente sereno, nello stesso giorno dell'anno. R_{Gc} si avvicina a 1 quando il cielo è coperto e raggiunge valori molto più bassi, fino a 0.6, per condizioni di cielo limpido.

Con l'applicazione inversa della relazione (3) si possono trovare i valori corretti per $G_{c,24}$. Quindi, considerando i valori orari rappresentativi di quelli istantanei, quelli giornalieri sono stati moltiplicati per il coefficiente (R_{Gc}) che dipende dalla copertura del cielo, risultante dall'equazione di regressione una volta noto il valore giornaliero della radiazione solare globale. Kelliher *et al.* (1995) riportano valori di conduttanza $G_s = 1 / r_s$ per diverse “categorie” di associazioni arboree forestali; per la “foresta temperata decidua” alla grandezza, riferita al singolo elemento traspirante (conduttanza stomatica, g_s), è attribuito un valore massimo ($g_{s,max}$) di $4,6 \pm 1,7 \text{ mm s}^{-1}$. Per dettagli sulle relazioni tra G_c e G_s , si rimanda all'articolo originale.

Un caso particolare è dato dalla presenza di bagnatura fogliare; grazie alla presenza di una pellicola liquida sulle foglie, l'evaporazione della pioggia intercettata può essere parametrizzata usando l'eq. (1) con $r_s = 0$.

Il calcolo della resistenza aerodinamica r_a richiede alcune assunzioni riguardo la *canopy*. Si tratta di stimare la quota a cui attribuire l'evapotraspirazione e calcolare quindi la velocità del vento all'interno della *canopy* e all'altezza rappresentativa. La velocità del vento all'interno della *canopy* è stata stimata tramite una funzione esponenziale del LAI proposta da Rauner (1976), il quale, per la foresta decidua, suggerisce di porre il baricentro traspirante a circa 0,8 dell'altezza media degli alberi.

Per il calcolo di r_a , si è impiegata la formulazione proposta da Benincasa *et al.* (1991):

$$r_a = [\ln(z-d)/z_0]^2 / [k^2 u(z)] \quad (4)$$

con d = altezza del “piano 0”, z_0 = altezza di rugosità, $u(z)$ = velocità del vento all'altezza z , k = costante di von Karman ($k = 0.41$).

I dettagli sul calcolo giornaliero di r_s e r_a si trovano in Eccel *et al.* (2005), dal lavoro dei quali è stata mutuata la metodologia qui presentata.

Indice di stress idrico

Secondo “Wageningen”, lo stress idrico può essere determinato dall'indice di traspirazione relativa (TR_R), calcolato durante la stagione vegetativa:

$$TR_R = TR_r / TR_p \quad (5)$$

dove TR_r e TR_p sono, rispettivamente, la traspirazione reale e potenziale. Quest'ultima può essere calcolata sottraendo all'evapotraspirazione potenziale i termini evaporativi, cioè l'evaporazione dal suolo e quella dell'acqua intercettata dalla vegetazione:

$$TR_p = ET_p - E_i - E_s \quad (6)$$

Dove

ET_p = evapotraspirazione potenziale

E_i = evaporazione della precipitazione intercettata dalla *canopy*

E_s = evaporazione dal suolo.

Per il calcolo di TR_R si richiede la conoscenza del termine attuale di bilancio idrico; è quindi necessario il calcolo dell'evapotraspirazione globale del sistema suolo-vegetazione, per stimare la perdita idrica nell'equazione di bilancio. Si assume un funzionamento “a secchio”: quando il suolo raggiunge la capacità di campo, ogni eccedenza idrica viene persa. I contributi di scorrimento superficiale sono trascurati, nel senso che quanto entra nell'unità simbolica di suolo è pari a quello che ne esce. Tale assunzione è stata ritenuta accettabile per l'area di Savignano, la cui morfologia non è tale da favorire accumuli idrici o perdite per scorrimento superficiale.

Si discutono di seguito i metodi per il calcolo dei diversi termini del bilancio.

Evaporazione dal suolo

Per il bilancio idrico, l'evapotraspirazione deve essere stimata anche nel periodo tardo invernale – primaverile. Si tratta di una stagione potenzialmente asciutta, in cui è possibile che la presenza di acqua utilizzabile nel suolo sia fortemente ridotta. Per il periodo “invernale”, inteso dalla coloritura autunnale delle foglie delle specie decidue all'inizio della stagione vegetativa, l'evapotraspirazione è da attribuire all'evaporazione dell'acqua intercettata dalla vegetazione e all'evaporazione dal suolo. Nel bilancio idrico, quest'ultimo termine è di interesse solo al di fuori della stagione vegetativa, quando le foglie non traspirano e l'evapotraspirazione viene a coincidere con l' evaporazione dal suolo.

L'approccio scelto è quello descritto in "FAO 56", il quale si è dimostrato migliore, nel caso in esame, di quello proposto nel protocollo "Wageningen" (Hendriks, 1997). Si tratta di applicare un coefficiente ("Kc ini") al valor potenziale di ET_p calcolato secondo la formula di Penman-Monteith. Tale coefficiente è tabulato in funzione del numero di giorni trascorsi dall'ultima precipitazione. Qui è stata usata una retta interpolante i valori tabulati in "FAO 56", che consente una stima del valore di "Kc ini" per ogni intervallo trascorso dalla più recente precipitazione misurata.

Correzione dell'evapotraspirazione per condizioni di deficit

Nel caso in cui l'acqua disponibile nel suolo si trovi al di sotto del limite critico, è stato applicato un coefficiente di riduzione, che risulta dal rapporto tra il contenuto reale di acqua nel suolo (SMC) e quello critico (SMC_{cr}). Si è ricalcata l'impostazione del protocollo "Wageningen" (Hendriks, 1997):

$$ET_a = ET_p (SMC / SMC_{cr}) \quad (7)$$

con ET_a = evapotraspirazione reale ed ET_p = evapotraspirazione "potenziale" (che, al di fuori dalle condizioni di deficit, corrisponde al termine contenuto dell'Eq. 1). Il contenuto "critico" non è a sua volta una costante, ma risulta proporzionale alla stessa ET_p , secondo Doorenbos e Kassam (1979). Nel modello le condizioni di deficit si riferiscono sempre al giorno precedente quello di elaborazione, quando ogni termine è noto.

Calendario fenologico e modello di indice di area fogliare (LAI)

La valutazione della carenza idrica è stata applicata, secondo il protocollo "Wageningen", durante la stagione vegetativa, che corrisponde al periodo sensibile al deficit. Al posto della tabella proposta da Klap *et al.* (1997), che propone un calendario fisso per fasce climatiche, sono state utilizzate le informazioni fenologiche disponibili per l'area di Savignano. Il periodo di rilievo è breve (un triennio) e concerne le fasi di emissione delle foglie e della loro coloritura autunnale.

