

IL RILASCIO DEL POLLINE COME INDICATORE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI: LA FIORITURA DELL'OLIVO NEL CENTRO ITALIA

POLLEN RELEASE AS INDICATOR OF CLIMATIC CHANGE: OLIVE FLOWERING IN CENTRAL ITALY

Pasqualoni L.¹, Federico S.², Bonofiglio T.³, Orlandi F.³, Avolio E.¹,
Bellecci C.⁴, Fornaciari M.³, Romano B.³

1- CRATI s.c.r.l., Zona Industriale, area ex sir, 88046 Lamezia Terme (CZ)- Italy tel: 0968 209825 / 0968 209150

2-CNR-ISAC, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Sez. Lecce, - 73100 Lecce (LE) Italy

3-Department of Plant Biology, Agroenvironmental and Animal Biotechnology, University of Perugia, Borgo XX Giugno 74 - 06121 Perugia Italy.

4- Faculty of engineering, University of Rome "Tor Vergata", via del Politecnico 1 - 00133 Rome Italy

* Corresponding Author Tel./Fax +39.968.209150, +39.968.209825; E-mail address: lpasqualoni@crati.it

Received 17/09/2007 – Accepted 09/11/2007

Riassunto

In questo lavoro è stata analizzata la correlazione tra le date di fioritura della specie *Olea europaea* L. e la temperatura media dell'aria nel periodo 1982-2005 in una area olivicola del centro Italia (Umbria). I dati fenologici, riguardanti la fase di fioritura sono stati rilevati indirettamente attraverso tecniche di monitoraggio aerobiologico con campionatori volumetrici (VPPS 2000 Lanzoni). Mentre per i dati meteorologici (temperatura media) sono stati utilizzati sia quelli misurati nella stazione meteorologica in prossimità del punto di raccolta del polline, sia quelli ricavati dalle uscite del modello a circolazione generale del Centro Europeo (ECMWF).

L'obiettivo è quello di determinare eventuali correlazioni tra il comportamento fenologico (fioritura) dell'olivo e l'andamento della temperatura dell'aria nell'area dell'Umbria. È stata valutata la possibilità di utilizzare le uscite del modello a circolazione generale del Centro Europeo (ECMWF) per studiare questo tipo di correlazioni. Le analisi mostrano che la temperatura dell'aria influenza in maniera decisa la data di fioritura dell'olivo. La variazione di ± 1 °C della temperatura media giornaliera, nel periodo precedente la fioritura, fa oscillare la data di inizio fioritura (SF) di almeno ± 4.3 giorni, e la data di massima fioritura (MF) di ± 7.2 giorni. In particolare, l'avanzamento della fioritura è dovuto all'incremento di temperatura media giornaliera nei mesi di febbraio, maggio e giugno. Infatti, i risultati dell'anomalia standardizzata della temperatura mensile (SA) hanno messo in evidenza un trend positivo dell'anomalia, nel periodo 1982-2001 per questi tre mesi (febbraio: slope = 0.07 e $p(>r) = 0.07$; maggio: slope = 0.07 e $p(>r) = 0.093$; giugno: slope = 0.09 e $p(>r) = 0.013$). Inoltre, i risultati mostrano come il modello a circolazione generale, nonostante la bassa risoluzione orizzontale che non consente di apprezzare le variazioni microclimatiche, sia utile per questo tipo di studi.

Parole chiave: *Olea europaea* L., variabilità climatica, fenologia, modellistica atmosferica.

Abstract

In this study we analyzed the correlation between the flowering dates of *Olea europaea* L. and the mean air temperature in the period from 1982-2001 in an olive growing area of Central Italy (Umbria). The phenological data on flowering phase were registered indirectly through an aerobiological monitoring technique by use of volumetric samplers (VPPS 2000 Lanzoni). For meteorological data (mean temperature) we used both the measurements obtained at the meteorological station located near the pollen release site and the results of the ECMWF general circulation model.

The aim of the study was to determine relationships between phenological behaviour of the olive (flowering) and the air temperature trend in the Umbria region. The possibility to utilize the analysis of the ECMWF general circulation model to investigate this correlation was evaluated. The analysis showed that the air temperature greatly influenced the olive flowering date. The variation of the daily mean temperature of ± 1 °C in the period before flowering makes the start date of flowering (SF) change by at least ± 4.3 days, and the date of maximum flowering (MF) by ± 7.2 days. In particular, the advancement of flowering was due to the increase of mean temperature in February, May and June. The results of standardized anomaly of the mean monthly temperature showed a positive anomaly trend during the period 1982-2001 for these three months (February: slope = 0.07 and $p(>r) = 0.07$; May: slope = 0.07 and $p(>r) = 0.09$; June: slope = 0.09 and $p(>r) = 0.013$). Moreover, the results demonstrated that the general circulation model, despite its low horizontal resolution which does not permit us to estimate the micro-climatic variations, can be utilized for these applications.

