

La siccità dell'estate 2003 causa di disseccamenti del pino silvestre in Val d'Isarco

Stefano Minerbi¹, Alessandro Cescatti², Paolo Cherubini³,
Klaus Hellrigl⁴, Gerhard Markart⁵, Matthias Saurer⁶, Claudio Mutinelli⁷

¹ Provincia Autonoma di Bolzano - Ripartizione Foreste, 39100 Bolzano (I)

² CEA- Centro di Ecologia Alpina, 38040 Viote del Monte Bondone – Trento (I)

³ WSL, 8903 Birmensdorf (CH)

⁴ Wolkensteinstraße 83, 39042 Bressanone/Brixen (I)

⁵ Bundesamt und Forschungszentrum für Wald - Institut für Lawinen- u. Wildbachforschung, Hofburg, 6020 Innsbruck (A)

⁶ Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen (CH)

⁷ Provincia Autonoma di Bolzano – Ufficio Idrografico (I)

Abstract

Scots Pine die-back in the Isarco Valley because of severe summer drought 2003

Scots pine forests located on dry and sunny slopes of the Isarco and Adige valleys are dying due to the intensive and extended drought that hit Europe during summer 2003. Interdisciplinary surveys carried out by the Forest Department of Bolzano were aimed at identifying causal elements at different functional levels of the ecosystem and of the tree species, which is particularly sensitive to climatic anomalies. The results of the analysis provided a scientific interpretation of the forest die-back, mainly caused by water stress, and offered useful insights to drive the urgent management practices and the future silvicultural objectives.

Keywords: carbon and oxygen stable isotopes, climate change, dendrochronology, forest die-back, Scots Pine, South Tyrol, summer drought.

1 Introduzione: lineamenti vegetazionali e cenni storici

La fascia submontana, che fra i 500 ed i 1000 m s.l.m. riveste le pendici delle principali vallate dell'Alto Adige (Val d'Adige, Val d'Isarco), vede la massima diffusione delle formazioni a pino silvestre. Qui, in virtù della costituzionale aridità del clima prettamente continentale centro-alpino, il pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) sostituisce il faggio (*Fagus sylvatica* L.), andando a ricoprire,

più spesso in formazione pura come associazione durevole (*Vaccinio-Pinetum sylvestris*), ambienti con condizioni edafiche estreme. Per la loro estensione questi popolamenti costituiscono gli elementi caratterizzanti l'attuale paesaggio assieme a castagneti da frutto, vigneti, prati e pascoli di bassa quota e nuclei abitativi rurali.



Fig. 1
 Tipico paesaggio
 rurale della fascia
 collinare, dominato da
 popolamenti di Pino
 silvestre deperienti.
*Typical landscape of
 the hills, characterized
 by dying Scots pine
 forests.*

Secondariamente il pino silvestre edifica il piano dominante nelle attuali formazioni del piano collinare superiore in consorzio con latifoglie mesofile, con la roverella in particolare sui versanti a meriggio (*Antherico liliaginis-Pinetum arcostaphyletosum uvae-ursi*) o col castagno in stazioni più fresche ed ombreggiate (*Phyteumo betonicifoliae-Quercetum vacciniotosum mirtilli*) (RIPARTIZIONE FORESTE BOLZANO: 2006), con escursioni nel sottostante piano collinare inferiore, più propriamente edificato da latifoglie termofile cedue con orniello e carpino nero quali specie principali (*Orneto-Ostryetum quercetosum*).

La piccola era glaciale, terminata in Europa attorno alla prima metà del 1800, determinò la discesa del piano collinare superiore verso il fondovalle e di conseguenza la diffusione del pino silvestre a quote più basse. In seguito, contestualmente con il progressivo aumento delle temperature, si assiste alla riconquista del piano collinare da parte delle latifoglie (*Quercus pubescens*, *Quercus petraea*, *Castanea sativa*, *Prunus avium*, *Tilia cordata*, *Fraxinus ornus*, *Corylus avellana*), processo che perdura tuttora.