In aggiunta, è stata eseguita una serie di 9 misure del LAI durante l'arco di un anno (maggio 2003 – maggio 2004), per definire un semplice modello di ciclo annuale di LAI per l'area. Il periodo di un anno non è eccessivamente lungo; d'altro canto è stato osservato che l'emissione delle foglie, per la quercia, sembrerebbe essere correlata alla temperatura, ma poco sensibile al suo valore (Menzel, 2003). Per ogni sessione furono prese quattro misure per ogni punto corrispondente ai 15 raccoglitori di acqua piovana, seguendo le direzioni N-S-E-O. La media per ogni giornata deriva perciò da 60 valori. Le misure sono state eseguite con un ceptometro Sunscan (Potter *et al.*, 1996). Lo strumento esegue un confronto tra la PAR misurata in campo aperto (in fase di calibrazione) e quella misurata sotto la chioma; il LAI è stimato dall'applicazione inversa di un'equazione di estinzione della luce visibile nel suo percorso attra-

verso la *canopy*. Per tenere conto della consistenza della parti legnose, irrilevanti ai fini della traspirazione, sono state eseguite misure invernali di LAI, che hanno dato una media di 1,2, relativa a fusti, rami e, solo localmente, foglie di specie sempreverdi (pini e abeti). Per il calcolo dei parametri aerodinamici sono stati mantenuti i valori di LAI come misurati in media, mentre per la resistenza stomatica il valore del LAI invernale è stato sottratto al valore grezzo.

In mancanza di un valido modello fenologico per il bosco in esame (oltretutto di difficile realizzazione, vista la natura mista della vegetazione arborea nella parcella), si è adottata come data di inizio della stagione vegetativa la data media rilevata della schiusa delle gemme (15 aprile). Il modello di LAI è stato sviluppato dalle osservazioni condotte in sito (Tab. 2). Il valore invernale pieno è raggiunto relativamente tardi, vista la tardiva filloptosi delle querce decidue.

Per considerare la crescita della foresta durante i 12 anni del periodo di simulazione del modello di bilancio idrico, è stato applicato a ritroso un coefficiente di riduzione del LAI, linearmente e progressivamente; per il 1993 (primo anno della serie) il massimo valore di LAI è stato preso come il 75 % del valore del 2003, anno delle rilevazioni di LAI in campo (Ambrosi, com. pers.).

Stima della precipitazione filtrata dalla chioma e dello scorrimento sul tronco

Nel sito sperimentale sono installati 15 raccoglitori di precipitazioni sotto chioma e 3 raccoglitori di scorrimento lungo il tronco. L'installazione e la gestione di questi dispositivi è stata eseguita secondo il protocollo illustrato in Tartari *et al.* 2002. Tutti i raccoglitori sono stati regolarmente svuotati e l'acqua misurata settimanalmente durante l'intera durata del progetto EFOMI.

Il modello di intercettazione generalmente schematizza la *canopy* come un serbatoio avente capacità nota. Quando tale serbatoio è pieno, esso lascia filtrare l'acqua in eccesso sotto la chioma. Una percentuale di precipitazioni, poi, raggiunge il suolo senza essere intercettata (approccio classico di Gash *et al.* 1995). Sono stati proposti modelli più complessi da Mulder (1985), Watanabe e Mizutani (1995), De Ridder (2001); tuttavia, il vantaggio di un'eccessiva sofisticazione del modello è discutibile (Dolman 1987). Un modello concettualmente costituito in questo modo presenta diversi svantaggi: la difficoltà di trattare una vegetazione mista, costituita di specie decidue e sempreverdi; la stagionalità della capacità della *canopy*, che cambia anche da punto a punto a seconda della vegetazione e dello stadio fenologico; il ruolo del vento, che può far cadere al suolo parzialmente o quasi totalmente l'acqua raccolta dalle foglie. Questi modelli, che lavorano a scala di evento, avrebbero presentato problemi di calibrazione, essendo i raccoglitori svuotati solo settimanalmente; tuttavia, essendo il modello finalizzato ad un bilancio idrico, abbiamo ritenuto soddisfacente il risultato di una taratura eseguita a passi temporali di una settimana.

La stima dell'acqua presente dopo un evento precipitativo sulla *canopy* (P_c) si può esprimere con l'equazione seguente:

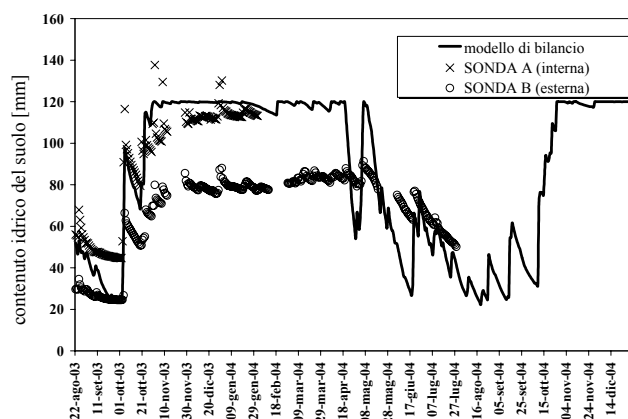


Fig. 2 – Confronto tra valori di umidità del suolo misurati dalle sonde capacitivie (interna ed esterna all'area recintata) e modello di bilancio idrico

Fig. 2 – Comparison between soil moisture values measured by capacitive probes (internal and external to the enclosure) and water balance model simulation

$$P_c = P_e (1 - P_i / P_e - P_f / P_e) \quad (8)$$

dove P_f è il termine, espresso come altezza di pioggia, riferito allo scorrimento lungo il fusto, P_i e P_e sono le altezze di precipitazione aggregate settimanalmente, misurate rispettivamente dentro e fuori la *canopy*.

Eccel *et al.* (2005) hanno testato le indicazioni del rapporto “Wageningen” (Hendricks, 1997), impiegando per la *canopy* i valori tabulati di immagazzinamento di acqua nel fogliame (0.3 mm in inverno e 0.9 mm in estate), trovando che non si può apprezzare alcun miglioramento facendo uso di un modello che schematizza la *canopy* come un serbatoio. Inoltre, le regressioni tra le precipitazioni aggregate settimanalmente, misurate dentro la *canopy* (P_i) e fuori (P_e) hanno fornito praticamente gli stessi risultati in inverno e in estate:

Per ciò che riguarda il contributo dello scorrimento sul tronco, questo termine spesso è trascurato nei modelli semplici di intercettazione della pioggia; anche l'approccio “Wageningen” non lo parametrizza. Neal *et al.* (1993) suggeriscono per un querceto valori medi del 5 % (1 – 2 % in estate, 6 – 16 % in inverno). Gash *et al.* (1995) hanno trovato per una pineta valori medi del 3 %. Eccel *et al.* (2005) hanno trovato due relazioni di tipo stagionale per esprimere lo scorrimento lungo rami e fusti. Tuttavia, essendo il contributo di questo termine secondario e visto lo scarto minimo che ne risulterebbe tra estate ed inverno, si è scelto di adottare sempre un'unica relazione per ogni periodo dell'anno ($P_c = 0.15 P_e$), con il limite del massimo valore di intercettazione (0,6 ÷ 1,2 mm, funzione del LAI).

I dati raccolti settimanalmente sono stati corretti, nella definizione del modello, per tenere in considerazione due importanti fattori:

- il riempimento di tutti o alcuni dei raccoglitori (in questo caso il dato è rifiutato, essendo sottostimato);
- l'evaporazione dai raccoglitori; da misure condotte durante l'estate – autunno 2003, le altezze totali sono state aumentate di un valore compensativo per l'evaporazione; tale valore è stato considerato dipen-

dente dalla stagione (inverno o estate) e dal numero di giorni trascorsi dagli eventi precipitativi misurati alla stazione.