Keywords: *Olea europaea* L., climatic variability, phenology, atmospheric modeling

Introduzione

Molti studi hanno stabilito i rapporti fra le varie fasi fenologiche e l'andamento climatico in diverse specie sia vegetali che animali (Sparks *et al.* 2000; Beaubien & Freeland, 2000; Jaagus e Ahas, 2000; Teranishi *et al.* 2000; Menzel *et al.* 2001; Peñuelas *et al.* 2002; Chmielewski e Rötzer, 2002; Orlandi *et al.* 2005a; Orlandi *et al.* 2005b). Quindi i potenziali cambiamenti climatici potranno determinare in futuro modifiche sulla distribuzione spaziale delle specie naturali più sensibili e spostamenti temporali nella comparsa delle diverse fenofasi (Higgins e Richardson 1999; Schwartz e Reiter 2000; Neilson *et al.* 2005). Le manifestazioni fenologiche sono indicatori sensibili ed osservabili dei cambiamenti della biosfera in risposta alle mutazioni del clima (Peñuelas e Filella 2001). Per questo motivo la fenologia negli ultimi anni ha avuto un aumento di attenzione nel contesto del cambiamento del clima (Menzel *et al.* 2001). In particolare, la preoccupazione per i cambiamenti climatici ha accresciuto l'importanza che i dati fenologici rivestono per determinare la risposta della biosfera a tali cambiamenti (Schwartz e Chen 2002; Zhao e Schwartz 2003; Donnelly *et al.* 2006).

Nell'area del bacino del Mediterraneo, una delle specie arboree coltivate più diffuse è l'olivo (*Olea europaea* L.) ed è perfettamente adattata al clima temperato del Mediterraneo. La fioritura di questa specie si presta molto bene allo studio delle variazioni della temperatura dovute ai cambiamenti climatici, in particolare per il riscaldamento primaverile (spring warming), per le sue caratteristiche fisiologiche: fioritura tardo primaverile, insensibilità al fotoperiodo (Hachett e Hartmann 1964) e per l'elevata esigenza di accumulo termico (gradi giorno, GDD) necessarie per lo sviluppo dell'infiorescenza (Chuine *et al.* 1998). Inoltre la fioritura dell'olivo, specie ormai esclusivamente anemofila risulta facilmente identificabile per il gran numero di fiori portati a maturazione e la brevità del suo ciclo di fioritura.

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di analizzare la correlazione tra la variazione delle date di fioritura della specie *Olea europea* L. nel periodo 1982-2005 e la variazione della temperatura media giornaliera precedente la fioritura, in una area estesa oltre 2500 km².

Inoltre, è stata valutata la possibilità di utilizzare le uscite di un modello a circolazione generale (ECMWF) per questo tipo di studi.

Materiali e metodi

Area di studio

L'area di studio si trova nella regione dell'Umbria (Fig. 1). Le caratteristiche climatiche della regione sono quelle tipiche delle regioni interne. I caratteri tipici del clima mediterraneo, infatti, risultano attenuati a causa della lontananza dal mare. La presenza della dorsale appenninica nella parte nord-est della regione costituisce una barriera ai flussi di aria fredda provenienti da nord-est soprattutto durante il periodo invernale. Nella maggior parte della regione la temperatura raramente raggiunge valori minimi particolarmente bassi, come si vede dalla vegetazione tipica delle regioni mediterranee. Le temperature medie annue sono generalmente comprese fra gli

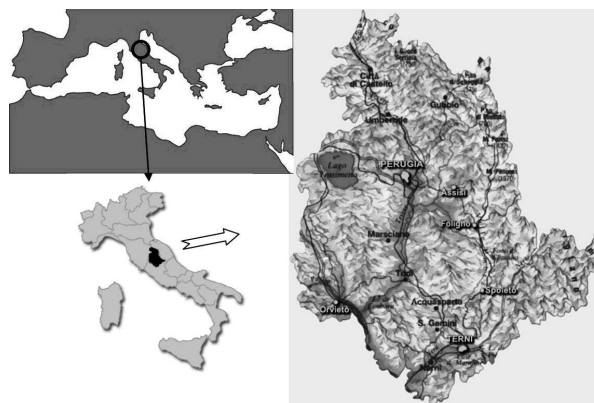


Fig. 1 - Posizione geografica dell'area di studio (Regione Umbria, Italia).

Fig. 1 – Area of study (Umbria Region, Italy).

11,5° di Norcia ed i 15° di Terni passando per i 13,5° di Perugia e Spoleto ed i 14° di Orvieto. L'altitudine gioca un ruolo importante: Norcia, a 604 m ha una temperatura media del mese più freddo (Gennaio) di circa 2° mentre Perugia (493 m) e Spoleto (396 m) presentano valori di quasi 3° superiori (Perugia 4,9°). Le temperature medie del mese più caldo (Luglio) variano fra i 21° circa di Norcia e i 25° circa di Terni (Perugia: 23,2°). Le piogge totali annue oscillano in media fra gli 800 e i 1200 mm, con valori crescenti al crescere dell'altitudine e sono concentrate per lo più nel semestre autunno-inverno sia per quantità sia per il numero di giorni, piovosi.

La superficie totale della regione è di 8456 km² di cui il 3,2% coltivato ad olivo, presente soprattutto nella fascia collinare compresa tra 170 e 500 m di altitudine. Le principali cultivars di olivo (Frantoio, Leccino, Moraiolo e Dolce Agogia) sono autoctone e costituiscono il 90% della popolazione di alberi presenti in tutta l'area. Queste sono caratterizzate da un sincronismo del periodo di fioritura, in particolare per quanto riguarda la piena fioritura (Pannelli *et al.* 2000).

Dati fenologici

In questo studio le informazioni relative alla fase di fioritura dell'olivo sono state determinate indirettamente attraverso il monitoraggio pollinico in atmosfera, ottenuto con l'ausilio di strumenti campionatori detti "volumetrici" (Orlandi *et al.* 2005b). I valori finali, derivanti dall'utilizzo di questo metodo, vengono espressi in numero di pollini per metro cubo d'aria al giorno (Fornaciari *et al.* 2000, 2001; Orlandi *et al.* 2006).