All'inizio del XX secolo i terreni del circondario di Bressanone, ove attualmente è radicato il bosco quasi puro di pino silvestre, erano occupati da castagneti e vigneti. In seguito vennero intensamente sfruttati durante tutto l'anno dal pascolo soprattutto ovino, al pari dei pascoli prossimali di pertinenza del maso. Fino al periodo 1920-1940 furono quindi sottoposti ad un forte degrado.

Dopo la II. Guerra Mondiale, alla progressiva diminuzione del carico pascolivo seguì la ricolonizzazione spontanea delle superfici da parte del pino silvestre, localmente assistita da rimboschimenti effettuati dall'autorità forestale, che portò ad un bosco di media copertura con sottobosco di ericacee. L'attuale soprassuolo, dunque di prima generazione con un'età media di ca. 60 (90) anni, ha subito un progressivo degrado in seguito alla raccolta di stame ed alla mancanza di cure culturali che ne hanno compromesso la stabilità strutturale ed ecologica nei confronti di diversi parassiti endemici, causa accertata di mortalità dall'inizio degli anni '90: *Viscum album*, *Cenangium ferruginosum*, *Sphaeropsis sapinea*, *Armillaria* sp.

Sulla base dei citati riferimenti vegetazionali e storiografici appare altresì evidente come la dinamica dei

popolamenti in oggetto possa venire in particolar modo influenzata da fattori esogeni di disturbo, come appunto gli estremi climatici verificatisi nel 2003, le cui conseguenze, in forma di decolorazioni (arrossamento) della chioma nel mese di settembre (Fig. 1 e 2), seguite dal completo disseccamento di individui singoli o in gruppi estesi, si sono evidenziate ad esclusivo carico dei soprassuoli di pino silvestre siti in formazione pura e mista sui versanti soleggiati della Valle d'Isarco tra Bolzano e Bressanone nella fascia altimetrica compresa tra i 500 e gli 800 m. s.l.m. (Fig. 4).



Fig. 2
Popolamenti di Pino silvestre interessati da arrossamento e disseccamento estesi della chioma.
Scots pine stands characterized by extended crown chlorosis and die-back.

Il fenomeno ha interessato, secondo una distribuzione a macchia di leopardo, fino all'80% del popolamento per complessivi 150 ha ed 8000 m³ di massa legnosa. Particolare rimarchevole è stata l'assenza di agenti biotici primari di danno (insetti, infezioni fungine, etc.), mentre al deperimento non ha fatto seguito la temuta esplosione di patogeni secondari, peraltro sempre presenti in questo tipo di cenosi.

Nessuna forma di danno permanente è stata viceversa osservata a carico della vegetazione accessoria di latifoglie spontanee (Fig. 3).



Fig. 3
Vegetazione accessoria di latifoglie mesofile.
Understory vegetation of temperate broadleaves

