

Sezione Speciale - Cambiamento climatico e inquinamento: effetti sulle foreste meridionali

(Guest Editor: Elena Paoletti)

Una nuova area sperimentale di lungo termine, per lo studio degli effetti dell'incremento della temperatura e del periodo di aridità in formazioni di sclerofille mediterranee

De Angelis P* ⁽¹⁾, de Dato G ⁽¹⁾, Spano D ⁽²⁾, Duce P ⁽³⁾, Sirca C ⁽²⁾, Asunis C ⁽²⁾, Pellizzaro G ⁽³⁾, Cesaraccio C ⁽³⁾, Sechi S ⁽²⁾, Scarascia Mugnozza G ⁽¹⁾

(1) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse (DISAFRI) - Università degli Studi della Tuscia – Via S. Camillo de Lellis, snc, 01100 Viterbo; (2) Dipartimento di Economia e Sistemi Arborei (DESA)- Università degli Studi di Sassari - Via Enrico De Nicola, 1, 07100 Sassari; (3) Istituto di Biometeorologia (IBIMET) Sezione Monitoraggio Agroecosistemi - Consiglio Nazionale delle Ricerche - Via Funtana di lu Colbu, 4/A, 07100, Sassari. - * Corresponding author: Paolo De Angelis, pda@unitus.it

Abstract: A new long-term experimental area for studying the effects of climate warming and seasonal drought on a Mediterranean shrubland community. Global changes, such as land use changes, altered atmosphere composition, and climate changes, have been altering the functioning of ecosystems with possible impacts on the degree of biodiversity. Temperature and water availability are the two main determinants of the functional processes of terrestrial ecosystems. Climatic changes could have strong effects on vulnerable ecosystems as Mediterranean shrublands/garrigue/maquis, where the growth and survival of the plants are strictly dependent on the drought and to the high summer temperature. Furthermore, other pressures, such as grazing and wildfires, occur frequently in the Mediterranean area. In order to assess the impacts of the temperature increase and precipitation reduction on Mediterranean shrublands, a new experimental area was established in Sardinia at the Porto Conte forest, Alghero (SS). A system of automatic roofs covers 6 experimental plots (20 m²), in order to simulate an increase of temperature during the night (3 plots) or to intercept the precipitations during a 2-3 months period (3 plots). Three additional plots are used as control. All the observations were conducted in other five European shrubland ecosystems, according to common protocols developed in the context of the European project VULCAN (www.vulcanproject.com). The studies of the different ecological and physiological processes are organised in working packages (Plant, Soil, Fauna, Water) and integrated in a risk assessments evaluation. The aim of this paper is to analyse the first two years of data, to demonstrate the microclimatic modifications induced by the experimental system.

Keywords: mediterranean macchia, garigue, climate change, desertification.

Received: Jan 07, 2005 - Accepted: Feb 15, 2005

Citation: De Angelis P, de Dato G, Spano D, Duce P, Sirca C, Asunis C, Pellizzaro G, Cesaraccio C, Sechi S, Scarascia Mugnozza G, 2005. Una nuova area sperimentale di lungo termine, per lo studio degli effetti dell'incremento della temperatura e del periodo di aridità in formazioni di sclerofille mediterranee. *Forest@* 2 (1): 37-51. [online] URL: <http://www.sisef.it/>

Introduzione

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) riporta nel suo ultimo rapporto (Folland et al. 2001) un incremento a scala planetaria della temperatura media annua di $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ a partire

dalla fine del XIX secolo, con un aumento delle temperature minime (notturne) verificatosi ad un tasso doppio rispetto a quello dell'incremento delle temperature massime (diurne) (0.2°C contro 0.1°C per decade) con conseguente diminuzione

dell'escursione termica giornaliera. In Europa l'incremento medio di temperatura è stato di 0.8°C, verificatosi soprattutto nei mesi invernali e nelle regioni della Spagna e della Russia nord-occidentale. Diminuzioni dell'escursione termica giornaliera sono state registrate in tutto il continente, benché non in tutte le aree (Metaxas et al. 1991, Cubasch et al. 1995, Cubasch et al. 1996, Easterling et al. 1997, Piñol et al. 1998, Quereda Sala et al. 2000, Begni et al. 2001, Kundzewicz et al. 2001). Meno evidente è il segnale circa la variazione positiva o negativa della quantità di precipitazione, altamente variabile da zona a zona del pianeta. In Europa si è verificato un aumento delle precipitazioni al nord del 10-40%, mentre alcune aree meridionali del continente hanno ricevuto quantità di precipitazioni inferiori anche del 20%, con notevoli variazioni nella distribuzione e nell'intensità (Repapis 1986, Cubasch et al. 1995, Cubasch et al. 1996, Esteban-Parra et al. 1998, Groisman et al. 1999, Wetherland & Manabe 1999, Begni et al. 2001, De Luis et al. 2001, Folland et al. 2001).

I dati di previsione sui cambiamenti climatici nel Mediterraneo provengono da un processo di *downscaling* dei risultati ottenuti con modelli generali di previsione (GCM *General Circulation Model*), che lavorano su scale dell'ordine di 200-600 km in latitudine e longitudine. Il bacino del Mediterraneo, con la sua elevata eterogeneità, rischia quindi di non essere ben rappresentato da questi modelli a grande scala. I modelli regionali (RCM *Regional Circulation Model*), che invece danno risultati anche a scala dell'ordine di 30-50 km, hanno numerose limitazioni, primo fra tutti il fatto che dipendono fortemente dalle condizioni al contorno scelte ed estratte dal GCM e il fatto che maggiore è la richiesta di supporto informatico rispetto ai GCM. Tutti i modelli mostrano un riscaldamento per l'Europa variabile con "zone rosse" localizzate nell'area meridionale (Spagna, Italia e Grecia), nel nord-est (Finlandia, Russia occidentale) e lungo la costa atlantica. Secondo i modelli, la temperatura media annua dell'Europa aumenterà nei prossimi cento anni ad un tasso di 0.1-0.4°C per decade. I mesi invernali mostrano la minore variazione dei risultati tra i differenti modelli usati, soprattutto per l'Europa meridionale, mentre meno uniformi sono i risultati forniti per l'estate. Nei mesi invernali la previsione è di un riscaldamento massimo nelle regioni interne del continente (0.15-0.6°C per decade), mentre l'estate mostra un chiaro gradiente nord-sud (0.08-0.3°C e 0.2-0.6°C per decade rispettivamente). Gli

inverni classificati come freddi potranno essere sempre meno frequenti, mentre all'opposto il numero di estati calde potrebbe sensibilmente aumentare (Kundzewicz et al. 2001). La previsione per la variazione delle precipitazioni è di un incremento nel nord Europa (+1-2% per decade) opposto ad un piccolo decremento nel meridione (-1% per decade) e piccole variazioni positive o negative nell'Europa centrale. Secondo i modelli, la maggior parte dell'Europa assisterà ad un aumento delle precipitazioni invernali tra +1 e +4% per decade. In estate invece ci sarà un forte decremento nell'Europa mediterranea (-5% per decade) opposto ad un incremento nel nord (+2% per decade). I differenti modelli sono spesso discordanti circa l'entità della variazione delle precipitazioni, e tali differenze sono più grandi per l'Europa meridionale e settentrionale che per quella centrale (Kundzewicz et al. 2001). Le precipitazioni intense sono previste in aumento dai modelli, soprattutto in inverno, mentre in estate saranno più frequenti gli eventi siccitosi, soprattutto nell'Europa centrale e meridionale (Kundzewicz et al. 2001).