L'attività di campionamento pollinico è stata effettuata attraverso l'utilizzo di campionatori "volumetrici" di tipo Hirst (1952). Il modello utilizzato per questo studio è il VPPS 2000 Lanzoni, in funzione dal 1982 presso la Facoltà di Agraria dell'Università di Perugia (Latitudine: 43°05'N; Longitudine: 12°30'E; Altitudine: 400m s.l.m.), posizionato a 20 m di altezza dal suolo e in funzione 24 ore al giorno. Attualmente il metodo volumetrico è il più diffuso per studi riguardanti le particelle aerodisperse nell'atmosfera (Van Vliet *et al.* 2002). Lo strumento ha una forza aspirante di 10 litri al minuto, pari a 0,60 m³ d'aria ogni ora, attraverso una fenditura di 2x14 mm orientata sempre contro vento grazie ad un alettone che fa

girare l'apparecchio sul suo asse. Il volume di aria aspirato viene veicolato su un nastro trasparente Melinex 2000 ricoperto di materiale adesivo adatto alla cattura delle particelle aerodisperse. Al termine di ogni settimana di campionamento il nastro Melinex viene prelevato ed utilizzato per la preparazione dei vetrini ai fini dell'identificazione e conta dei pollini al microscopio ottico. Successivamente il dato numerico, attraverso opportune formule di conversione standardizzate viene trasformato in valori di concentrazioni medie giornaliere di polline per metro cubo d'aria. La determinazione degli andamenti giornalieri permette la definizione della cosiddetta curva di pollinazione, che non è altro che la riproduzione grafica dell'andamento della fioritura nell'arco del tempo (Fornaciari *et al.* 2002). Quindi, le concentrazioni polliniche giornaliere rappresentano una preziosa fonte di informazioni sulla fenologia della fioritura, perché registrano la risposta della popolazione di alberi che circondano la stazione di monitoraggio, piuttosto che la risposta dei singoli, come con le osservazioni fenologiche dirette (Osborne *et al.* 2000). Altro elemento importante è la capacità del metodo "volumetrico" di catturare pollini aerotrasportati a distanze notevoli ($\approx 15-20$ km secondo l'orografia dell'area di indagine) dal punto di rilascio.

Per determinare la relazione tra i parametri meteorologici e la fioritura dell'olivo è stato preventivamente calcolato il periodo medio di pollinazione (MPP) (Nilsson e Persson 1981). Sottraendo il 5% del polline totale alla parte iniziale e a quella finale della curva di pollinazione vengono individuate rispettivamente le date di inizio fioritura (SF) e quelle di fine fioritura (EF). Mentre, le date di massima fioritura (MF) corrispondono al giorno in cui si registra la massima concentrazione pollinica giornaliera. Queste date risultano maggiormente rappresentative della fenologia di una popolazione di alberi più ampia di quella locale e non risentono di potenziali effetti "oasi" determinati dalle condizioni ambientali di microclimi presenti nell'area di studio. Metodologie simili, per la determinazione della data di SF, sono state utilizzate in altri studi condotti su specie anemofile (Teranishi *et al.* 2000; Van Vliet *et al.* 2002, Piotrowska 2004; Emberlin *et al.* 2007).

Dati climatologici

La variabilità climatica della temperatura nel periodo di studio considerato (1982-2005) è stata valutata utilizzando le temperature medie giornaliere misurate nella stazione meteorologica distante circa 6 km dalla stazione di campionamento pollinico (Latitudine $43^{\circ}05'34''$ N; Longitudine $12^{\circ}30'16''$ E) e le temperature medie ottenute dalle uscite del modello a circolazione generale del Centro Europeo (ECMWF) (Simmons *et al.* 1989; Hortal e Simmons 1991). In particolare sono state utilizzate le reanalisi del Centro Europeo del database ERA 40 dal 1982 al 2001 (Uppala *et al.* 2005).

La risoluzione orizzontale del modello ECMWF è di circa 1° in longitudine e latitudine e non consente di apprezzare le variazioni microclimatiche locali, ovvero le scale spaziali dell'ordine di 10-50 km. Questo, se da una parte non consente l'applicabilità del metodo alle aree

più specifiche della regione, dall'altro consente di valutare la variabilità climatica della temperatura alla scala regionale e di evidenziare eventuali trend del parametro derivanti da forzanti a scale più ampie di quelle locali. Ricordiamo, in oltre, che il campionatore utilizzato per la raccolta dei dati di polline è in grado di catturare pollini aerotrasportati anche a distanze anche di 15-20 km dal punto di rilascio.

La possibilità di utilizzare un modello meteorologico a scala globale per questo tipo di studi è preliminare a valutazioni più specifiche che facciano uso di modelli ad area limitata con la tecnica del "downscaling dinamico".

Calcolo delle correlazioni tra dati fenologici e dati climatologici

Per valutare il rapporto fra una determinata manifestazione fenologica ed il clima vengono calcolate le correlazioni fra i valori dei parametri meteorologici misurati, e le date d'inizio della manifestazione fenologica (Jaagus e Ahas 2000; Ahas Aasa 2006; Emberlin *et al.* 2007). Sono stati correlati i valori di temperatura media dell'aria, calcolati a partire dai dati di temperatura media giornaliera, e le date di fioritura dell'olivo (SF e MF). I valori di temperatura media utilizzati sono stati calcolati facendo la media delle temperature medie giornaliere dal 1 gennaio fino al giorno di SF e di MF rispettivamente. La data del 1 gennaio è stata scelta per la ragione seguente. Per molte piante il raggiungimento di una certa fase fenologica è determinata dall'accumulo di gradi utili di temperatura (GDD Growing degree days), ovvero di gradi di temperatura al di sopra di una certa soglia (Richardson *et al.* 1974). In particolare, la pianta di olivo inizia ad accumulare GDD al di sopra della temperatura media giornaliera critica di 10°C (Mancuso 2000) e la data del 1 gennaio contiene tutti i giorni della fase di fioritura dell'olivo in cui si realizza una temperatura media giornaliera superiore a 10°C . D'altro canto, l'accumulo delle GDD si ha a partire dalla data in cui si realizza la fine della dormienza delle gemme. Questa data non è stata ancora determinata per Perugia, anche se alcuni risultati mostrano come questa avvenga dopo la fine del mese di Febbraio (Orlandi *et al.*, 2006). L'esatta determinazione della data di fine della dormienza delle gemme, attualmente in fase di indagine, consentirà in futuro di meglio definire i risultati delle correlazioni ottenute in questo lavoro.