Valutazione delle stato delle chiome.

I possibili danni da carenza idrica sulle piante sono stati valutati come condizioni vegetative delle chiome in funzione dei parametri di defoliazione e discolorazione, secondo gli standard internazionali del programma UNECE ICP-IM (Pylvänäinen, 1993; Allavena *et al.*, 2000; Ambrosi *et al.*, 2002).

Per quanto le relazioni tra stato idrico del suolo e idratazione della pianta non si esauriscano nel rilievo di perdita o modificazioni cromatiche delle foglie, in precedenti esperienze tali parametri sono risultati rilevanti e ben correlati a condizioni di stress idrico (Innes e Boswell, 1989; Merila *et al.*, 1998; Gieger e Thomas, 2002; Solberg, 2004). Inoltre, grazie alla loro facile e immediata rilevabilità in bosco, essi sono contemplati in molti programmi europei di monitoraggio forestale (Szepesi, 1998; Tsopelas *et al.*, 2001; Solberg *et al.*, 2002; Bussotti *et al.*, 2003; Seidling, 2004).

La stima dei due parametri nel sito d'indagine è stata effettuata visivamente da personale tecnico periodicamente addestrato nei corsi di formazione ed intercalibrazione a livello nazionale. All'interno del soprassuolo di Savignano, classificabile come bosco misto termofilo a prevalenza di latifoglie, sono state ispezionate annualmente 30 piante arboree, appartenenti alle seguenti specie: *Quercus pubescens* (8), *Quercus cerris* (1), *Ostrya carpinifolia* (4), *Fraxinus ornus* (3), *Populus tremula* (1), *Larix decidua* (5), *Pinus sylvestris* (5) e *Picea abies* (3). I controlli visivi, eseguiti ogni anno nel mese di agosto, hanno fornito dati espressi secondo un intervallo del 5%, che rappresenta il potere discriminante della metodologia.

Risultati

E' in generale da rilevare la forte eterogeneità delle misure di umidità nei diversi punti. Non è negli scopi di questo lavoro insistere su questo aspetto, che è stato trattato già in Eccel *et al.*, (2005). Per il confronto tra modello e dato misurato sono state scelte comunque le sonde capacitivie, che garantiscono la disponibilità del dato giornaliero. Purtroppo a causa di un malfunzionamento delle sonde il periodo utile per il confronto tra modello e dato reale è relativamente breve (dal 22 agosto 2003 al 28 luglio 2004), ma del massimo interesse, comprendendo l'apice della siccità estiva 2003, di portata secolare. Ogni valore di umidità del suolo misurata dalla sonda ad una determinata profondità si riferisce ad uno strato di 10 cm; sommando i valori alle quattro profondità (-10, -20, -30 e -50 cm), ed aggiungendo un valore fittizio a -40 cm ottenuto dalla media dei due strati subito sovrastanti e sottostanti, è stato valutato il contenuto in acqua per uno strato di 50 cm di profondità. Dalla fig. 2 si può apprezzare il buon accordo tra il bilancio simulato e i dati misurati dalle sonde, in particolare il modello si avvicina ai valori della sonda installata all'esterno dell'area recintata per i periodi con basso contenuto idrico, mentre si avvicina maggiormente ai valori della sonda interna nei pe-

riodi di ricarica del suolo. Ciò dipende fortemente dal valore impostato di capacità di campo nel modello, valore che, come si può osservare nella realtà, varia in maniera accentuata tra punto e punto all'interno dell'area. Le sonde (in particolare quella interna) rilevano anche momenti di superamento della capacità di campo, cosa che il modello non fa. Del resto, la rapidità con cui il suolo sgronda l'acqua in eccesso rende superfluo introdurre nel modello tale caratteristica.

Le misure condotte con la piastra di Richards hanno individuato il punto di appassimento permanente a circa 8 - 10 % su base peso / peso; applicando una densità media di 1.2 g cm⁻³, ciò corrisponde a circa 10 - 12 % espresso come volume / volume. In tali situazioni, la mancanza di segnali evidenti di sofferenza per le piante può essere spiegata con l'estrazione di acqua da strati più profondi di 50 cm. La simulazione del modello, confortata dai dati delle sonde, caratterizza il periodo siccitoso 2003 con valori anche più bassi del punto di appassimento permanente misurato in laboratorio; ma bisogna ricordare che tutte le indagini sono state eseguite sui primi 30 cm di strato (proprietà idrologiche) o 50 cm (misure di umidità). Gli alberi adulti, che hanno la possibilità di attingere da strati più profondi possono affrontare condizioni di siccità più marcata; la maggiore sensibilità va quindi cercata laddove il suolo è meno spesso e il massimo valore teorico di immagazzinamento è da ciò limitato durante i periodi di ricarica.

L'applicazione del bilancio idrico consente di quantificare lo stress potenzialmente subito dalla foresta nei 12 anni di osservazione e simulazione. I risultati possono essere riassunti nell'indice di traspirazione relativa (fig. 3). Quest'indice consente di ricavare l'informazione utile a quantificare la carenza d'acqua, comprendendo nella sua formulazione il meccanismo di limitazione della disponibilità d'acqua per le piante. Il 2003 si presenta come un anno senza eguali nel periodo di osservazione, sia per i valori di traspirazione relativa, sia per la durata del periodo di deficit, che ha coperto l'intera estate, con una sospensione in luglio.

Dall'analisi dei dati mostrati in fig. 4 non si rileva alcuna associazione tra i parametri di defoliazione e discolorazione ed i valori di carenza idrica nello stesso anno vegetativo. Le correlazioni (non mostrate) non sono risultate significative. La discolorazione percentuale media calcolata per le 30 piante è oscillata tra il 2% e il 7% negli anni 1993-2004. Sebbene il valore più alto sia stato raggiunto proprio nel 2003, questo risultato non ha permesso di evidenziare alcuna significativa correlazione con i parametri di stress idrico. E' da sottolineare come l'intero intervallo relativo al periodo d'indagine corrisponda esattamente alla capacità discriminante del sistema di rilevamento (5%).

La defoliazione media relativa alle stesse piante variava tra l'8% e il 16%, ma valgono comunque le stesse considerazioni fatte per la discolorazione. L'assenza di correlazione è rimasta valida anche utilizzando solo le specie caducifoglie (17 piante su 30) e le sole querce (9 piante su 30).