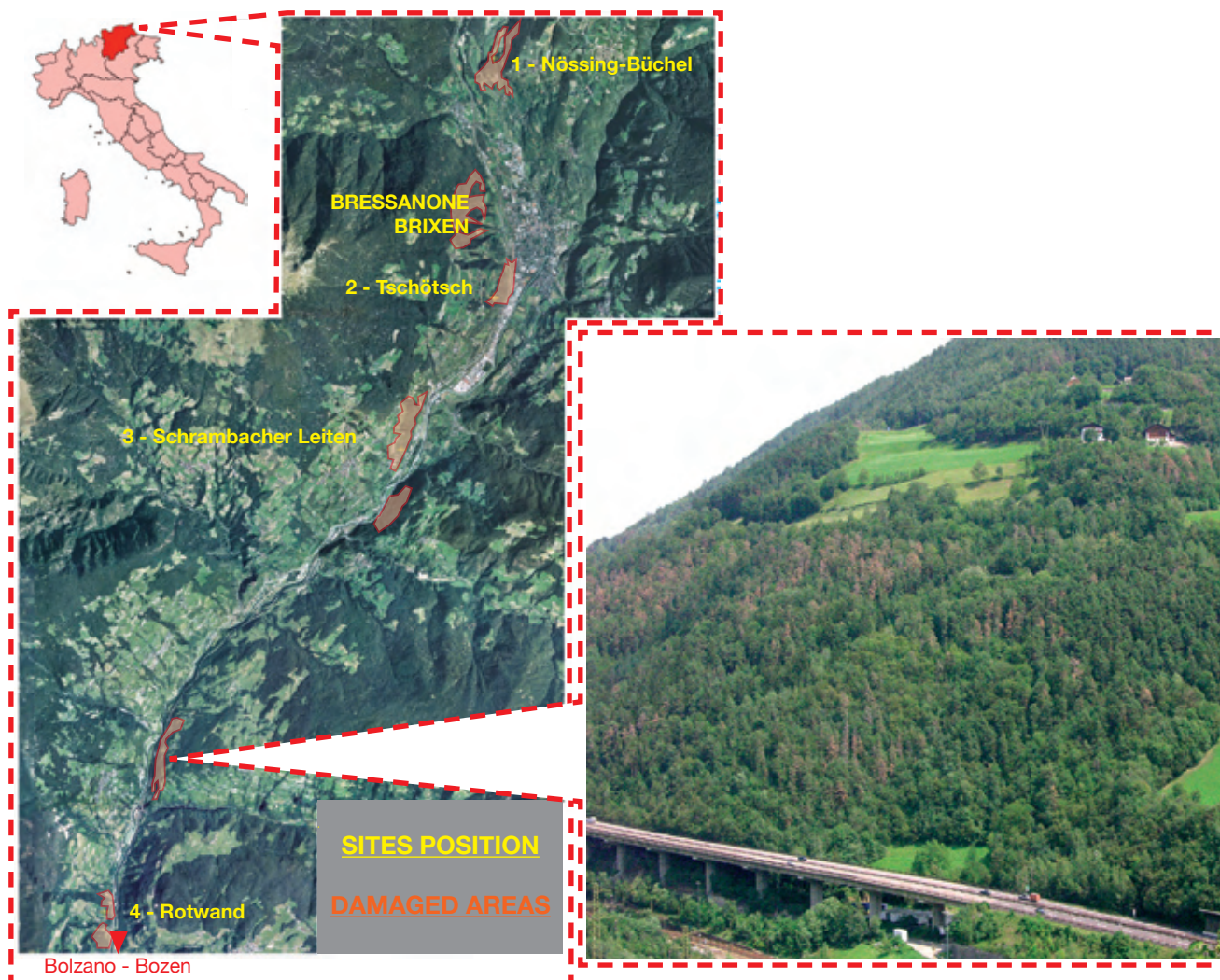


Fig. 4

Immagine aerea dei siti di campionamento e delle zone interessate da mortalità diffusa del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) in Val d'Isarco durante l'estate 2003.

*Aerial photograph of sampling plots and of the areas characterized by extensive dieback of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Isarco Valley during summer 2003.*

2 Metodologia

2.1 Finalità - Impostazione dell'indagine

In considerazione della progressiva espansione dei disseccamenti all'insieme dei popolamenti di pino silvestre, con conseguente presumibile pregiudizio per la stabilità idrogeologica delle pendici e per la sicurezza di importanti infrastrutture di comunicazione e trasporto lungo la Val d'Isarco (Autostrada del Brennero, ferrovia, viabilità locale: Fig. 4), la Ripartizione Foreste di Bolzano ha ritenuto opportuno verificare l'ipotesi di lavoro, che riconosce negli effetti della siccità 2003 la principale causa del fenomeno, secondo un approccio di tipo interdisciplinare (auxometrico, climatologico, pedologico, fitopatologico, dendrocronologico e fisiologico vegetale), per il quale si è avvalsa della collaborazione di istituti e consulenti specializzati.