Per approfondire ulteriormente i risultati della correlazione tra le date di fioritura e la temperatura media giornaliera del periodo 1 Gennaio-SF e 1 Gennaio-MF è stato calcolato l'andamento delle sommatorie termiche per diverse soglie di temperatura, da 2.0°C a 21°C , con spaziatura di 1°C .

Un altro indice preso in considerazione è l'anomalia standardizzata della temperatura media mensile per tutti gli anni di studio e per i 12 mesi dell'anno. L'anomalia standardizzata di temperatura mensile è data da:

$$SA_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{T_{ij} - \bar{T}_i}{\sigma_i}$$

Dove SA_i è l'anomalia standardizzate del mese i-esimo, \bar{T}_i è la temperatura media mensile per il mese i-esimo riferita al periodo di 20 anni, σ_i è la deviazione standard delle temperature medie mensili riferita ai 20 anni e per il mese i-esimo ed N è il numero totale di anni a disposizione. Quest'indice permette di evidenziare se vi sono stati dei mesi particolari dell'anno in cui è stata riscontrata una variazione più marcata della temperatura rispetto alla media.

Risultati

Analisi fenologica

Il monitoraggio pollinico ha messo in evidenza come il MPP dell'olivo, nell'area del centro Italia, si manifesta generalmente tra la III° decade di maggio e la I° del mese di luglio. Analizzando la media dei 24 anni di studio (1982-2005) il MPP è contenuto nel solo mese di giugno (4 giugno -19 giugno) per una durata media di 15 giorni (Fig. 2). E' da notare come la data di SF varia molto negli anni con una oscillazione massima di 28 giorni tra la data registrata nel 1984 (22-giugno) e quella nel 2001 (25-maggio). L'oscillazione è evidente anche per le date di MF con una differenza di 28 giorni tra il 1984 e il 2003, e tra le date di EF con una oscillazione massima di 30 giorni tra il 1984 e il 2003. I risultati del monitoraggio pollinico sono stati utilizzati per analizzare le tendenze negli anni delle date di comparsa della fioritura. Il grafico riportato in Fig. 2 evidenzia una tendenza verso l'anticipo della fioritura con i coefficienti angolari delle rette di regressione di -0,62 per le date di MF e -0,71 per quelle di EF. Conseguenza diretta della diversa intensità di avanzamento delle date di fioritura (SF, MF e EF) è una riduzione del MPP nei 24 anni di studio.

Correlazioni tra SF e MF con la temperatura dell'aria

Per evidenziare l'influenza dell'andamento termico sulla data di fioritura dell'olivo sono stati analizzati i dati meteorologici riferiti ai 24 anni (1982-2005) per i quali sono disponibili i dati di rilevamento pollinico e relativi alla stazione di Perugia ubicata a 6 km dallo strumento di monitoraggio pollinico. In dettaglio è stato calcolato il valore medio della temperatura media giornaliera del periodo che va dal 1-gennaio al giorno di SF e MF di ogni anno (Fig. 3). Dall'andamento si evidenzia un trend della temperatura positivo, con un coefficiente di correlazione $r=0,35$ ed un livello di significatività del test del 90%.

Di seguito discutiamo brevemente i risultati delle correlazioni tra le misure di polline e le misure di temperatura media giornaliera della stazione meteorologica di Perugia. Questi non vengono riportati esplicitamente per dare maggiore enfasi ai risultati ottenuti con il modello ECMWF. La correlazione tra le date di SF e la temperatura media giornaliera del periodo 1 Gennaio- SF di Perugia mostra come all'aumento della temperatura media negli anni corrisponda l'anticipo della pollinazione; le due grandezze sono anticorrelate e la significatività del test statistico per il coefficiente di correlazione è del 90%. In particolare la variazione potenziale della data di

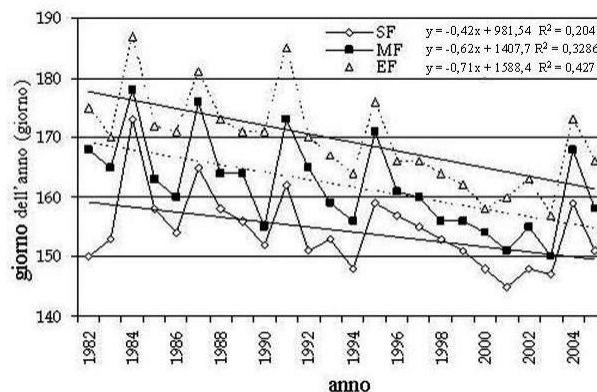


Fig. 2 – Grafico delle date di fioritura (SF, MF, EF) con le relative linee di tendenza. Legenda: SF (inizio fioritura), MF (massima fioritura), EF (fine fioritura).