L'area del Mediterraneo, essendo caratterizzata da un clima di transizione tra il clima temperato delle medie latitudini e il clima tropicale secco, potrebbe essere altamente sensibile ai cambiamenti climatici (Cubasch et al. 1996). La tendenza ad un clima più arido potrebbe essere il fattore che, in un'area già fortemente limitata dalla disponibilità idrica, giocherà il ruolo principale nel regolare i processi fisiologici ed ecologici. Il processo fotosintetico, limitato non solo dalle elevate temperature estive ma anche da quelle basse invernali, potrebbe giovare di un clima invernale più caldo e di un'atmosfera più ricca di CO₂ perché in inverno vi è una migliore disponibilità idrica. Osborne et al. (2000), infatti, sostengono che incrementi di biomassa e LAI (Leaf Area Index) sono stati possibili per gli arbusteti mediterranei negli ultimi 100 anni solo in assenza di estreme condizioni di aridità. D'altro canto, gli ecosistemi aridi e semi-aridi mostrano una forte relazione lineare tra la produzione primaria netta e le precipitazioni annue (Allen-Diaz et al. 1996). Pertanto, il decremento delle precipitazioni potrebbe avere impatti negativi. L'allungamento della stagione vegetativa indotto dall'incremento della temperatura (Osborne et al. 2000, Menzel et al. 2001, Peñuelas & Filella 2001, Peñuelas et al. 2002) potrebbe non apportare i benefici sulla crescita che invece sono stati registrati in ecosistemi temperati ed artici (Rustad et al. 2001). A livello del suolo, i

processi di decomposizione, di mineralizzazione e di respirazione sono ugualmente legati alla temperatura e al contenuto idrico del suolo (Hanson et al. 1993, Kirschbaum 1995, Cortez 1997, Leiròs et al. 1999, Jamieson et al. 1999, Xu & Qi 2001, Rey et al. 2002). Condizioni più aride e calde potrebbero rallentare questi processi, e quindi il ciclo dei nutrienti. Nell'area mediterranea, caratterizzata dalla povertà di nutrienti, la conseguenza di una tale modificazione potrebbe essere quella di una stasi di molti dei processi dell'ecosistema. Molto importanti saranno le risposte specifiche delle piante (Llorens et al. 2003), che potranno indurre alterazioni della struttura e della composizione specifica delle comunità mediterranee e spostare gli equilibri esistenti tra vegetazione e ambiente fisico. L'alterazione della frequenza degli incendi (Piñol et al. 1998, Cramer 2001, De Luis et al. 2001, Mouillot et al. 2002) può accentuare tali modificazioni strutturali delle comunità mediterranee, con esiti non facilmente prevedibili. Per quanto detto sopra, in ambiente mediterraneo molti ecosistemi sono a rischio desertificazione (UNCCD 1994), con conseguente perdita di produttività primaria, di habitat e di specie, di suolo e di nutrienti (Shaw et al. 2000, De Luis et al. 2001, Lal 2001, Rasmussen et al. 2001).

Nell'ambito del progetto di ricerca europeo "VULCAN" (Vulnerability Assessment of Shrubland Ecosystem in Europe under Climate Change) una nuova metodologia di manipolazione climatica viene utilizzata in sei differenti siti in Europa (Danimarca, Olanda, Galles, Spagna, Italia, Ungheria), per studiare la risposta di ecosistemi arbustivi all'incremento delle temperature minime giornaliere e alla riduzione delle precipitazioni. Tali sistemi sono costituiti da teli retraibili che coprendo la vegetazione durante le ore notturne, riflettono parte della radiazione termica riemessa dal suolo e dalla vegetazione. Analogamente, teli impermeabili coprono la vegetazione durante gli eventi piovosi per ridurre l'apporto idrico nel periodo definito dal protocollo sperimentale. Con questa tecnica è stato quindi possibile evitare gli effetti secondari legati all'uso di sistemi di input termico diretto (radiazione IR, resistenze elettriche, altro).

Le attività di studio condotte nel sito italiano di Porto Conte (SS) hanno riguardato l'analisi delle modificazioni indotte con la manipolazione climatica su:

- i processi legati allo sviluppo della vegetazione

(crescita a livello di individui e di comunità, successione delle fasi fenologiche, produzione e qualità della lettiera, crescita radicale, allocazione dei nutrienti);

- i processi legati all'attività biologica del suolo (respirazione, decomposizione della lettiera, mineralizzazione dell'azoto);
- i processi legati al bilancio idrologico (stato idrico delle piante e del suolo, qualità della soluzione circolante del suolo).

Gli obiettivi di lungo termine prevedono la determinazione del livello di rischio degli ecosistemi arbustivi e la costruzione di scenari di vulnerabilità ai cambiamenti climatici considerando la perdita di biodiversità, la funzionalità degli ecosistemi e i fattori di pressione socio-economici, al fine di individuare possibili azioni di gestione che possano controbilanciare gli effetti negativi indotti dai cambiamenti climatici.

Materiale e metodi

Il sito sperimentale

Lo studio è stato condotto all'interno della riserva naturale *Porto Conte Le Prigionette*, situata nella penisola di Capo Caccia (40°36' N, 8°9' E) nella Sardegna nord-occidentale. La penisola, che costituisce il lato occidentale del golfo di Porto Conte, presenta un rilievo centrale (Monte Timidone, 361 m di quota), alte e scoscese scogliere a nord e declivi più morbidi sul lato interno del golfo. La penisola di Capo Caccia rappresenta il confine meridionale della piana della Nurra, estesa per 830 km² tra le città di Alghero, Porto Torres e Sassari. La riserva florofaunistica è stata istituita nel 1978 e, fino al maggio del 1998, è stata gestita dall'Ispettorato Ripartimentale delle Foreste; attualmente è amministrata dall'Azienda Foreste Demaniali della Regione Sardegna. Negli anni settanta un'intensa opera di forestazione fu eseguita nell'area con specie adatte al clima caldo arido, quindi *Pinus pinea* L., *P. halepensis* Mill., *Cupressus sempervirens* L. e *Eucalyptus* spp. Il terreno fu sottoposto a rippatura e lavorazione andante prima della messa a dimora dei semi. Fasce prive di vegetazione lungo le linee di massima pendenza, di larghezza pari a circa 100 metri, furono lasciate scoperte e tenute pulite con funzione tagliafuoco. La sperimentazione in atto è stata condotta all'interno di una di queste fasce. La sua manutenzione è stata realizzata tramite fuoco controllato fino al 1990 e poi

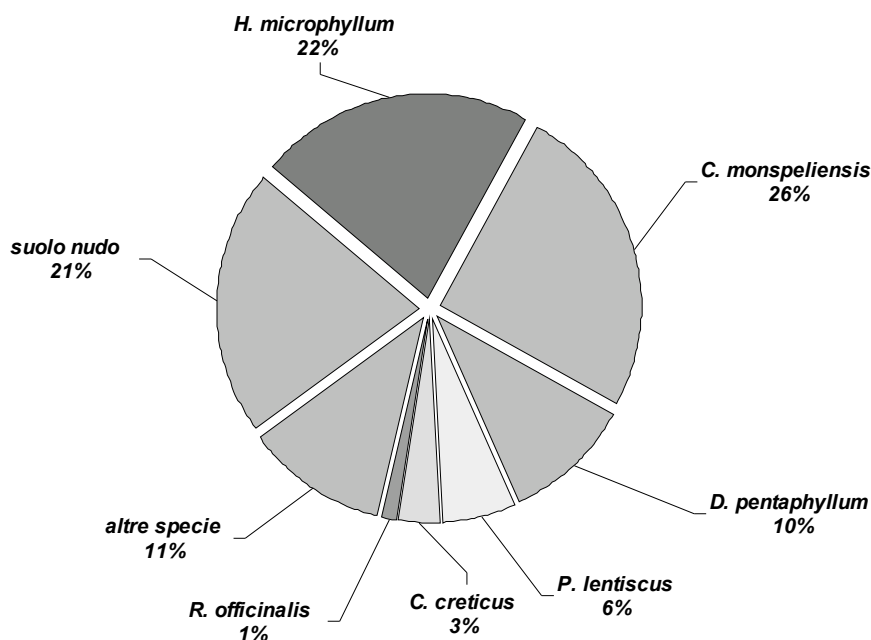


Fig. 1 - Grado di copertura del suolo specifico pre-trattamento (giugno 2001), stimato con la tecnica del "pin-point" su 36 transetti all'interno dei 9 plots sperimentali.

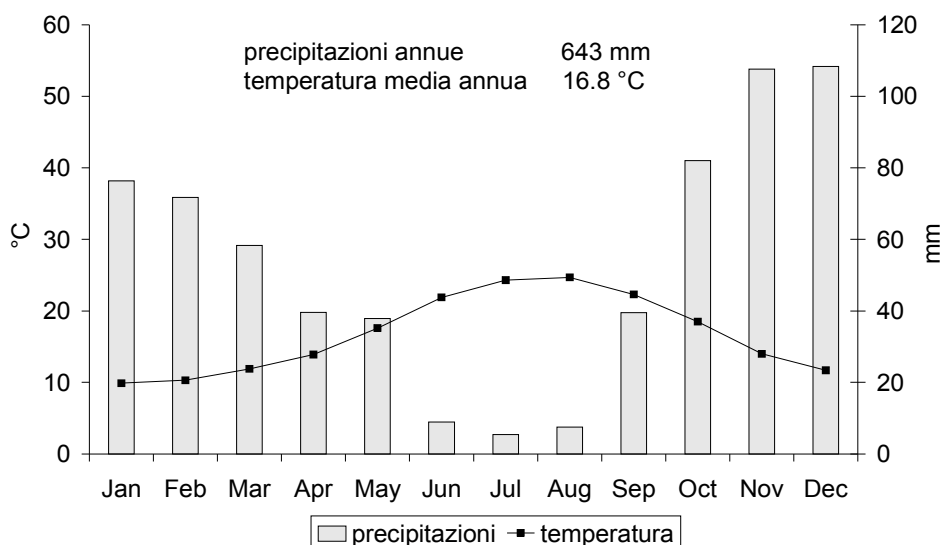
con mezzi meccanici nel 1991 e 1992, mentre dal 1993 nessun altro intervento è stato eseguito e la vegetazione spontanea ha potuto ricolonizzare il terreno. Attualmente l'area è occupata da una gariga (altezza massima circa 1 metro) composta in prevalenza da *Cistus monspeliensis* e *Helichrysum microphyllum* con presenza di individui di *Dorycnium pentaphyllum*, *Rosmarinus officinalis* e *Pistacia lentiscus*.