Più in particolare le indagini hanno inteso approfondire le seguenti tematiche:

- analisi dell'andamento climatico durante la stagione vegetativa 2003 e verifica del carattere di normalità/eccezionalità nel contesto della serie storica 1926-2003;

- ricostruzione del bilancio idrologico dei suoli per i siti forestali interessati dal deperimento, al fine della verifica/valutazione di condizioni pregresse di indebolimento fisiologico (entità dello stress idrico) cui sono state sottoposte le pinete;
- verifica dei legami tra il bilancio idrico stazionario e il controllo stomatico della traspirazione, attraverso una specifica indagine storica del rapporto tra isotopi stabili del carbonio e dell'ossigeno;
- verifica del diverso comportamento fra piante deperienti e vive in rapporto alla disponibilità e/o accessibilità alle risorse idriche;
- presenza di patogeni e loro ruolo nella dinamica del fenomeno;
- valutazione del fenomeno in proiezione futura su base ecosistemica e di dinamica del popolamento, ai fini della pianificazione degli interventi fitosanitari e della gestione selvicolturale.

2.2 Aree di studio

L'indagine sperimentale è stata effettuata presso i quattro siti campione di Nössing-Büchel, Tschötsch, Schrambach e Rotwand dislocati lungo la valle

dell'Isarco (Tab. 1; Fig. 4), caratterizzati da manifesti sintomi di deperimento e mortalità del pino silvestre.

Tab. 1
Principali caratteri stazionali delle aree di studio.
Main characteristics of the experimental site.

	Aree di studio Experimental sites	Quota Elevation m	Pendenza Slope %	Pendenza Slope °	Esposizione Aspect °
1	Nössing-Büchel	670	0	0	0
2	Tschötsch	720	80,0	38.7	125°
3	Schrambacher Leiten	600	45,5	24.5	140°
4	Rotwand	560	50,0	26.6	100°

2.3 Campionamenti in situ

In ciascuno dei tre siti di Nössing-Büchel, Tschötsch e Schrambacher Leiten sono stati individuati nel periodo invernale 2003/2004 due gruppi di alberi adiacenti (distanza massima 15 m) con identiche condizioni microstazionali, salvo che per il substrato podologico. Nell'ambito di questi gruppi sono stati campionati: 3 alberi disseccati su terreno sciolto e mediamente profondo, 3 alberi vivi in prossimità di affioramenti di roccia.

Per le indagini di carattere dendro-ecologico e cronologico e di composizione isotopica del legno sono state prelevate opportune sezioni legnose, in particolare:

alberi disseccati: una sezione trasversale alla base del fusto (rotella);

alberi vivi: 4 carotine per albero estratte alla base del fusto mediante succhiello di Pressler.

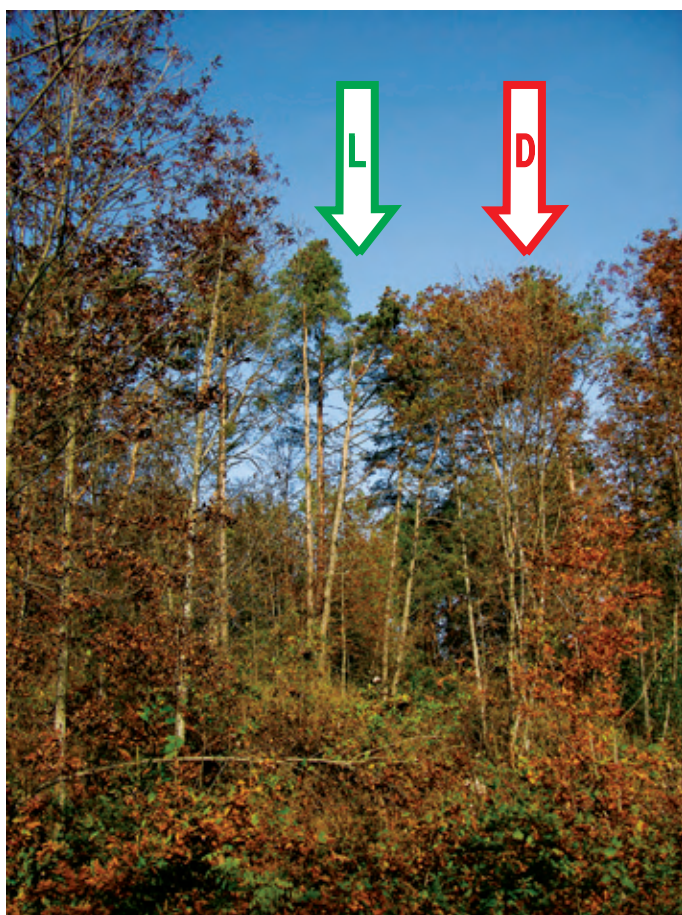


Fig. 5
Sito sperimentale di Tschötsch
con indicazione dei gruppi di alberi
campione: vivi (L) e disseccati (D).
*Living (L) and dying (D) sampled trees at
the Tschötsch experimental plot.*