Fig. 2 - Flowering dates (SF, MF, EF) and their linear trends as a function of the year. Legend: SF (start flowering), MF (max flowering), EF (end flowering).

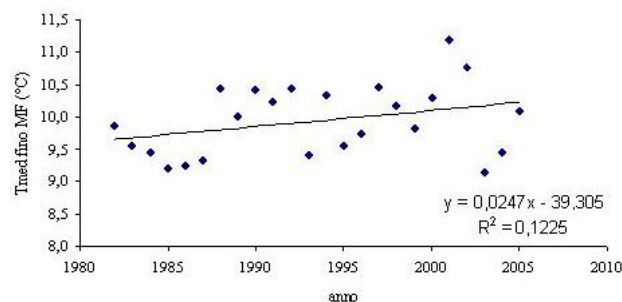


Fig. 3 - Trend della temperature media calcolata dal 1-gennaio fino alla data di MF (massima fioritura) dal 1982 al 2005.

Fig. 3 – Mean temperature trend from January 1 until the date of maximum flowering (MF) for the period 1982 – 2005.

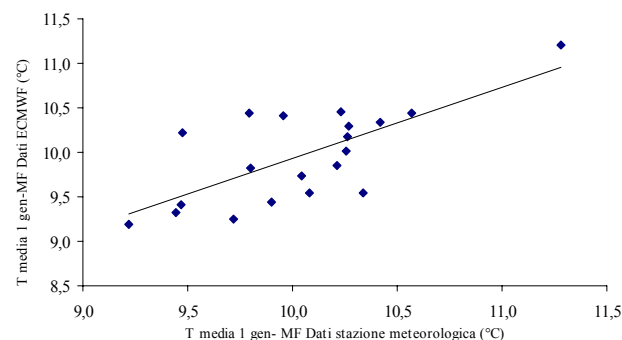


Fig. 4 - Confronto tra le temperature medie registrate nella stazione meteorologica di Perugia e quelle derivanti dal dataset ERA 40 nel periodo 1 gennaio – MF (massima fioritura) dal 1982 al 2001.

Fig. 4 – Comparison between the mean temperatures registered at the Perugia meteorological station and those derived from the ERA 40 dataset, from January 1 until the date of maximum flowering (MF) for the period 1982-2001.

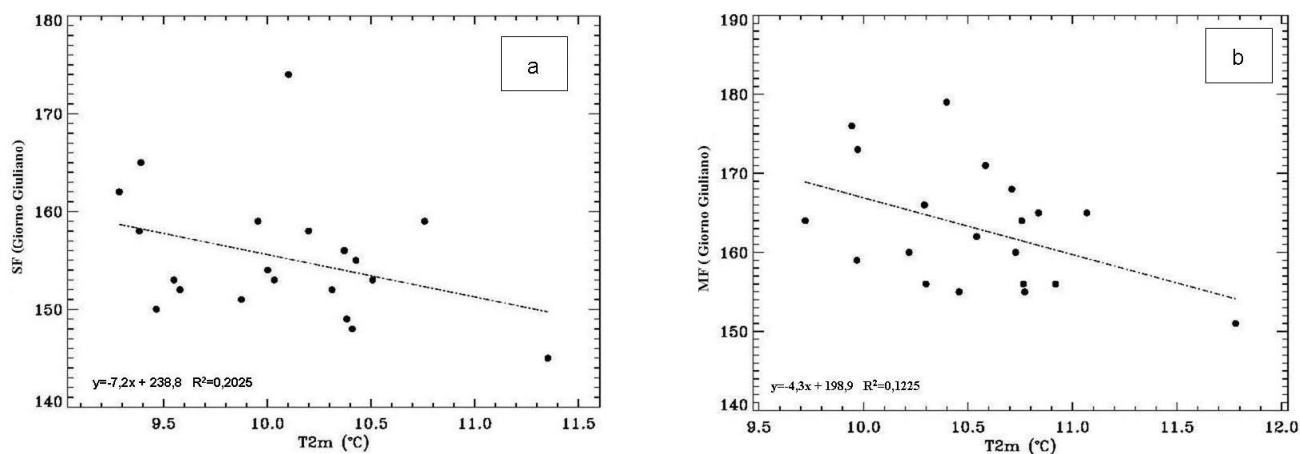


Fig. 5 - Correlazione tra la temperatura media del periodo 1 Gennaio-SF (in a) e MF (in b) (dati ECMWF) e le date di inizio fioritura (SF) in a e di massima fioritura (MF) in b.

Fig. 5 – Correlation between the mean temperature (ECMWF data) and the start date of flowering (SF) in a and the date of maximum flowering (MF) in b.

SF è di 4.3 giorni per ogni grado di temperatura media giornaliera a partire dal primo Gennaio.

La correlazione tra le date di MF e la temperatura media giornaliera del periodo 1 Gennaio-MF di Perugia mostra che ad una variazione di $\pm 1^\circ\text{C}$ della temperatura media dell'aria si ha una potenziale oscillazione della data di MF di ± 7.2 giorni. Anche tra la data di MF e la temperatura media giornaliera di Perugia dal 1° Gennaio alla data di MF si ha una anticorrelazione con una significatività del test statistico del 90%.

Per stabilire la capacità del modello ECMWF di ricostruire la variabilità climatica nella zona di interesse è stato dapprima fatto il confronto tra le uscite del modello a circolazione generale e le misure della stazione meteorologica (Fig. 4). Questa correlazione comprende il periodo che va dal 1982, anno in cui è iniziata la raccolta dei dati di polline nella stazione fenologica di Perugia, al 2001 incluso, ultimo anno completo di analisi ERA-40, per un totale di 20 anni. I dati ERA-40 hanno una frequenza temporale di 6 ore (06 UTC, 12 UTC, 18 UTC, 24 UTC). Questi sono stati interpolati bilinearmente (Press *et al.* 1996) in corrispondenza della stazione fenologica di Perugia per ricavare il valore medio di temperatura giornaliera.