L'analisi del grado di copertura specifico relativo all'anno 2001 (pre-trattamento), per l'insieme delle nove parcelle, ha mostrato una netta predominanza delle specie arbustive (71% del totale). Il maggior contributo alla copertura è derivato dalle tre specie dominanti *H. microphyllum*, *C. monspeliensis* e *D.*

pentaphyllum con il 57 % della copertura totale (fig. 1). Altre specie arbustive, come *Pistacia lentiscus*, *C. creticus*, *Daphne gnidium*, *Teucrium spp.*, *Chamaerops humilis*, *Phillyrea angustifolia* e *Rosmarinus officinalis* rappresentavano circa il 14%. Erano inoltre presenti diverse specie erbacee, in prevalenza *Carlina spp.*, *Brachipodium spp.* e *Ammoides spp.*, che costituivano complessivamente circa l'8%. Il suolo nudo copriva circa il 21% della superficie totale.

Il substrato geologico è costituito da una massa calcarea mesozoica, dove è possibile riconoscere calcari compatti chiari, brecciole calcaree e calcari ad ippuriti del Giurassico superiore-Cretaceo. Gli strati rocciosi si presentano quasi orizzontali; fenomeni

Fig. 2 - Diagramma termopluvimetrico della stazione di Fertilia (periodo di osservazione 1960-1990), situata a circa 10 km di distanza dal sito sperimentale.



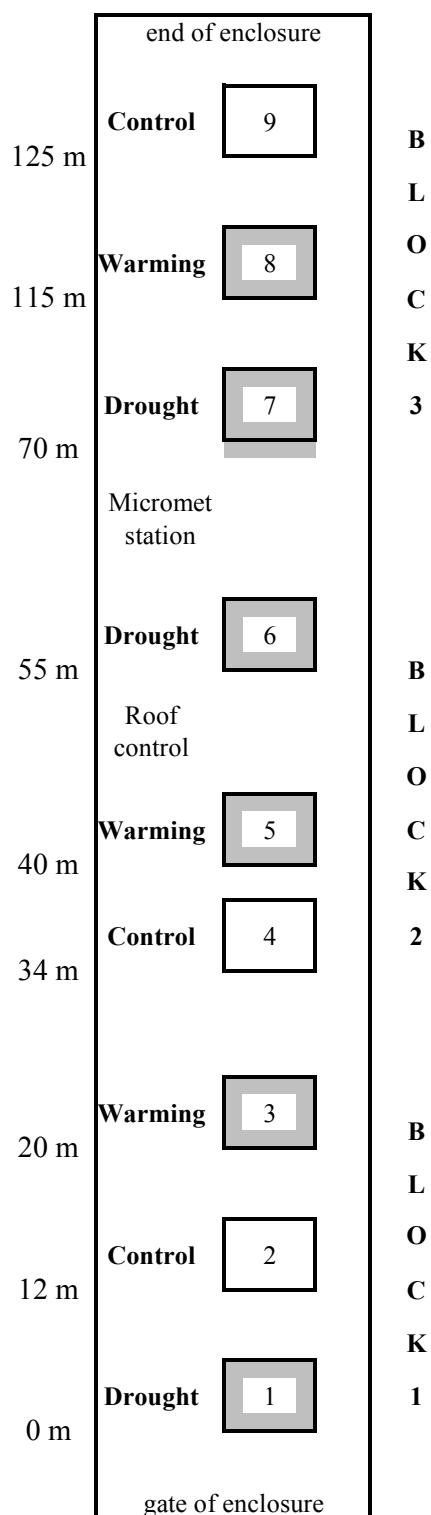


Fig. 3 - Distribuzione dei nove plot per la manipolazione climatica, all'interno di una fascia tagliafuoco abbandonata da 10 anni.

carsici di varia estensione e profondità si segnalano sia nel promontorio che nel Monte Timidone. I *plot* sono localizzati in un'area di transizione tra due tipi

di substrato geologico: la parte più a monte è costituita dai calcari selciferi e le dolomie del giurassico, mentre la zona pianeggiante da depositi alluvionali recenti ed attuali dell'Olocene (Corrias et al. 1983). Dal punto di vista pedologico prevalgono Luvisuoli cromici e Leptosuoli (FAO-UNESCO 1999). Ne risultano suoli poco profondi, a tessitura argillosa, presenti soprattutto nelle fratture o avvallamenti del substrato calcareo originario, definiti anche come tasche di Terra rossa (classificazione USDA, Lithic Xerorthent e Typic Rhodoxeralfs), poco profonde, di estensione limitata e di natura argillosa, adatte all'insediamento della vegetazione (Valsecchi 1976, Pietracaprina 1989). Il suolo all'interno della fascia è stato classificato, dopo l'apertura di un apposito profilo, come Lithic Xerotent (US Soil Survey 1997), con elevata pietrosità e rocciosità superficiale, di tipo franco sabbioso, poco profondo e poco evoluto, con profilo ABC, tendenzialmente neutro-basifilo.

Per quanto riguarda l'inquadramento climatico del sito sperimentale (fig. 2), si è fatto riferimento ai dati della stazione di Fertilia aeroporto, situata a pochi chilometri dal sito sperimentale (N 40°38' E 8°17'; altitudine 40 m slm; distanza dal mare 4273 m). Le precipitazioni si concentrano nel periodo autunno-invernale e sono nulle o quasi nel periodo estivo con conseguente deficit idrico secondo l'indice di Bagnouls e Gausson. La media delle minime del mese più freddo è 7 °C, la media delle massime del mese più caldo è 28 °C. Il mese più caldo è agosto (24.7 °C), il mese più freddo gennaio (9.9 °C). Il regime dei venti presenta una prevalenza del quadrante NO e NE. Secondo Biondi et al. (2001), in base al calcolo degli indici fitoclimatici proposti da Rivas-Martinez è possibile attribuire l'area di studio al termotipo termomediterraneo superiore e all'ombrotipo subumido inferiore.

Il disegno sperimentale

Lungo una fascia tagliafuoco (125 x 10 m circa, pendenza 10% circa; N 40°37' E 8°10') sono stati individuati 3 blocchi adiacenti, al cui interno sono stati definiti tre *plot* di 6 x 4 m (fig. 3), assegnati a caso ai trattamenti sperimentali: Control (nessuna manipolazione), Warming (copertura notturna), Drought (intercettazione periodica delle precipitazioni). Elementi tubolari in ferro zincato costituivano una struttura orizzontale rettangolare di 6 x 4 m sostenuta a circa 1 m di altezza da 12 elementi verticali infissi al terreno. Questi elementi

erano ricoperti da una guaina in plastica per evitare la lisciviazione di contaminanti al suolo. Sul telaio rettangolare poggiavano due binari che permettevano lo scorrimento dei teli (dimensioni 5 x 4 m) necessari per la copertura della vegetazione (fig. 4). I teli erano collegati tramite cavetti in acciaio ad un motore, alimentato da una batteria a 24 V ricaricata da un pannello solare. Il segnale proveniente da sensori di radiazione solare, pioggia e velocità del vento, veniva acquisito da un microprocessore che attivava l'apertura e chiusura dei teli in accordo con il protocollo sperimentale impostato e di seguito descritto.

Trattamento Warming – I teli utilizzati, di spessore 5 mm e costituiti di plastica-alluminio per riflettere la radiazione infrarossa emessa dal suolo durante le ore notturne, con intensità di luce inferiore a 4 W m^{-2} si aprivano sopra la vegetazione e si ritiravano all'alba. Se durante la notte si verificava un evento piovoso o il vento superava la velocità soglia di 10 m s^{-1} , i teli venivano riavvolti, per poi essere nuovamente stesi al termine del fenomeno ventoso o piovoso.

Trattamento Drought - I teli del trattamento Drought, necessari per l'intercettazione delle precipitazioni, erano in polietilene impermeabile e trasparente. Durante il periodo del trattamento Drought (aprile - maggio e ottobre - novembre) questi si svolgevano in caso di precipitazione e si riavvolgevano con la fine dell'evento piovoso o con vento di velocità maggiore di 10 m s^{-1} . L'acqua raccolta dai teli era convogliata in grondaie ed allontanata dal plot. Ulteriori barriere metalliche a monte dei plots Drought evitavano l'ingresso dell'acqua per ruscellamento.