I dati di defoliazione, ritenuti più significativi di quelli di discolorazione, sono stati graficati in modo da consentire un confronto tra diversi gruppi di piante censite: tutto il

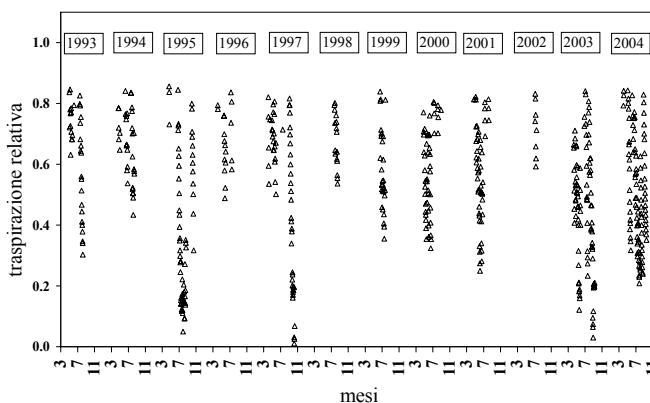


Fig. 3 - Traspirazione relativa simulata del modello di bilancio idrico per il periodo 1993-2004

Fig. 3 - Relative transpiration simulated by the water balance model for the period 1993-2004

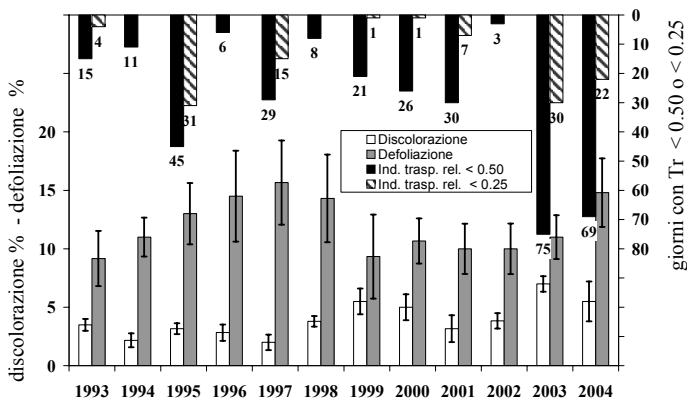


Fig. 4 - Indici di traspirazione relativa simulato e di condizioni delle chiome per il periodo 1993-2004

Fig. 4 - Indices of simulated relative transpiration and crown condition for the period 1993-2004

campione (n=30), solo latifoglie (n=17), solo genere *Quercus* (n=9) (Figg. 5, 6, 7). Innanzitutto, le serie di tutto il campione vs. latifoglie e latifoglie vs. gen. *Quercus* risultano ben correlate, mentre il legume statistico, pur essendo ancora altamente significativo, è meno buono quando si confrontano direttamente tra loro le serie del campione intero e del genere *Quercus*. Le latifoglie sembrano più suscettibili alla defoliazione e, all'interno del gruppo, le querce lo sono leggermente più delle altre specie (Maresi e Salvadori, 2005). Se si considerano le variazioni delle singole piante in anni successivi, in termini di transizione a classi di defoliazione superiore o inferiore (fig. 8), si osserva come il 2004 sia l'anno con la più alta percentuale di piante in "peggiore" nell'intero periodo di studio, a prescindere dall'aumento di perdita fogliare. Tale approccio sembra tuttavia più corretto, nella valutazione della risposta del soprassuolo al deficit idrico, rispetto al calcolo dei puri valori medi sull'intero campione, i quali probabilmente nascondono l'effetto della diversa resistenza delle specie alla siccità.

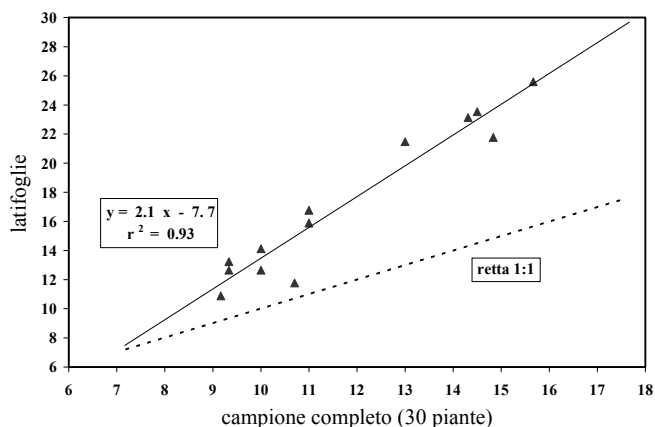


Fig. 5 – Defoliazione percentuale. Confronto tra l'intero campione e le sole latifoglie
Fig. 5 – Defoliation percentage. Whole set vs. broad-leaves

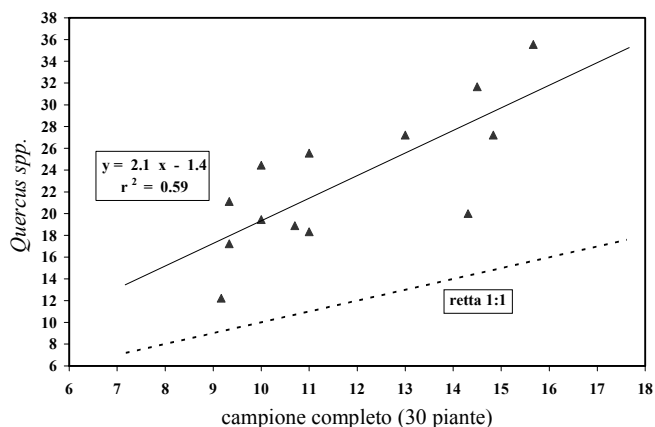


Fig. 6 – Defoliazione percentuale. Confronto tra l'intero campione e il solo genere *Quercus*
Fig. 6 – Defoliation percentage. Whole set vs. *Quercus* spp.

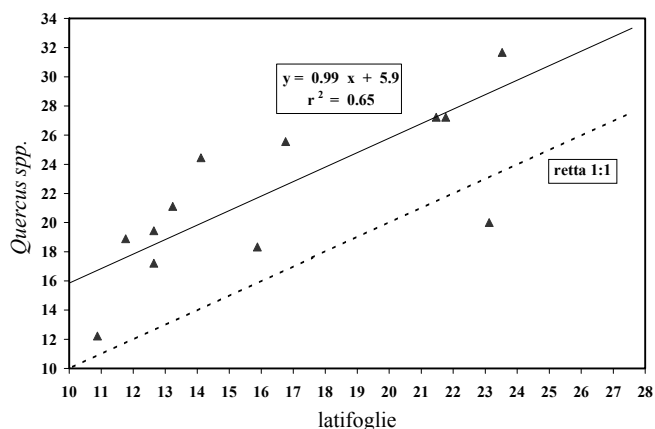


Fig. 7 – Defoliazione percentuale. Confronto tra le latifoglie e il solo genere *Quercus*
Fig. 7 – Defoliation percentage. Broad-leaves vs.. *Quercus* spp.