La Fig. 4 mostra questo confronto tra le temperature medie calcolate fino al giorno di MF. L'accordo tra i due set di dati è notevole ed il test statistico per il coefficiente di correlazione ha una significatività del 99%. Inoltre, il coefficiente angolare della retta dei minimi quadrati è prossimo a 1. Questo risultato conferma come le reanalisi prodotte dal Centro Europeo del dataset ERA 40 siano utilizzabili per questo tipo di studi nell'area considerata e giustifica il loro utilizzo nel prosieguo del lavoro.

I risultati della correlazione tra le date di fioritura (SF, MF) e la temperatura media del periodo 1 Gennaio-SF e MF, ricavata dal dataset ERA-40, riportati nelle Figg. 5a e 5b, mostrano come all'aumento della temperatura media giornaliera negli anni corrisponda un anticipo della fioritura (correlazione negativa). La figura 5a mostra la correlazione tra la data di MF e la temperatura media giornaliera dell'aria. E' evidente una correlazione tra le

due variabili con la tendenza ad un anticipo della fioritura negli anni più caldi. In questo caso il test statistico per il coefficiente di correlazione ha un livello di significatività del 95% e l'anticipo della data di MF, per una variazione di 1°C di temperatura media giornaliera (calcolata dal 1° gennaio fino al giorno di MF) è di 7.2 giorni. Un risultato simile, anche se meno evidente, lo si ottiene per il giorno di SF (Fig. 5b). Anche in questo caso la correlazione è negativa ma la significatività del test statistico per il coefficiente di correlazione non supera il 90%. La variazione del giorno di SF è di 4.3 giorni al variare di 1°C della temperatura media dell'aria.

GDD and SA trends

Per la tendenza delle sommatorie termiche negli anni, calcolate tramite le GDD derivate dal dataset ERA-40 a partire dalle temperature medie giornaliere, non sono evidenti particolari andamenti se si escludono le soglie di 17°C e 18°C in cui il test statistico per il coefficiente di correlazione ha una significatività del 90% circa (Tab. 1). Per entrambe le soglie i coefficienti della retta di regressione sono positivi, ovvero le sommatorie termiche crescono negli anni per le soglie di 17° e 18°C . Tale risultato si accorda con quello ottenuto per le temperature medie giornaliere ed evidenzia i valori di temperatura media giornaliera che hanno avuto un ruolo importante nel determinare l'andamento complessivo della temperatura nella regione Umbria. Per entrambe le soglie si ha una tendenza positiva (0.3) della rispettiva sommatoria termica.

L'ultimo parametro preso in considerazione è l'anomalia standardizzata (SA) di temperatura media mensile derivata dal dataset ERA-40, per i 12 mesi all'anno, dal 1982 al 2001. In Tab. 2 sono riportati i valori del coefficiente angolare (a), del coefficiente di correlazione (r) e del test di significatività ($p(>r)$) per l'andamento nei 20 anni di SA per i vari mesi dell'anno. Dall'esame dei valori riportati emergono delle correlazioni significative dell'andamento di SA nei mesi di: Febbraio ($p(>r)=0.067$); Maggio ($p(>r)=0.09$) e Giugno ($p(>r)=0.013$). Per il mese di Agosto si ottiene una corre-

Tab. 1 - Trend delle GDD a diverse soglie di temperatura calcolate dal 1-gennaio fino alla data di massima fioritura (MF) per tutti gli anni di monitoraggio dal 1982 al 2001. Legenda: a (pendenza della retta). r (correlazione). p(>r) (test di significatività).

Tab. 1 – GDD trend at different temperature thresholds calculated from January 1 to the date of maximum flowering (MF) for all monitoring years (1982 - 2001). Legend: a (slope). r (correlation). p(>r) (probability).

	a	r	p(>r)
2°C	-0.2	-0.17	0.46
3°C	0.0	-0.02	0.92
4°C	0.1	0.09	0.71
5°C	0.0	-0.01	0.97
6°C	0.2	0.13	0.58
7°C	0.3	0.16	0.50
8°C	0.3	0.16	0.48
9°C	0.2	0.12	0.61
10°C	0.0	-0.03	0.89
11°C	-0.1	-0.06	0.79
12°C	-0.1	-0.08	0.74
13°C	0.1	0.07	0.76
14°C	0.1	0.10	0.68
15°C	0.2	0.22	0.35
16°C	0.2	0.20	0.41
17°C	0.3	0.37	0.11
18°C	0.3	0.38	0.09
19°C	0.1	0.14	0.55
20°C	-0.1	-0.15	0.54
21°C	-0.1	-0.31	0.19

Tab. 2 - Trend degli indici di anomalia standardizzata (SA) calcolati dal 1982 al 2001.