Trattamento Control – I plot di controllo erano individuati dalla stessa struttura metallica come i plot trattati, ma su di essi non erano installati i teli di copertura.

Una recinzione in rete metallica tutta intorno all'area sperimentale, ha evitato l'ingresso dei grandi mammiferi presenti nella riserva (cavalli, cinghiali, asini, daini).

Il sistema di monitoraggio del microclima

All'interno di ogni plot il microclima è stato continuamente monitorato per mezzo di: 1 sensore di temperatura dell'aria a 20 cm di altezza dal suolo; 1 sensore di umidità relativa dell'aria a 20 cm di altezza dal suolo; 4 sensori di temperatura del suolo, di cui 3 alla profondità di 10 cm e 1 alla profondità di 20 cm; 1 sensore per il contenuto idrico del suolo ECH₂O (Decagon Devices, Inc.) alla profondità di 10

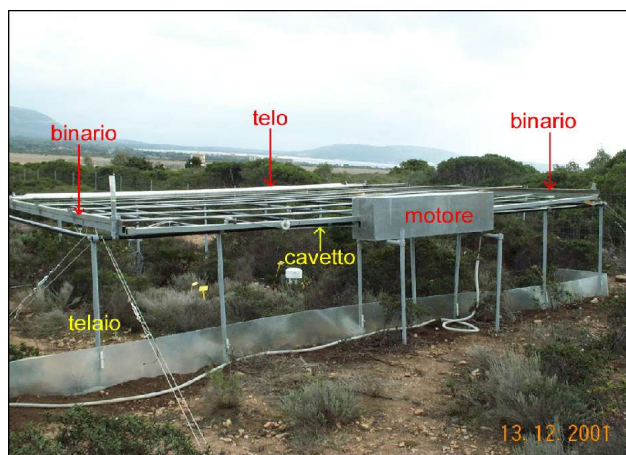


Fig. 4 - Uno dei nove plot, individuato dalla struttura in ferro; su questa sono montati due binari su cui scorrono i teli per la copertura notturna (trattamento warming) o per la rimozione delle precipitazioni naturali (trattamento drought). I plot di controllo sono dotati della sola struttura in ferro.

cm. Inoltre, per il monitoraggio del clima dell'area sono stati installati a 2 m di altezza i seguenti sensori: 1 sensore per la temperatura dell'aria; 1 sensore per l'umidità relativa dell'aria; 1 sensore per la velocità e direzione del vento; 1 sensore per la radiazione globale; 1 pluviometro. Degli interruttori a tre posizioni (*switch*) venivano attivati al passaggio dei teli e hanno permesso di monitorare il momento di ogni apertura e chiusura. I segnali dei sensori venivano acquisiti con un datalogger (CR10 Campbell Scientific, Inc.). La temperatura del suolo e dell'aria, l'umidità relativa, la radiazione globale e il contenuto idrico del suolo venivano acquisiti ad una frequenza di 1 dato ogni 5 minuti e mediati ogni 30 minuti. Per la velocità e direzione del vento i dati erano acquisiti ogni 10 secondi ed i valori medio e massimo erano registrati ogni 30 minuti. Il pluviometro generava un segnale di tipo digitale continuamente acquisito e cumulato ogni 10 secondi; il valore cumulato veniva registrato ogni mezz'ora. Con cadenza settimanale i dati venivano trasferiti su PC, per le successive elaborazioni.

Per ovviare al problema della grande variabilità spaziale della struttura del suolo, i dati di contenuto idrico misurati da ogni sensore sono stati espressi come percentuale del valore massimo registrato nel corso dell'anno (RWC), quindi in condizioni di massima saturazione.

Gli effetti dei trattamenti Warming e Drought sulle tre variabili microclimatiche temperatura del suolo a 10 cm di profondità (Ts₁₀), temperatura del suolo a

20 cm di profondità (Ts20) e temperatura dell'aria a 20 cm di altezza dal suolo (Ta), sono stati calcolati come differenza tra il valore giornaliero di temperatura minima, media e massima nel trattamento e il valore nel controllo. Queste differenze sono state testate per gli anni 2002 e 2003 con il test di Wilcoxon per verificare la loro significativa differenza da zero. Benché i teli del Warming siano rimasti fermi per alcuni mesi della sperimentazione per motivi tecnici (fine dicembre 2002 - inizio aprile 2003), per le analisi statistiche sono stati utilizzati tutti i dati a disposizione, poiché rappresentativi delle condizioni ambientali che hanno agito sui processi a livello di pianta e di suolo. Tuttavia, quando sono stati analizzati i soli dati del periodo di funzionamento dei teli, gli effetti su Ts10, Ts20 e su Ta, soprattutto sulle minime, sono stati decisamente più forti (risultati non mostrati). Il periodo di non funzionamento dei teli Warming è stato utilizzato per verificare il tempo di annullamento dell'incremento di temperatura nel Warming ottenuto nel periodo precedente (agosto 2001 - dicembre 2002).

Per ogni anno è stato inoltre calcolato il numero di giorni di gelo, ossia i giorni in cui la temperatura minima dell'aria è stata inferiore a 0 °C.

Per la stima della quantità di precipitazioni sottratte nei plots Drought, i millimetri di pioggia caduti in mezz'ora sono stati considerati sottratti se i teli risultavano chiusi, come segnalato dagli interruttori posti sui binari di scorrimento dei teli. Per entrambi i trattamenti è stato quindi calcolato il valore annuo di precipitazioni, come sommatoria dei singoli eventi registrati nel sito sperimentale.

Risultati

Funzionamento della manipolazione

Il passaggio dei teli Warming è stato registrato dagli *switch* inseriti lungo i binari. La chiusura e apertura dei plots è avvenuta in accordo con l'ora di levata e di tramonto del sole. Durante l'anno 2002 si è verificato un periodo di circa un mese di non funzionamento del trattamento Warming (settembre). Nel 2003 si è verificata un'interruzione più lunga, che ha coperto i tre mesi di inizio anno (gennaio-inizio aprile). In alcune notti, sono state osservate ripetute chiusure e aperture dei teli a causa di forti raffiche di vento intermittenti, superiori alla soglia di 10 m s⁻¹, e/o eventi piovosi.

Il trattamento Drought è stato attivato ogni anno in

due periodi, primaverile e autunnale, in accordo con il piano sperimentale che prevedeva per l'area mediterranea un prolungamento della stagione arida. Nel 2002 la quantità complessiva di precipitazione intercettata durante i due periodi di trattamento, è stata pari a circa il 14% del totale annuo che è risultato essere di 660 mm. Nel 2003, nel primo periodo (primaverile) è stata intercettata una piccolissima quantità di precipitazioni, a causa della scarsa quantità caduta. Nel secondo periodo, che all'opposto è stato particolarmente piovoso (178 mm), la percentuale di precipitazione rimossa è salita ad oltre l'80%. Complessivamente per l'anno 2003 la rimozione di precipitazioni nei plots Drought è stata di 148 mm pari al 36% del totale annuo (411 mm).

Modificazioni indotte dai trattamenti sulla temperatura del suolo e dell'aria

L'andamento giornaliero delle temperature dell'aria e del suolo è risultato strettamente correlato alla radiazione solare incidente (in fig. 5 è riportato un esempio tipico). Il trattamento Warming ha determinato un rallentamento ed una riduzione significativa del raffreddamento notturno nelle giornate serene rispetto al Control; scarso o nullo è risultato l'effetto in condizioni di cielo coperto (fig. 5; giorno 05/09). Le temperature nei due trattamenti hanno assunto valori molto simili nelle fasi di riscaldamento e raffreddamento. Tuttavia, per le temperature del suolo queste fasi sono state caratterizzate da una maggiore rapidità nei plots controllo e i massimi giornalieri sono risultati più bassi nei plots del trattamento Warming, seppure all'interno delle barre di errore (fig. 5b). Poiché tale effetto non è stato riscontrato per la temperatura dell'aria (fig. 5a), le differenze osservate sono da ricondursi ad un diverso ombreggiamento dei sensori durante le ore centrali della giornata.