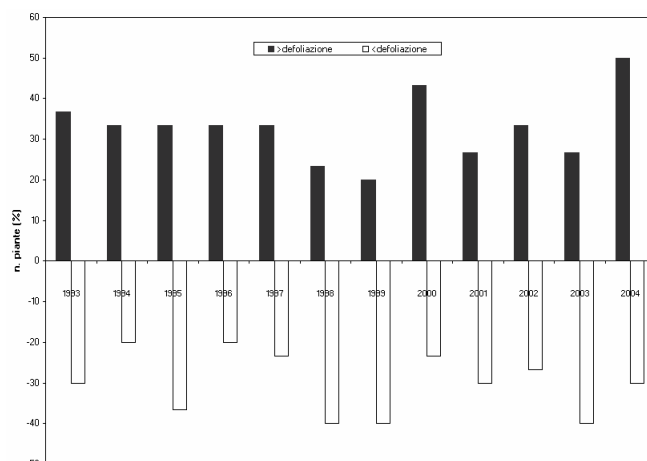


Fig. 8 – Transizione annuale (%) di piante in classi di defoliazione differenti
Fig. 8 – Annual transition (%) of trees to different defoliation classes

Discussione

Come si è detto, l'abituale applicazione in campo agrario della formula di Penman-Monteith prevede il calcolo dell'ET₀ e la sua "correzione" per la coltura e la fase vegetativa specifica mediante coefficienti colturali noti (K_c). Allen et al. (1998) propongono K_c per diverse colture agrarie. Le colture arboree considerate, per la piena stagione vegetativa e le condizioni colturali dei climi temperati, presentano valori mediamente variabili tra 0,85 e 1,20. L'unico caso di vegetazione forestale valutato è quello delle "conifere", alle quali viene attribuito un K_c fisso di 1,00, con l'avvertenza che tale valore può essere fortemente ridotto. Ci si è quindi domandati a quali valori di K_c portino le parametrizzazioni che sono state eseguite per il calcolo "ad un passo" dell'evapotraspirazione. Il parametro K_c è stato dunque calcolato mediante una divisione del valore reale, simulato dal modello evapotraspirativo, seppure in assenza di qualsiasi limitazione idrica nel suolo, per quello potenziale, corrispondente ai valori definiti dallo standard di "FAO 56". La semplice equazione è la seguente:

$$K_c = ET / ET_0 \tag{9}$$

dove ET è rappresentata dal risultato dell'applicazione dell'eq. (1) ed ET₀ rappresenta il corrispettivo valore che scaturisce dall'inserimento, al posto delle resistenze all'evapotraspirazione r_s e r_a, i valori, rispettivamente, di 70 s m⁻¹ per r_s e di 208/u per r_a, con u = velocità del vento stimata a 2 m.

Il risultato è riassunto in fig. 9, dove il valore di K_c è stato mediato lungo il periodo di simulazione, per giungere ad un valore medio per il giorno dell'anno. E' evidente che la distribuzione nell'arco dell'anno dei valori trovati ha valore per la simulazione in esame, vale a dire per il determinato sito e per la vegetazione presente in loco, che è stata approssimata ad un querceto. Il calendario fenologico è ovviamente variabile da caso a caso. Ciò che

conta è piuttosto analizzare i valori assoluti che risultano da questa simulazione. Si vede come l'emissione delle foglie, organi traspiranti, fa crescere il K_c rapidamente, fino a superare valori di 1, per poi assestarsi su livelli oscillanti, per la stagione vegetativa, tra circa 1 e 1.2.

La dipendenza dal LAI è rapida (in circa 50 giorni si passa dai valori invernali a quelli di piena stagione vegetativa), e ciò è giustificato se si pensa che il LAI effettivo (cioè quello traspirante) è percentualmente più alto quando il valore assoluto è basso, in quanto l'effetto di auto-ombreggiamento è minore. Contemporaneamente, la minor resistenza offerta alla penetrazione del vento nella *canopy* diminuisce la resistenza aerodinamica e in definitiva il trasferimento del vapore acqueo dalle foglie all'atmosfera; il termine evapotraspirativo aerodinamico è quindi relativamente elevato.

Per ciò che riguarda il modello di bilancio idrico proposto, si può ritenere che, nonostante la complessità dovuta alle numerose assunzioni in gioco, la sua applicazione sia soddisfacente. Probabilmente, una migliore parametrizzazione della pioggia filtrante sotto la chioma potrebbe migliorare il bilancio, aggiungendo dettaglio. Per questo aspetto, però, sarebbero richieste misure giornaliere della precipitazione raccolta sotto le piante. Anche la disponibilità di un modello fenologico preciso potrebbe aiutare a migliorare la definizione del bilancio in un periodo, quello primaverile, potenzialmente delicato; in questa stagione, infatti, avviene anche il cambio della parametrizzazione dell'evapotraspirazione nel modello di bilancio.

Conclusioni

Il modello si è dimostrato affidabile nel seguire il progressivo asciugamento del suolo boschivo durante l'episodio siccitoso del 2003. L'indice di traspirazione relativa sembra adatto a identificare gli episodi di deficit idrico. Tali condizioni, la cui origine può essere fatta risalire addirittura alla primavera, si protrassero fino ad ottobre. Altri periodi relativamente secchi si verificarono in altri anni, come nel 1995, in quest'ultimo caso in autunno. Tuttavia, l'estensione della siccità del 2003 rimane estrema, a causa del perdurare di periodi eccezionalmente caldi associati a scarsità di precipitazioni, che resero la stagione eccezionale in tutta l'Europa centro-settentrionale e mediterranea (Rebetez *et al.*, 2004).

I parametri defoliazione e discolorazione sono da tempo ampiamente utilizzati per la valutazione dello stato delle chiome nei siti europei aderenti alle reti *International Co-operative Programme of Integrated Monitoring* e *ICP-Forests*. Questi parametri vengono utilizzati su scala internazionale con l'auspicio di identificare modelli spaziali e di sviluppo temporale della condizione delle chiome e vengono generalmente considerati come indicatori addizionali per monitorare condizioni di sofferenza, in quanto sensibili ai meccanismi adattativi di carenza idrica o nutritiva. In varie occasioni tali parametri si sono dimostrati strettamente associati a condizione di deficit idrico, sia in conifere (Solberg, 2004) che in latifoglie (Luisi e Siletti, 1989). Tuttavia, anche in specie sistematicamente vicine, si sono riscontrati intervalli di tolleranza marcatamente diversi (Gieger e Thomas, 2005). Ciò

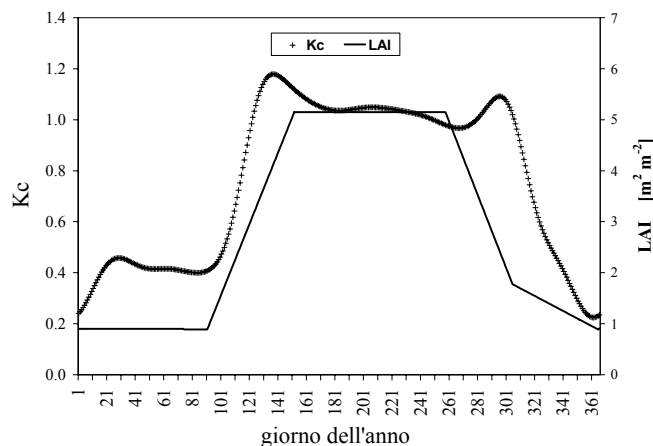


Fig. 9 – Valori del coefficiente colturale (K_c) per la foresta mista di querce durante la stagione vegetativa

Fig. 9 – Estimated crop coefficient (K_c) values in the mixed-oak stand (vegetative season)

nonostante, la loro modesta specificità pone stretti vincoli alla loro interpretazione in termini di relazioni causa-effetto (De Vries *et al.*, 2002). Anche altre concause possono interagire con questi parametri, come osservato da De Zwart (1998), che ha evidenziato statisticamente come la defoliazione e la discolorazione possano essere spiegate dall'azione combinata di ozono e composti acidi presenti nell'aria. Inoltre, Dobbertin (2005), in una recente *review* sugli indicatori di sofferenza ambientale, sottolinea come le estati estremamente siccitose, come quella osservata in larga parte del continente europeo nel 2003, influenzino immediatamente la crescita del fusto, meno importante per i bilanci energetici della pianta, mentre effetti come la defoliazione, più direttamente connessa con i processi vitali per la pianta, appaiono visibili solo alcuni mesi più tardi.