Tab. 2 - Standardized anomaly (SA) trend calculated for the period 1982 – 2001.

	a	r	p(>r)
Gen	0.03	0.20	0.41
Feb	0.07	0.42	0.06
Mar	0.05	0.29	0.21
Apr	0.02	0.13	0.58
Mag	0.07	0.39	0.09
Giu	0.09	0.54	0.01
Lug	-0.01	-0.08	0.74
Ago	0.09	0.52	0.02
Set	-0.04	-0.26	0.26
Ott	-0.04	0.23	0.32
Nov	0.02	0.12	0.62
Dic	-0.03	-0.17	0.47

lazione significativa ($p(>r)=0.02$) ma questo mese non è di interesse per quanto riguarda il periodo di fioritura dell'olivo. Il mese di Giugno ha un ruolo molto importante per la fioritura dell'olivo ed il test statistico per il coefficiente di correlazione supera il 95% di livello di significatività, tuttavia va sottolineato come questo mese non sia interamente compreso nel periodo di fioritura dell'olivo. E' interessante notare come per tutti i mesi in

cui si registra un alto livello di significatività del test statistico ($p(>r)<0.1$), la tendenza di SA è a crescere come confermato dai valori del coefficiente angolare della retta di regressione. Questa tendenza alla crescita della temperatura per i mesi di Maggio e Giugno ben si inquadra con i risultati ottenuti per le sommatorie termiche che mostrano gli incrementi maggiori alle soglie di 17°C e 18°C, soglie termiche tipiche dei mesi di Maggio e Giugno.

Discussione e conclusioni

In molte attività di ricerca, le analisi delle fasi fenologiche di specie vegetali vengono usate come indicatori capaci di fornire informazioni agli studi interessati al cambiamento del clima. Nel nostro caso è stata utilizzata la fioritura dell'olivo come strumento per valutare la risposta della biosfera alle attuali tendenze climatiche nel centro Italia. Un risultato importante ha riguardato la reale indipendenza del ciclo biologico dell'olivo dal fotoperiodo. Infatti, in base al consistente intervallo calcolato tra le date di fioritura (28 giorni tra le date di MF e 30 giorni tra quelle di EF) si deduce che la specie *Olea europaea* L. è insensibile al fotoperiodo. Questa caratteristica svincola la risposta fenologica dell'olivo dalla lunghezza del giorno o comunque ne determina una maggiore dipendenza dall'andamento della temperatura. In realtà altri fattori influenzano la velocità di sviluppo delle piante e di conseguenza la comparsa temporale delle diverse fasi fenologiche. Tuttavia, i risultati di molte ricerche indicano che la temperatura può spiegare gran parte del comportamento relativo alle diverse fasi fenologiche in molte specie vegetali (Menzel 2001; Jaagus e Ahas 2000; Zhao e Schwartz 2003; Emberlin *et al.* 2007). Anche i risultati di questo studio dimostrano che la tendenza al riscaldamento della temperatura dell'aria, influenza le date di fioritura dell'olivo. Come mostrato nel lavoro, ad una variazione di $\pm 1^\circ\text{C}$ della temperatura media giornaliera dell'aria, nel periodo precedente la fioritura, si ha un'oscillazione della data di MF di $\pm 7,2$ giorni. Un risultato simile con un avanzamento di 8.5 giorni per $^\circ\text{C}$ della data di massima fioritura dell'olivo, nell'area del mediterraneo, è stato ottenuto da Osborne nel 2000. Per la data di SF la variazione è di ± 4.3 giorni per variazioni di $\pm 1^\circ\text{C}$ di temperatura media giornaliera a partire dal 1 Gennaio (Fig. 5b). L'oscillazione della fioritura, per quanto irregolare, per entrambi le fasi è notevole. L'ipotesi di riscaldamento è stata confermata dal calcolo delle GDD a diverse soglie di temperatura media, nel periodo precedente le date di fioritura (SF e MF), evidenziando che l'incremento di temperatura ha interessato, maggiormente, le soglie dei 17 e dei 18°C. Queste soglie sono tipiche dei mesi di Maggio e di Giugno. Una ulteriore interpretazione dei segnali di riscaldamento climatico è data dagli indici di anomalia standardizzata. I risultati evidenziano che i mesi che presentano un trend crescente della temperatura media dell'aria durante questo periodo di studio sono: Febbraio, Maggio, Giugno e Agosto. Di questi solo i primi tre sono compresi nel periodo di tempo precedente la fioritura dell'olivo nel centro Italia.

In conclusione possiamo affermare che la temperatura dell'aria influenza in maniera decisa la data di fioritura dell'olivo; inoltre, il principale contributo all' avanzamento della fioritura, registrato in questi anni, è dovuto all'incremento di temperatura media nei mesi di febbraio, maggio e giugno.

È importante sottolineare, inoltre, come la possibilità di utilizzare un modello meteorologico a grande scala come quello ECMWF apra la strada ad ulteriori indagini quali: a) ricostruzioni microclimatiche con l'utilizzo di modelli ad area limitata innestati nel modello a circolazione generale; b) trasporto dell'informazione in aree in cui non siano presenti misure dirette dei parametri meteorologici; c) estensione dell'analisi ad altri parametri meteorologici per la formulazione di modelli fenologici più complessi.

I risultati potranno essere utilizzati come strumento per stabilire le potenziali risposte della biosfera terrestre alla variabilità climatica nell'area del centro Italia.