Nella tab. 1 sono riportate le differenze e gli effetti percentuali sulle tre variabili temperatura dell'aria (Ta), temperatura del suolo a 10 cm di profondità (Ts10) e temperatura del suolo a 20 cm di profondità (Ts20), per i due anni di osservazione. Il trattamento Warming ha provocato un incremento medio delle temperature minime giornaliere dell'aria di circa 1.0 °C nel 2002 e circa 1.1 °C nel 2003. Di conseguenza la temperatura media annuale dell'aria nei plots Warming è risultata più elevata di 0.5 °C nel 2002 e di 0.6 °C nel 2003. Un incremento del valore medio delle temperature massime giornaliere dell'aria è

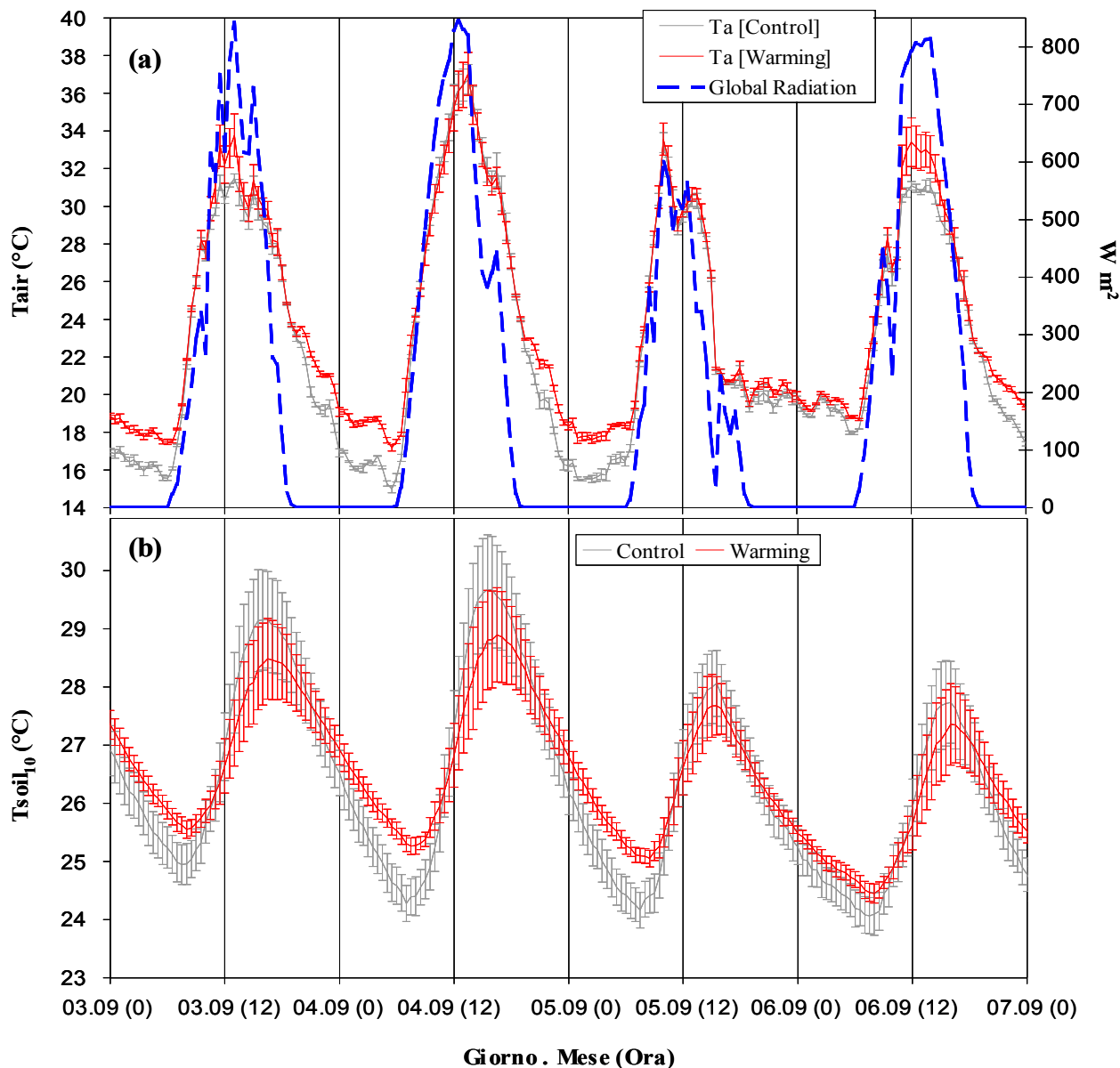


Fig. 5 - Andamento giornaliero della radiazione globale incidente e delle temperature dell'aria (a), e del suolo (b) nei plots dei trattamenti Control e Warming, nel periodo 3-7 settembre 2003.

stato inoltre osservato sia nel 2002 (+0.3 °C) che nel 2003 (+0.6 °C). A livello del suolo, gli incrementi sopra descritti erano evidenti sia a 10 che a 20 cm di profondità, seppure di diversa entità. Mediamente nei due anni, l'incremento medio delle temperature minime giornaliere del suolo è stato di circa 0.5 °C per la profondità di 10 cm e di circa 0.3 °C per quella di 20 cm. A differenza di quanto osservato per le temperature massime giornaliere dell'aria, a livello del suolo non è stato riscontrato un incremento di tali valori ma piuttosto un certa riduzione.

Un effetto secondario del trattamento Drought (tab. 1) è stato quello di incrementare di circa 0.5 °C le temperature minime giornaliere dell'aria sia nel

2002 che nel 2003. Gli incrementi delle temperature massime giornaliere dell'aria erano nei due anni inferiori a 0.1 °C. A livello delle temperature del suolo, l'incremento delle temperature minime giornaliere era constatato a 10 cm di profondità ma non a 20 cm.

Nel corso dei due anni, l'effetto del trattamento Warming sulle temperature minime giornaliere del suolo a -10 cm è stato pressoché costante (fig. 6), eccetto che per un calo nell'autunno 2002 e nell'inverno 2003 spiegabile con il mancato funzionamento dei teli Warming. L'effetto sulle temperature minime giornaliere dell'aria è stato più forte nelle stagioni primavera-estate (fig. 6). Come

Tab. 1 - Differenze medie annuali e effetti percentuali dei due trattamenti nei due anni rispetto al controllo. Ta = temperatura dell'aria, Ts = temperatura del suolo a 10 o 20 cm di profondità. * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

Parametro	Warming			Drought		
	Media delle minime giornaliere	Medie giornaliere	Medie delle massime giornaliere	Media delle minime giornaliere	Medie giornaliere	Medie delle massime giornaliere
2002						
Ta (°C)	+1.02***	+0.46***	+0.30***	+0.45***	+0.16***	-0.07**
Effetti	+10.7%	+2.8%	+1.3%	+4.5%	+1.0%	-0.3%
Ts10 (°C)	+0.59***	+0.25***	-0.15***	+0.51***	+0.29***	+0.06***
Effetti	+3.7%	+1.4%	-0.8%	+3.2%	+1.7%	+0.3%
Ts20 °C	+0.36***	+0.04*	-0.26***	-0.02 ns	-0.15***	-0.25***
Effetti	+2.1%	+0.2%	-1.3%	-0.1%	-0.8%	-1.3%
2003						
Ta (°C)	+1.13***	+0.63***	+0.58***	+0.48***	+0.23***	-0.05 ns
Effetti	+11.2%	+3.7%	+2.2%	+4.9%	+1.4%	-0.2%
Ts10 (°C)	+0.47***	-0.02 ns	-0.61***	+0.44***	+0.08***	-0.34***
Effetti	+2.9%	-0.1%	-3.0%	+2.7%	+0.5%	-1.7%
Ts20 (°C)	+0.23***	-0.17***	-0.37***	-0.11***	-0.27***	-0.19***
Effetti	+1.3%	-0.1%	-1.8%	-0.7%	-0.6%	-0.9%

per le temperature minime del suolo, anche gli effetti sulle minime dell'aria sono stati molto bassi o nulli tra la fine del 2002 e i primi mesi del 2003, a causa del non funzionamento dei teli Warming già ricordato.

Analizzando le differenze mensili (fig. 6) si è potuto osservare un aumento degli effetti medi mensili del Drought sulle temperature minime giornaliere del suolo (-10 cm) in corrispondenza dei mesi di maggio e settembre 2002 e successivamente a maggio e ottobre-novembre 2003, ossia i mesi in cui il trattamento Drought è stato in funzione.

Conseguenza della variazione dei valori massimi e minimi di temperatura del suolo è stata la diminuzione dell'escursione termica giornaliera del suolo (ETGs) nel Warming rispetto al Control: nel 2002 il valore medio è stato 3.7 °C nel Control e 2.9 °

C nel Warming, e nel 2003 4.1 °C nel Control e 3.0 °C nel Warming, significativamente differenti ($p < 0,001$) in entrambi gli anni. Tale riduzione era più marcata nella stagione calda piuttosto che in quella fredda, come evidenziato dalla relazione tra ETGs e radiazione globale (fig. 7). Diversamente, l'escursione termica giornaliera della temperatura dell'aria risultava meno strettamente correlata con la radiazione globale e senza differenze fra i trattamenti (dati non mostrati).