Tuttavia, i risultati suddetti non sono stati confermati dalle indagini sullo stato delle chiome, il quale, durante gli anni di osservazione, non ha manifestato una chiara correlazione con gli indici di stress utilizzati. Infatti, nonostante l'eccezionale siccità del 2003, manifestatasi già a partire da giugno, si è osservato che gli effetti in termini di defoliazione e discolorazione medie non sono stati evidenti, almeno fino al momento del rilievo. Tale situazione è risultata comune a molte aree di monitoraggio di Livello II dell'Europa meridionale (UNECE, 2004), dove non sono comparsi sintomi di danni da siccità a breve termine, probabilmente per una maggior resistenza ai periodi caldi e siccitosi rispetto agli ambienti alpini.

Nei confronti della risposta delle piante al deficit idrico, sono noti numerosi esempi di come le specie mediterranee siano capaci di tollerare prolungati periodi di siccità grazie a vari adattamenti fenologici e fisiologici (Örtli *et al.*, 1990). Per esempio, le piante possono attivare un controllo fisiologico sugli scambi gassosi e una riduzione dell'area fogliare per ottenere un appropriato bilancio idrico per specifiche condizioni ambientali (Tenhunen *et al.*, 1990; Gucci *et al.*, 1997). Studi sugli adattamenti fenologici e fisiologici dell'apparato radicale a carenza idrica

drica hanno fatto rilevare una variazione dell'estensione delle radici (Spollen e Sharp, 1991), della loro crescita (Coutts *et al.*, 1999), e della distribuzione delle radici laterali (Trewavas, 1986).

Sempre riguardo alle caratteristiche degli apparati radicali, è utile rammentare che la specie più rappresentativa del soprassuolo dell'area di indagine risulta essere la roverella (*Quercus pubescens*), con 9 piante sulle 30 investigate. Dalla letteratura scientifica risulta come l'architettura del sistema radicale di questa specie sia particolarmente profondo, robusto e sviluppato, per adattarsi a suoli anche compatti e poveri e a condizioni di diverso grado di pendenza (Di Iorio *et al.*, 2005). Inoltre, un recente studio specifico sulle condizioni di adattabilità e recupero di piante di roverella e di ornello (*Fraxinus ornus*, nell'area allo studio rappresentato da 3 esemplari sui 30 esaminati) ha mostrato come, per entrambe le specie, le differenze tra gli esemplari sottoposti a stress idrico e il testimone non fossero significative dopo 75 giorni di trattamento (Chiatante *et al.*, 2006). Anche per le conifere presenti nell'area di studio la letteratura scientifica è piuttosto ricca di studi che riguardano l'apparato radicale e la sua capacità di rispondere a condizioni di criticità idrica ed adattarsi. Esiste una netta differenza nell'approfondimento dell'apparato radicale tra abete rosso, il più superficiale, e larice e pino silvestre con apparati nettamente approfonditi e robusti (Konopka, 2001). Ciononostante, vari lavori sperimentali hanno dimostrato che in periodi di siccità prolungata e alte temperature anche l'abete riduce la crescita delle radici principali e ne allunga la loro dormienza, al contempo aumentando lo sviluppo di nuove micorrize (Feil *et al.*, 1988). Riguardo al pino silvestre (5 piante sulle 30 investigate) sono stati osservati effetti negativi di prolungate siccità più pronunciati nell'apparato radicale che nella chioma (Palatova, 2002).

E' stata ampiamente dimostrata la capacità delle simbiosi micorriziche di assicurare alla pianta una maggior resistenza nei periodi di carenza idrica (Auge, 2001; Ruiz-Lozano, 2003; Wu e Chang, 2004). Oltre alla presenza di una condizione pedologica favorevole, come mostrato dai dati succitati, e di una composizione vegetale specifica ben equilibrata e assortita, il sito di Savignano presenta una biodiversità micetica particolarmente ricca e numerosa (La Porta *et al.*, 2002; 2005). L'elevata ricchezza di specie micorriziche permette di ipotizzare che questo fattore agisca in funzione protettiva verso periodi di carenza idrica e che quindi tali condizioni abbiano uno scarso impatto sullo stato delle chiome della vegetazione arborea, come da noi osservato.

L'assenza di danneggiamenti evidenti da un lato porta a concludere che, nonostante le ampie differenze degli indici di siccità nel periodo d'indagine, la vegetazione arborea nel sito presenta una buona omeostasi, dall'altro pone degli interrogativi sull'adeguatezza dei parametri ufficiali di danno (defoliazione e discolorazione medie), ai quali, forse per il metodo usato o per la scarsa rappresentatività del campione, possono sfuggire eventi anche rilevanti come la siccità del 2003.

Lo studio degli effetti degli andamenti temporali delle condizioni di siccità, stratificati secondo le specie arboree, le tipologie edafiche e pedologiche e le regioni geo-

grafiche, potrebbe apportare interessanti, nuovi contributi in termini di analisi delle relazioni tra condizioni delle chiome e chimica fogliare, del suolo e dell'acqua circolante.

Ringraziamenti

Grazie per la collaborazione a: Alessandro Cescatti (JRC Ispra); Mario Ramponi, Aldo Biasi, Emanuel Endrizzi, Flavio Marchetti (Istituto Agrario di S. Michele), Stefano Barontini e Roberto Ranzi (Università di Brescia).

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto speciale "EFOMI", coordinato dall'Istituto Agrario di S. Michele a/A e finanziato dal "Fondo Unico per la Ricerca" della Provincia Autonoma di Trento.