Bibliografia

- Ahas R, Aasa A (2006) The effects of climate change on the phenology of selected Estonian plant, bird and fish populations. *International Journal of Biometeorology* 51: 17-26.
- Beaubien E G, Freeland H J (2000) Spring phenology trends in Alberta, Canada: Links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology* 44: 53-59.
- Chmielewski F M, Rötzer T (2002) Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Research* 19: 257-264.
- Chuine I, Cour P, Rousseau DD (1998) Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing. *Plant, Cell and Environment* 21: 455-466.
- Donnelly A, Salamin N, Jones M B (2006) Changes in tree phenology: An indicator of spring warming in Ireland?. *Biology and Environment: Proceedings of The Royal Irish Academy, Vol. 00, N° 00: 1-8.*
- Emberlin J, Smith M, Close R, Adams-Groom B (2007) Changes in the pollen season of the early flowering trees *Alnus* spp. and *Corylus* spp. in Worcester, United Kingdom, 1996-2005. *International Journal of Biometeorology* 51: 181-191.
- Fornaciari M, Orlandi F, Romano B (2000) Phenological and aeropalynological survey in an olive orchard in Umbria (Central Italy). *Grana* (0017-3134), 39: 246-251.
- Fornaciari M, Orlandi F, Romano B (2001) Threshold concentration of olive pollen grain. *Allergo Journal* (0941-8849), 10: 80-81.
- Fornaciari M, Pieroni L, Orlandi F, Romano B (2002) A new approach to consider the pollen variable in forecasting yield models. *Economic Botany* 56 (1): 66-72.
- Hackett WP, Hartmann HT (1964) Inflorescence formation in olive as influenced by low temperature, photoperiod, and leaf area. *Botanical Gazette* 125: 65-72.
- Higgins S I, Richardson M (1999) Predicting plant migration rates in a changing world: the role of long-distance dispersal. *The American naturalist* 153: 464-475.
- Hortal M., Simmons AJ (1991) Use of reduced Gaussian grids in spectral models. *Mon. Wea. Rev.* 119: 1057-1074.
- Hirst J M (1952) An automatic volumetric spore-trap. *Annals of Applied Biology* 39: 257-265.
- Jaagus J, Ahas R (2000) Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *Climate Research* 15: 207-219.
- Mancuso S (2000) Electrical resistance changes during exposure to low temperature measure chilling and freezing tolerance in olive tree (*Olea europaea* L.) plants. *Plant, Cell and Environment* 23: 291-299.
- Menzel A, Estrella N, Fabian P (2001) Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7: 657-666.
- Neilson P R, Pitelka L F, Solomon A M, Nathan R, Midgley G F, Fragoso J M V, Lischke H, Thompson K (2005) Forecasting Regional to global plant migration in response to climate change. *BioScience* 55, 9: 749-759.
- Nilsson S, Persson S (1981) Three pollen spectra in the Stockholm region (Sweden), 1973-1980. *Grana* 20: 179-182.
- Orlandi F, Romano B, Fornaciari M (2005a) Relationship between flowering and heat units to analyze crop efficiency of olive cultivars located in southern Italy. *Hortscience* (0018-5345), 1, 40: 64-68.
- Orlandi F, Vazquez Ezquerro L, Ruga L, Bonofiglio T, Fornaciari M, Garcia Mozo H, Dominquez E, Romano B, Galan C (2005b) Bioclimatic requirements for olive flowering in two mediterranean regions located at the same latitude (Andalucia, Spain and Sicily, Italy). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* (1232-1966), 12: 47-52.
- Orlandi F, Lanari D, Romano B, Fornaciari M (2006) A new model to predict the timing in olive flowering: a case study in Central Italy. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* (0114-0671), (1) 34: 93-99.
- Osborne CP, Chuine I, Viner D, Woodward FI (2000) Olive phenology as a sensitive indicator of future climatic warming in the Mediterranean. *Plant, Cell and Environment* 23: 701-710.
- Pannelli G., Alfei B, D'Ambrosio A, Rosati S, Famiani F (2000) Varietà di Olivo in Umbria. Editrice Pliniana, Perugia.
- Peñuelas J, Filella I (2001) Phenology: Response to a warming world. *Science* 294: 793-795.
- Peñuelas J, Filella I, Comas P (2002) Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the mediterranean region. *Global Change Biology* 8: 531-544.
- Piotrowska K, (2004) Comparison of *Alnus* and *Betula* pollen counts in Lublin (Poland) and Skien (Norway). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 11: 205-208.
- Press WK, Flannery BP, Teukolsky SA, Vetterling TA (1996) Numerical recipes in FORTRAN 77. Cambridge University Press, 992 pp.
- Richardson EA, Seeley SD, Walker DR (1974) A model for estimating the completion of rest for "Redhaven" and "Elberta" peach trees. *Hort Science* 9: 331-332.
- Schwartz MD, Reiter BE (2000) Changes in North American spring. *International Journal of Climatology* 20 (8): 929-932.
- Schwartz M D, Chen X (2002) Examining the onset of spring in China. *Climate Research* 21: 157-164.
- Simmons AJ, Burridge DM, Jarraud M, Girard C, and Wergen W. (1989) The ECMWF medium-range prediction models: development of the numerical formulations and the impact of increased resolution. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 40: 28-60.
- Sparks T H, Jeffre E P, Jeffre C E. (2000) An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology* 44: 82-87.
- Teranishi H, Kenda Y, Katoh T, Kasuya M, Oura E, Taira H (2000) Possible role of climate change in the pollen scatter of Japanese cedar *Cryptomeria japonica* in Japan. *Climate Research* 14: 65-70.
- Uppala SM., P.W. Källberg, A.J. Simmons, U. Andrae, V. da Costa Bechtold, M. Fiorino, J.K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G.A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R.P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M.A. Balmaseda, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hôlm, B.J. Hoskins, L. Isaksen, P.A.E.M. Janssen, R. Jenne, A.P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N.A. Rayner, R.W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K.E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo and J. Woollen (2005) The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131: 2961-3012.
- Van Vliet A J H, Overeem A, De Groot R S, Jacobs A F G, Spijkema F T M (2002) the influence of temperature and climate change on the timing of pollen release in the Netherlands. *International Journal of Climatology* 22: 1757-1767.
- Zhao T, Schwartz M D (2003) Examining the onset of spring in Wisconsin. *Climate Research* 24: 59-70.