Il suolo a -10 cm di profondità non ha mai registrato valori di temperatura inferiore allo zero. Diversamente, la temperatura dell'aria a +20 cm è scesa sotto lo zero un numero di volte inferiore del 40% e del 20% nel trattamento Warming rispetto al Control rispettivamente nei due anni 2002 (Control 18 gg - Warming 11 gg) e 2003 (Control 31 gg -

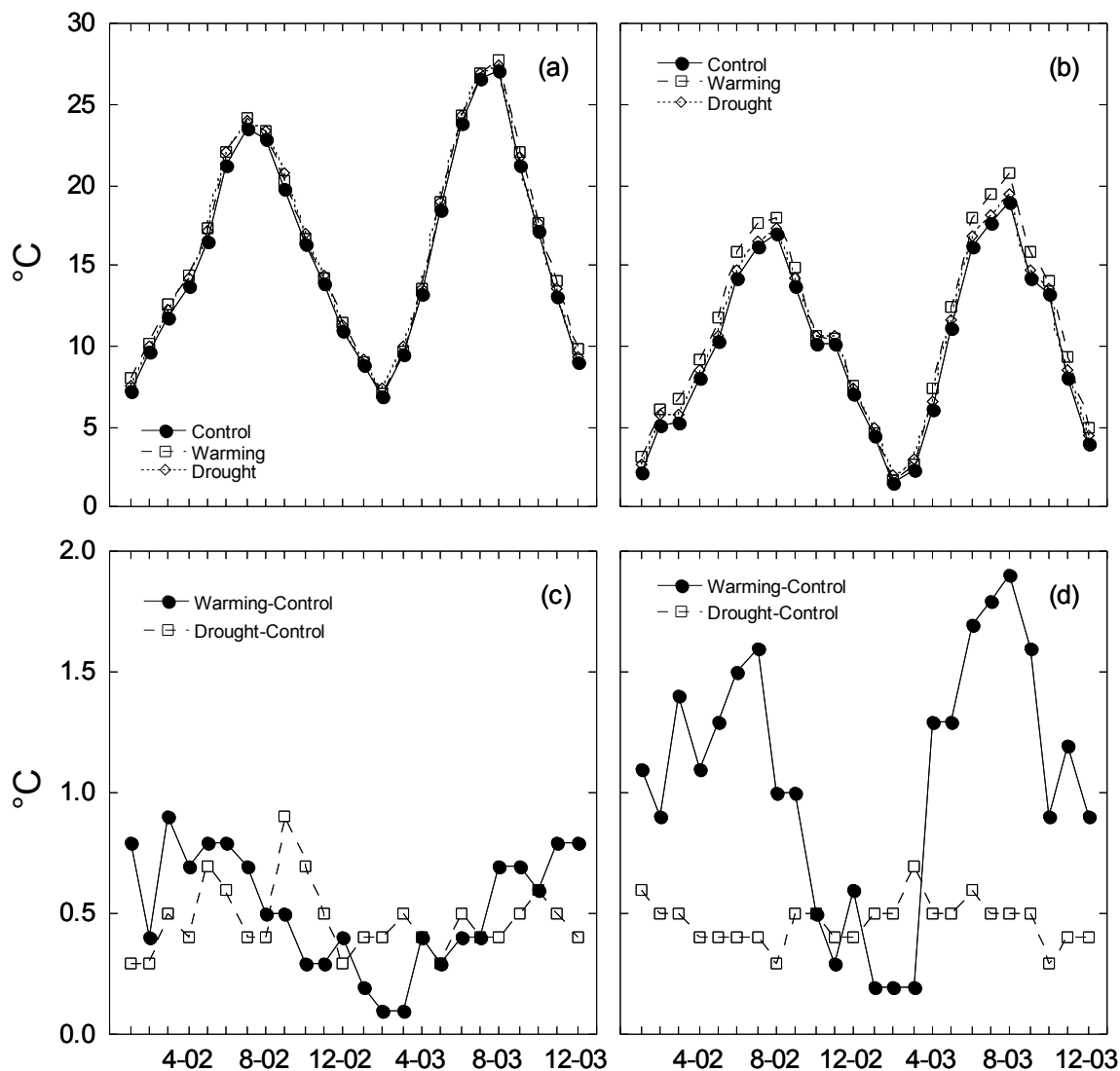


Fig. 6 - Andamento delle medie mensili delle temperature minime giornaliere del suolo a 10 cm di profondità (a) e dell'aria (b) nei plots Control, Warming e Drought; (c) e (d) differenze medie mensili fra i trattamenti, per i parametri di cui sopra.

Warming 25 gg).

Modificazioni indotte dai trattamenti sul contenuto idrico del suolo

Le variazioni nel tempo del contenuto idrico relativo del suolo (RWC) sono state strettamente condizionate dall'andamento delle precipitazioni (fig. 8). Durante il periodo di funzionamento dei plots Drought, sono evidenti i tagli delle precipitazioni, in quanto mancano alcuni picchi di RWC in corrispondenza di eventi piovosi (ovali in fig. 8). Il livello di saturazione del suolo si è verificato in corrispondenza delle piogge primaverili. Successivamente il terreno è andato incontro ad una fase di disseccamento, interrotta da

eventi piovosi sparsi (rari nel 2003), fino al raggiungimento dei livelli minimi estivi che sono stati mantenuti sino a inizio autunno (fine settembre), quando è ripartito il periodo delle piogge autunnali. Le fasi di disseccamento successive alle piogge del periodo primaverile sono state più lente di quelle che sono seguite agli eventi piovosi estivi, dopo i quali ad un rapido innalzamento del RWC è seguito pure un rapido ritorno ai valori iniziali. Nessun effetto di riduzione del contenuto idrico del suolo (RWC) da parte del trattamento Warming è stato rilevato. Anzi, contrariamente a quanto ci si aspettava, il Warming è stato mediamente più umido del Control, forse per effetto di una maggiore condensazione notturna.

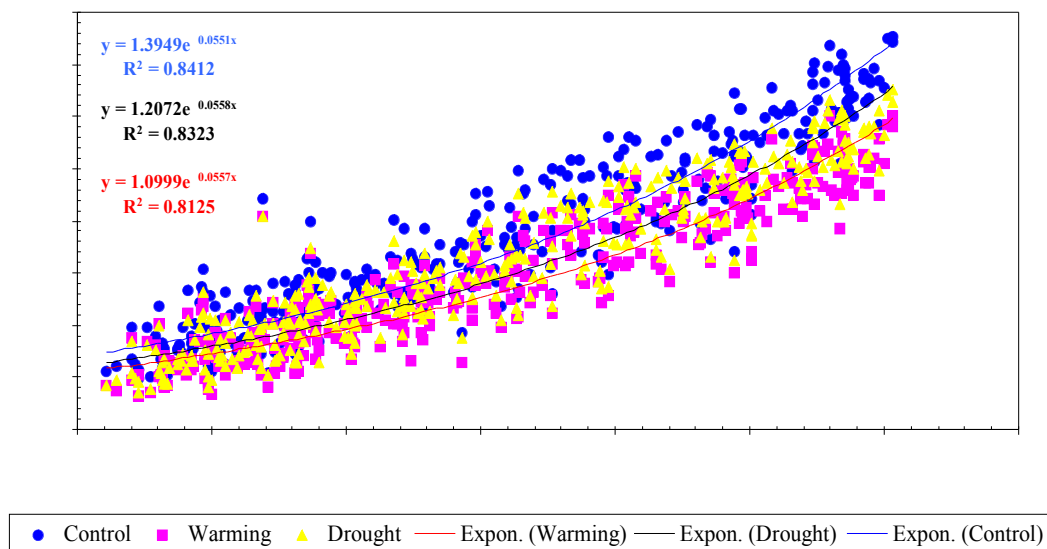


Fig. 7 - Relazione fra l'escursione termica giornaliera della temperatura del suolo (a 10 cm di profondità) e la radiazione globale giornaliera, per i tre trattamenti sperimentali.

Discussione

Rispetto ad altri esperimenti che prevedevano l'incremento di temperatura del suolo e dell'aria attraverso altri tipi di manipolazione (Harte & Shaw 1995, Norby et al. 1997, Shaver et al. 2000, Rustad et al. 2001, Strömbgren & Linder 2002, Turnbull et al. 2002, Wan et al. 2002, Saavedra et al. 2003), l'effetto sulla temperatura indotto con la nostra tecnica si è mostrato più basso. Secondo le previsioni future, il clima nel futuro sarà più caldo di 0.1-0.4°C decade⁻¹ (Kundzewicz et al. 2001): l'incremento di circa 1.0 °C della temperatura dell'aria ottenuto potrebbe quindi rappresentare la situazione che si avrà tra ventio-cento anni.