Bibliografia

- Abrams, M., 1990. Adaptations and responses to drought in *Quercus* species of North America. *Tree Physiology*, 7, : 227-238.
- Allavena, S., B. Petriccione, B.e. E. Pompei, E., 2000: . The CONE-COFOR programme. In: Ferretti M. (Ed.), *Integrated and Combined (I&C) evaluation of intensive Monitoring of forest Ecosystems in Italy – Concepts, Methods and First Results. Annali Istituto Sperimentale per la Selvicoltura, Special Issue, Arezzo, anno 1999, vol. 30: , 17-31.*
- Allen, R.G., L.S. Pereira, L.S., D. Raes, D., e M. Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56, Rome. Pag. 300.*
- Ambrosi, P., A. Bertagnolli, A., M. Confalonieri, M., N. La Porta, N., F. Marchetti, F., G. Maresi, G., S. Minerbi, S., C. Salvadori, C., e R. Valentini, R., 2002. Eight years of integrated monitoring in Alpine forest ecosystems of Trentino and South Tyrol, Italy. *J. Limnol.*, 61 (Suppl. 1), :137-147.
- Auge, R.M., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11 (1), : 3-42.
- Barry, R.G. e R.J. Chorley, R.J., 1992. *Atmosphere, weather and climate (6° ed.)*. Routledge, London and New York. Pag. 284.
- Benincasa, F., G. Maracchi, G., P. Rossi, P., 1991. *Agrometeorologia*. Patron ed., Bologna. Pag. 230.
- Bussotti, F.; Bussotti, F., Gerosa, G.; Gerosa, G., Cenni, E.; Cenni, E., Cozzi, A.; Cozzi, A., Ferretti, M.; Ferretti, M., Bettini, D.; Bettini, D., Nibbi, R., 2003. Crown condition surveys in Italian forests: issues in reporting findings. *Environmental Monitoring and Assessment*, 85 (3), : 221-238.
- Cellerino, G.P. e M. Gennaro, M., 2000. Drought as predisposing factor in oak decline. In: Ragazzi e Dellavalle, 2000 (op. cit.), :159-175.
- Chiatante, D.; Chiatante, D., Iorio, A. di; , Sciandra, S.; Sciandra, S., Scippa, G. S.; , Mazzoleni, S., 2006. Effect of drought and fire on root development in *Quercus pubescens* Willd. and *Fraxinus ornus* L. seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 56 (2), 190-197.
- Chuine, I., e P. Cour, P., 1999. Climatic determinants of budburst seasonality in four temperate-zone tree species. *New Phytol.*, 143, :339 – 349.
- Corradini, F. e Sartori, G., 2005: . Soil and water chemistry in two forest sites of Trentino (Italian Alps). In: Salvadori C. & Ambrosi P. (eds.), 2005 – EFOMI Valutazione ecologica di cenosi forestali sottoposte a monitoraggio integrato. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento. *Studi Trentini di Scienze Naturali - Acta Biologica*, 81(2004), Suppl. 1, : 153-164.
- Coutts, M.P., Nielsen, C.C.N., Nicoll, B.C., 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and Soil*, 217: , 1-15.
- De Ridder, K., 2001. Rainwater storage on plant canopies. *J. of Geographical Research*, 106, No. D14, : 14819-14825.
- De Vries, W., Forsius, M., Lorenz, M., Lundin, L., Haussman, T., Augustin, S., Ferretti, M., Kleemola, S., Vel, E., 2002. Cause-effect relationships of Forest Ecosystems. Joint Report by ICP Forests and ICP Integrated Monitoring. UN ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. ICP Forests, PCC, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products. Hamburg, Germany. Pag. 46.

- De Zwart, D., 1998. Multivariate gradient analysis applied to relate chemical and biological observations In: Kleemola S., Forsius, M., (eds.), 7th Annual Report 1998. UN ECE ICP Integrated Monitoring. The Finnish Environment, 217.: 15-29.
- Di Iorio, A., Lasserre, B., Scippa, G. S., Chiatante, D., 2005. Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions. *Annals of Botany* 95 (2) 351-361.
- Dobbertin, M., 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research*, 124 (4), :319-333.
- Dolman, A.J., 1987. Summer and winter rainfall interception in an oak forest. Predictions with an analytical and a numerical simulation model. *Journal of Hydrology*, 90.: 1-9.
- Doorenbos, J. e A.H. Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper nr. 33. , Rome. Pag. 144.
- Eccel, E., 2005. A climatic characterization of two experimental forest areas in Trentino, aimed at damage assessment induced by meteorological agents. In: Salvadori C. e Ambrosi P. (eds.), 2005 – EFOMI Valutazione ecologica di cenosi forestali sottoposte a monitoraggio integrato. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento. Studi Trentini di Scienze Naturali Naturali,- Acta Biologica, 81(2004), Suppl. 1.: 125-136.
- Eccel, E., Toller, G., e Ghielmi, L., 2005. The soil water balance of a mixed oak stand in the southern Alps. In: Salvadori C. & Ambrosi P. (eds.), 2005 – EFOMI Valutazione ecologica di cenosi forestali sottoposte a monitoraggio integrato. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento. Studi Trentini di Scienze Naturali ,- Acta Biologica, 81(2004), Suppl. 1.: 137-149.
- Feil, W.; Feil, W., Kottlee, I.; Oberwinkler, F., 1988. The effect of drought on mycorrhizal production and very fine root system development of Norway spruce under natural and experimental conditions. *Plant and Soil*, 108 (2):, 221-231.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R., e Lachaud, G., 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170:79-86.
- Gieger, T. e Thomas, F.M., 2002. Effects of defoliation and drought stress on biomass partitioning and water relations of *Quercus robur* and *Quercus petraea*. *Basic Appl. Ecol.*, 3:171-181.
- Gieger, T., Thomas, F.M., 2005. Differential response of two Central-European oak species to single and combined stress factors. *Trees: Structure and Function* 19 (5):607-618.
- Gucci, R., Aronne, G., Bombardini, L., Tattini, M., 1997. Salinity tolerance in *Phillyrea* species. *New Phytologist* 135, 227–234.
- Hasenauer, H., R. Ramakrishna, R., R. Nemani, R., K Schadauer e, K., S.W. Running, S.W., 1999. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, 122: 209-219.
- Hendriks, K., 1997. Calculation of evapotranspiration, transpiration, interception and soil evaporation. In: Klap et al. 1997. "Annex 2":195-200.
- Innes, J. L., 1993. *Forest Health: its assessment and Status*. CAB International Oxon, UK: 677 pp.
- Iorio, A. di; Lasserre, B.; Scippa, G. S.; Chiatante, D., 2005. Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions. *Annals of Botany* 95 (2) 351-361.
- Kelliher, F.M., R. Leuning, R., M.R. Raupach e, M.R., E.D. Shulze, E.D., 1995. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agr. For. Met.*, 73:1-16.
- Klap J.M., W. de Vries, W., J.W. Erisman, J.W., E.P. van Leeuwen, E.P., 1997. Relationships between forest condition and natural and anthropogenic stress factors on the European scale; pilot study. RIVM Report 722108022, Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen (NL). Pag. 245.
- Klap, J.M., G.J. Reinds, G.J., A. Bleeker, A., W. de Vries, W., 2000. Environmental stress in German forests. *Alterra-rapport* 134. Wageningen (NL). Pag. 73.
- Konopka, B., 2001. Analysis of interspecific differences in tree root system cardinality. *Journal of Forest Science* 47 (8): 366-372.
- Kramer, K., 1994. A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in the Netherlands and Germany. *Plant, Cell and Environment*, 17:367-377.
- Kramer, K., I. Leinonen, I.e, D. Loustau, D., 2000. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forest ecosystems: an overview. *Int. J. Biometeorology*, 44:67-75.
- La Porta N., Valentinotti R., Salvadori C., Ambrosi P., 2005. Mycobiota monitoring as indicator of forest biodiversity. *International Forestry Review* 7 (5), 36.
- La Porta N., Valentinotti R., Salvadori C., Ambrosi P., Minerbi S., Confalonieri M., 2002. Analisi quantitativa della componente micetica di aree forestali in ambiente alpino. *Gredleriana – Acta Biologica*. 2, 331-336.
- Lexer, M.J., K. Hönninger, K., H. Scheifinger, H., C. Matulla, C., N. Groll, N., H. Kromp-Kolb, H., K. Schadauer, K., F. Starlinger e, F., M. Englisch, M., 2002. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 162.: 53-72.
- Luisi, N., Silletti, G.N., 1989. Danni da siccità in boschi naturali in Basilicata. *Monti e Boschi*, 40 (6):, 51-55.
- Maresi, G. e Salvadori, C., 2005. Crown conditions and damages in two forest ecosystems in Trentino (Italy). In: Salvadori C. & Ambrosi P. (eds.), 2005 – EFOMI Valutazione ecologica di cenosi forestali sottoposte a monitoraggio integrato. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento. Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Biologica, Edizione speciale nr. 81 (2004), Suppl. 1, 253-270.
- Menzel, A., 2003. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 57:243-263.
- Merila, P.; Lindgren, M.; Raitio, H.; Salemaa, M., 1998. Relationships between crown condition, tree nutrition and soil properties in the coastal *Picea abies* forests (Western Finland). *Scandinavian Journal of Forest Research* 13 (4) : 413-420.
- Mulder, J.P.M., 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: B.A. Hutchinson and B.B. Hicks (Ed.): *The forest-atmosphere interaction*. Reidel, Dordrecht:177-196.
- Neal, C., A.J. Robson, A.J., C.L. Bhardway, C.L., T. Conway, T., H.A. Jeffery, H.A., M. Neal, M., G.P. Ryland, G.P., C.J. Smith e, C.J., J. Walls, J., 1993. Relationships between precipitation, stemflow and throughfall for a lowland beech plantation, Black Wood, Hampshire, southern England: findings on interception at a forest edge and the effects of storm damage. *Journal of Hydrology*, 146:221-233.
- Örtli, J.J., Lips, S.H., Agami, M., 1990. The strength of sclerophyllous cells to resist collapse due to negative turgor pressure. *Acta Oecol.* 11, 281–289.
- Palatova, E., 2002. Effect of increased nitrogen depositions and drought stress on the development of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) - II. Root system response. *Journal of Forest Science* 48 (6) : 237-247.
- Pavari A., 1916. Studio preliminare sulle colture di specie forestali esotiche in Italia. *Annali del Regio Istituto Superiore Forestale Nazionale*, Vol. 1:159-379.
- Potter, E., J. Wood e, J., C. Nicholl, C., 1996. *Sunscan Canopy Analysis System: user manual*. Delta-T Devices Ltd. Cambridge.: Pag. 84 pp.
- Puhe, J., 2003. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands - a review. *Forest Ecology and Management* 175 (1/3): 253-273.
- Pylvänäinen M., (Eds.) 1993. *Manual for Integrated Monitoring*. Environmental Data Centre (EDC) Helsinki, FIN: Pag. 114 pp.
- Ragazzi, A. e Dellavalle, I. (Ed.), 2000. *Decline of oak species in Italy. Problems and perspectives*. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze.: Pag. 257 pp.
- Rauner, J.L., 1976. *Deciduous forests*. In Monteith, J.L. (ed. by): *Vegetation and the Atmosphere*. Vol. 2. Academic Press. London, New York, S. Francisco: 241-264.
- Rebetz, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, K., Gartner, K., Kropp, J. e, Menzel, A., 2004. Heat and drought 2003: a climate analysis. Scientific Conference: Impacts of the Drought and Heat in 2003 on forests. Freiburg (D), 17-19 November 2004. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung. Book of abstracts: 1*.
- Ruiz-Lozano J.M., 2003. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. *New perspectives for molecular studies. Mycorrhiza*, 13 (6): 309-317.
- Sabaté, S., Gracia, C.A. e Sanchez, A., 2002. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus Halepensis*, *Pinus Pinaster*, *Pinus Sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management*, 162: 23-37.
- Seidling, W., 2004. Crown condition within integrated evaluations of Level II monitoring data at the German level. *European Journal of Forest Research*, 123 (1) : 63-74.