Il trattamento Warming ha ridotto l'escursione termica giornaliera del suolo rispetto al Control, soprattutto durante il periodo di maggiore irraggiamento solare, a differenza dell'escursione termica giornaliera dell'aria che non è apparsa influenzata dalla radiazione globale. Questa diversità di effetti può essere messa in relazione con le diverse modalità di dispersione termica del suolo e dell'aria. Infatti, benché di minore entità rispetto a quello sull'aria, l'effetto del trattamento Warming sulla temperatura del suolo risultava ancora significativo nei mesi di gennaio e febbraio 2003 quando il trattamento non era attivo già da fine dicembre 2002; questo effetto prolungato nel tempo non era verificato per le temperature minime giornaliere dell'aria, che già nel mese di gennaio non risultavano differenti fra i due trattamenti (dati non mostrati).

L'analisi delle modificazioni indotte dal trattamento Warming sui principali processi ecologici e funzionali della comunità oggetto del presente studio, in corso di elaborazione, non sembrano indicare un impatto significativo del trattamento dopo due anni di applicazione. E' importante però sottolineare che risposte di più lungo termine non possono essere escluse, in particolare per quello che riguarda i rapporti fra le diverse specie presenti nella comunità e l'interazione con i processi biologici del suolo. In tal senso, un'acclimatazione nei tassi di respirazione del suolo sembra già apparire nei plots Warming (pubblicazione in preparazione).

Il trattamento Drought ha ridotto la quantità di precipitazione in entrata e il numero di giorni di pioggia di maggiore intensità, in accordo con quanto previsto dai modelli climatici (Cubasch et al. 1996, Kundzewicz et al. 2001). Il trattamento non ha sempre ridotto l'umidità degli strati superficiali del suolo (entro i primi 10 cm), a causa del fatto che spesso gli eventi piovosi erano associati a forti venti, con conseguente riavvolgimento dei teli. Inoltre, la scelta di posizionare i sensori di umidità del terreno molto vicino alla superficie e l'indisponibilità di un grande numero di sensori non hanno consentito di evidenziare variazioni significative sul contenuto idrico del suolo. E' stato dimostrato che misure attendibili di questo parametro necessitano di un ampio numero di punti di campionamento, essendo il suolo un sistema altamente eterogeneo (Netto et al. 1999). Bisogna però osservare che gli strati più su-

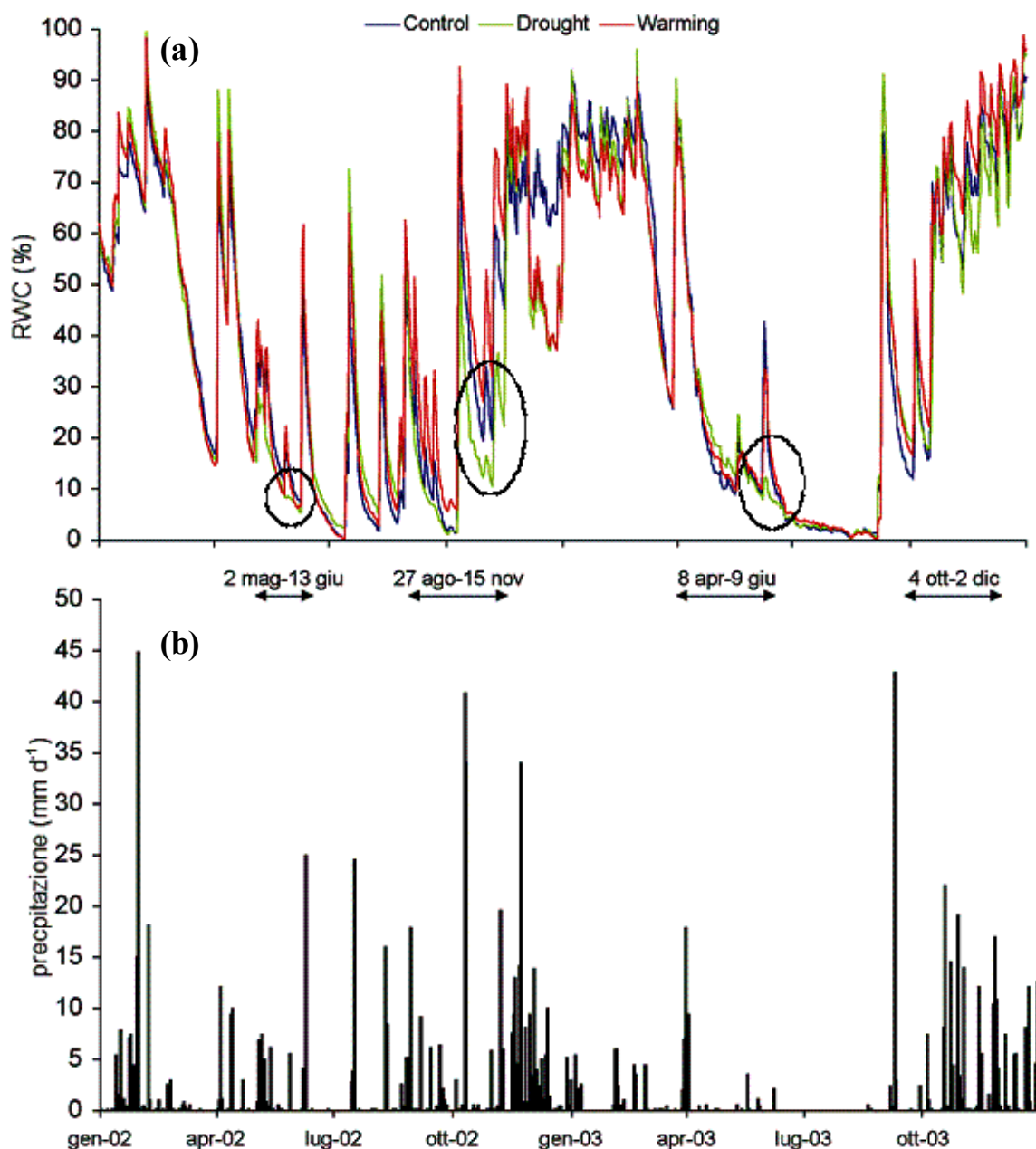


Fig. 8 - Andamento giornaliero del contenuto idrico relativo del suolo (RWC) nei plots Control, Warming e Drought (a) e delle precipitazioni (b) nei due anni di sperimentazione. Gli ovali evidenziano i periodi in cui il contenuto idrico del suolo dei plots Drought risultava significativamente ridotto rispetto ai plots Control, in conseguenza della rimozione delle precipitazioni. Le frecce orizzontali poste al di sotto dell'ascissa della figura superiore (a) indicano i periodi in cui era attivo il trattamento di rimozione delle precipitazioni.

perficiali sono quelli più importanti per l'attività dei microrganismi (Reichstein et al. 2002, Rey et al. 2002) che agiscono sulle diverse fasi del processo di decomposizione. Il parametro da noi misurato risulta quindi particolarmente utile per lo studio della decomposizione della lettiera e per la respirazione del suolo *in situ*. Per quanto riguarda le osservazioni in corso sui parametri ecologico-funzionali della ve-

getazione, il trattamento Drought ha già prodotto significative riduzioni dell'accrescimento di alcune specie e più in generale un minor tasso di sviluppo del grado di copertura della comunità (pubblicazione in preparazione), dimostrando l'estrema sensibilità di queste formazioni alla perturbazione del regime delle precipitazioni. Questo trattamento sembra poi influenzare direttamente e indi-

rettamente l'attività biologica del suolo, determinando sia lo stato di attività dei microrganismi che quello della vegetazione. Si viene quindi a realizzare un nuovo equilibrio fra le diverse componenti del bilancio il cui risultato netto è ancora largamente da determinare.

In conclusione, l'area sperimentale realizzata ha dimostrato di essere pienamente rispondente agli obiettivi della ricerca e con un ridotto livello di artificialità sperimentale. Il sistema di manipolazione da noi testato sembra quindi risolvere molti dei problemi legati ad altri approcci sperimentali, in particolare per quanto riguarda la simulazione di scenari di cambiamento climatico realistici nel medio periodo. E' doveroso evidenziare che i tempi di tali esperimenti non potranno mai essere di breve durata, considerando la complessità "non ridotta" dei processi studiati, ma allo stesso tempo sono la condizione necessaria per la verifica di ipotesi altrimenti teoriche.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ente Foreste della Sardegna per il supporto logistico all'attività di sperimentazione e in particolare il Dr. Massimo D'angelo per il contributo tecnico-scientifico nelle prime fasi di avviamento della ricerca. Un particolare ringraziamento al Capo cantiere e al personale dell'amministrazione del cantiere forestale *Le prigionette*. Si ringraziano inoltre: tutto il personale lì operante per il continuo supporto all'attività di campo e per lo spiccato spirito di collaborazione; i tecnici (Università della Tuscia) Tullio Oro, per la collaborazione nelle fasi di installazione, riparazione e manutenzione del sito e Matilde Tamantini, per il prezioso aiuto nell'attività di laboratorio; i numerosi studenti tesisti e dottorandi della Prof.ssa D. Spano, che hanno contribuito all'installazione dell'infrastruttura di manipolazione climatica nell'estate 2001.

Bibliografia

Allen-Diaz B, Chapin FS, Diaz S, Howden M, Puigdefábregas J, Stafford Smith M (1996). Rangelands in a Changing Climate: Impacts, Adaptations, and Mitigation. In: *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses* (Houghton JT, Meira Filho LG, Callender BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 879 pp.

Begni G, Darras S, Hoepffner M, Pesin E, Tourre Y (2001).

The present status of knowledge on Global Climatic Change; its regional aspects and impacts in the Mediterranean Region. A scientific and strategic report to Blue Plan.

- Biondi E, Filigheddu R, Farris E (2001). Il paesaggio vegetale della Nurra (Sardegna nord-occidentale). *Fitosociologia* 38: 3-105.
- Corrias B, Diana Corrias S, Valsecchi F (1983). Carta della vegetazione della Nurra di Alghero (Sardegna nord-occidentale). CNR, Roma,
- Cortez J (1997). Field decomposition of leaf litters: relationships between decomposition rates and soil moisture, soil temperature and earthworm activity. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 783-793.
- Cramer W (2001). Fire ecology, Mediterranean forests and global change. *Forest Ecology and Management* 147: 1-2.
- Cubasch U, Von Storch H, Waszkewitz J, Zorita E (1996). Estimates of climate change in Southern Europe derived from dynamical climate model output. *Climate Research* 7: 129-149.
- Cubasch U, Waszkewitz J, Perlwitz J (1995). Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Climatic Change* 31: 273-304.
- De Luis M, Garcia-Cano MF, Cortina J, Raventos J, Gonzales-Hidalgo JC, Sanchez JR (2001). Climatic trends, disturbances and short-term vegetation dynamics in a Mediterranean shrubland. *Forest Ecology and Management* 147: 25-37.
- Easterling DR, Horton B, Jones PD, Peterson TC, Karl TR, Parker DE, Salinger MJ, Razuvaev V, Plummer N, Jamason P, Folland CK (1997). Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science* 277: 364-367.
- Esteban-Parra MJ, Rodrigo FS, Castro-Diez Y (1998). Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. *International Journal of Climatology* 18: 1557-1574.
- FAO-UNESCO (1999). Soil map of the World, revised legend. Roma.
- Folland CK, Karl TR, Christy JR, Clarke RA, Gruza GV, Jouzel J, Mann ME, Oerlemans J, Salinger MJ, Wang S-W (2001). Observed climate variability and change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, Van Der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- Groisman PY, Easterling DR, Knight RW, Jamason PF, Hennessy KJ, Suppiah R, Page CM, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev V, Douglas A, Forland E, Zhai PM (1999).

- Changes in the probability of heavy precipitations: important indicators of climatic change. *Climatic Change* 42: 309-325.
- Hanson PJ, Wullschleger SD, Bohlman SA, Todd DE (1993). Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. *Tree Physiology* 13: 1-15.
- Harte J, Shaw R (1995). Shifting dominance within a montane vegetation community: results of a climate-warming experiment. *Science* 267: 876-880.
- Jamieson N, Monaghan R, Barraclough D (1999). Seasonal trends of gross N mineralization in a natural calcareous grassland. *Global Change Biology* 5: 423-423.
- Kirschbaum MUF (1995). The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 753-760.
- Kundzewicz ZW, Parry ML, Cramer W, Holten JJ, Kaczmarek Z, Martens P, Nicholls RJ, Öquist M, Rounsevell MDA, Szolgay J (2001). Europe. In: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Mitigation. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1032 pp.,
- Lal R (2001). Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climate Change* 51: 35-72.
- Leiròs MC, Trasar-Cepeda C, Seoane S, Gil-Sotres F (1999). Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 327-335.
- Llorens L, Peñuelas J, Estiarte M (2003). Ecophysiological responses of two Mediterranean shrubs, *Erica multiflora* and *Globularia alypum*, to experimentally drier and warmer conditions. *Physiologia plantarum* 119: 231-243.
- Menzel A, Estrella A, Fabian P (2001). Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7: 657-666.
- Metaxas DA, Bartzokas A, Vitsas A (1991). Temperature fluctuations in the mediterranean area during the last 120 years. *International Journal of Climatology* 11: 897-908.
- Mouillot F, Rambal S, Joffre R (2002). Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. *Global Change Biology* 8: 423-437.
- Netto AM, Pieritz RA, Gaudet JP (1999). Field study on the local variability of soil water content and solute concentration. *Journal of Hydrology* 215: 23-37.
- Norby RJ, Edwards NT, Riggs JS, Al. E (1997). Temperature controlled open-top chambers for global change research. *Global Change Biology* 3: 259-267.
- Osborne CP, Mitchell PL, Sheehy JE, Woodward FI (2000). Modelling the recent historical impacts of atmospheric CO₂ and climate change on Mediterranean vegetation. *Global Change Biology* 6: 445-458.
- Peñuelas J, Filella I (2001). Responses to a Warming World. *Science* 294: 763-795.
- Peñuelas J, Filella I, Comas P (2002). Changed plant and animal life cycle from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8: 531-544.
- Pietracaprina A (1989). *La Nurra, sintesi monografica*. Gallizzi, Sassari,
- Piñol J, Terradas J, Lloret F (1998). Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic Change* 39: 345-357.
- Quereda Sala J, Gil Olcina A, Perez Cuevas A, Olcina Cantos J, Rico Amoros A, Monton Chiva E (2000). Climatic warming in the Spanish Mediterranean: natural trend or urban effect. *Climatic Change* 46: 473-483.
- Rasmussen K, Fog B, Madsen JE (2001). Desertification in revers? Observation from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change* 11: 271-282.
- Reichstein M, Tenhunen JD, Rouspard O, Ourcival J-M, Rambal S, Dore S, Valentini R (2002). Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen holm Oak forest: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology* 16: 27-39.
- Repapis CC (1986). Temporal fluctuation of precipitation in Greece. *Rivista di Meteorologia Aeronautica* 1-2: 19-25.
- Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, De Parri I, Jarvis PJ, Valentini R (2002). Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology* 8: 851-866.
- Rustad LE, Campbell JL, Marion GM, Norby RJ, Mitchell MJ, Hartley AE, Cornelissen JCH, Gurevitch J (2001). A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126: 543-562.
- Saavedra F, Inouye DW, Price MV, Harte J (2003). Changes in flowering and abundance of *Delphinium nuttallianum* (Ranunculaceae) in response to a subalpine climate warming experiment. *Global Change Biology* 9: 885-894.
- Shaver GR, Canadell J, Chapin FS III, Gurevitch J, Harte J, Henry G, Ineson P, Jonasson S, Melillo J, Rustad LE (2000). Global Warming and Terrestrial Ecosystem: a conceptual framework for analysis. *BioScience* 50: 871-882.
- Shaw MR, Loik ME, Harte J (2000). Gas exchange and water relations of two Rocky Mountain shrub species

- exposed to a climate change manipulation. *Plant Ecology* 146: 197-206.
- Strömbgren M, Linder S (2002). Effects of nutrition and soil warming on stemwood production in a boreal Norway spruce stand. *Global Change Biology* 12: 1194-1204.
- Turnbull MH, Murthy R, Griffin KL (2002). The relative impacts of daytime and night-time warming on photosynthetic capacity in *Populus deltoides*. *Plant, Cell and Environment* 25: 1729-1737.
- UNCCD (1994). Elaboration of an International Convention to combat Desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. Final text of the Convention.
- US Soil Survey Staff (1997). *Keys to Soil Taxonomy*, VII ed.
- Valsecchi F (1976). Sui principali aspetti della vegetazione costiera della Nurra Nord-occidentale (Sardegna settentrionale). *Giornale Botanico Italiano* 110: 21-63.
- Wan S, Luo Y, Wallace L (2002). Changes in microclimate induced by experimental warming and clipping in tall grass prairie. *Global Change Biology* 8: 754-768.
- Wetherland RT, Manabe S (1999). Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming. *Climatic Change* 43: 495-511.
- Xu M, Qi Y (2001). Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in Northern California. *Global Change Biology* 7: 667-677.