- Sharkey, T.D. e Raschke, K., 1981. Separation and measurement of direct and indirect effects of light on stomata. *Plant. Physiol.*, 68: 33-40.
- Solberg, S., 2004. Summer drought: a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. *Forest Pathology*, 34 (2): 93-104.
- Solberg, S., Andreassen, K., Hysten, G., Torseth, K., 2002. Norwegian monitoring programme for forest damage. Annual report 2001. Foreign Overvakingsprogram for skogskader. *Arvsrapport 2001. Rapport fra Skogforskningen (No.6)* : 24 pp.
- Spollen, W.G., e Sharp, R.E., 1991. Spatial distribution of turgor and root growth at low water potentials. *Plant Physiol.*, 96: 438-443.
- Szepesi, A., 1998. Forest health status in Hungary. In: Bytnerowicz, A.; Arbaugh, M. J.; Schilling, S. L. (Eds.): *General Technical Report - Pacific Southwest Research Station, USDA Forest Service (No. PSW-GTR-166)*: 299-312.
- Tartari, G.A., Arisci, S., Brizzio, M.C., Marchetto, A., Mosello, R. Pranzo, A., 2002. *Manuale per le operazioni di campionamento. Programma nazionale integrato per il controllo degli ecosistemi forestali (CON.ECO.FOR.). Studio della chimica e delle deposizioni atmosferiche. Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – Istituto per lo studio degli ecosistemi. Verbania Pallanza (Italy). Pag. 35.*
- Tenhunen, J.D., Sala Serra, A., Hartley, P.C., Dougherty, R.L., Reynolds, J.J.F., 1990. Factors influencing carbon fixation and water use by Mediterranean sclerophyll shrubs during summer drought. *Oecologia*, 82: 381-393.
- Thomas, F.M. e T. Gausling, T., 2000. Morphological and physiological responses of oak seedlings (*Quercus petraea* and *Q. robur*) to moderate drought. *Ann. For. Sci.*, 57: 325-333.
- Thomas, F.M., Blank, R., Hartmann, G., 2002. Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *For. Path.*, 32: 277-307.
- Trewavas, A.J., 1986. Resource allocation under poor growth conditions. A major role for growth substances in developmental plasticity. In: Jennings, D.H., Trewavas, A.J. (Eds.), *Plasticity in Plants. Company of Biologists Ltd., Cambridge*, pp. 31-77.
- Tsopelas, P., Angelopoulos, A., Economou, A., Voulala, M., Xanthopoulou, E., 2001. Monitoring crown defoliation and tree mortality in the fir forest of Mount Parnis, Greece. In: Radoglou, K. (Ed.): *Proceedings of the International Conference: Forest Research: a challenge for an integrated European approach. Thessaloniki, Greece, 27 August-1 September 2001, Volume I* : 253-258.
- Van Leeuwen, E. P., Hendriks, K. C. M. A., Klap, J. M., De Vries, W., De Jong, E., Erisman, W., 2000. Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe. Part II: Estimation of stress induced by meteorology and air pollutants. *Water, Air and Soil Pollution*, 119: 335-362.
- Watanabe, T. e Mizutani, K., 1995. Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest. *Agr. and For. Met.*, 80: 195-214.
- Wu C. e Chang C., 2004. Mechanism for the drought stress resistance of arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of the Chinese Society for Horticultural Science*, 50 (3): 235-244.
- Yera, R., Davis, S., Frazer, J., Tallman, G., 1986. Response of adaxial and abaxial stomata of normally oriented and inverted leaves of *Vicia Faba L.* to light. *Plant Physiol.*, 82: 384-389.