Sul sito di Rotwand sono state estratte mediante succhiello di Pressler 3 carotine alla base del fusto di 5 alberi deperienti, ma non ancora disseccati. In totale quindi 9 rotelle e 51 carotine.

Presso i laboratori dell'Istituto Federale di Ricerca per la Foresta, la Neve e il Paesaggio di Birmensdorf (WSL) in Svizzera sono stati in seguito preparati i campioni legnosi (rotelle e carotine) per le analisi (NÖTZLI & STARY 2004):

- incollaggio su supporti e politura con carta vetrata alla levigatrice a nastro mediante successivi passaggi a finezza crescente (80, 120, 320, 400);
- datazione e separazione allo stereomicroscopio dei vari anelli e di parti di essi (legno primaverile e legno tardivo);
- misura delle ampiezze anulari allo stereomicroscopio dotato di micrometro con una precisione di 1/100 di mm e successiva elaborazione mediante software TSAP (Time Series Analysis Programm, Rinntech, Heidelberg, Deutschland);
- macinatura, pesata in idonee capsule per le analisi degli isotopi mediante spettrometro di massa atomica;

- sezionatura al microtomo, colorazione delle sezioni sottili con safranina, fotografie digitali per l'analisi anatomica.

Contestualmente nei due siti più gravemente danneggiati di Tschötsch e di Schrambacher Leiten si è proceduto al campionamento del suolo, secondo due profili per sito ed a 6÷8 differenti livelli di profondità (fino a 110 cm), per l'esame dei necessari parametri fisici (Fig. 6).



Fig. 6a
Prelievo di un campione per la determinazione dei parametri fisici del suolo.
Soil sampling for the analysis of the soil physical properties.



Fig. 6b
Profilo del suolo presso l'area sperimentale di Tschötsch.
Soil profile at the Tschötsch experimental site.

In dettaglio le indagini svolte.

Tab.2

Dr. Alessandro Cescatti CEA- Centro di Ecologia Alpina I 38040 Viote del Monte Bondone (TN)	- analisi storica del bilancio idrico dei 4 siti di indagine secondo il modello di Newhall (Soil Taxonomy) per la classificazione dei regimi termici e udometrici dei suoli; - definizione di un indice di stress idrico mensile a partire dai dati di deficit idrico e stress termico, sulla base delle serie storiche di dati meteorologici e della capacità di ritenzione idrica dei suoli campionati presso alberi deperiti.
Dr. Paolo Cherubini Forest Ecosystems and Ecological Risks Swiss Federal Institute for Forest, Snow & Landscape Research (WSL) Zuercherstrasse 111 CH-8903 Birmensdorf Matthias Saurer, Rolf Siegwolf Paul Scherrer Institut CH - 5232 Villigen PSI	- Indagini dendrocronologiche: analisi di ampiezza anulare negli alberi campione; - analisi anatomica del legno mediante analisi di immagini (<i>Image analysis</i>); - analisi della composizione isotopica (^{12}C, ^{13}C e ^{18}O), separatamente per il legno primaverile ed estivo di ciascun anello di accrescimento quale indicatrice della conduttanza stomatica e dell'efficienza d'uso idrico (WUE - Water Use Efficiency) nel passato.
Dipl. Ing. Dr. Gerhard Markart Bundesamt und Forschungszentrum für Wald Institut für Lawinen- und Wildbach- forschung Rennweg 1 – Hofburg A-6020 Innsbruck	- classificazione del tipo di suolo (FAO, Soil Taxonomy); - Analisi delle seguenti proprietà fisiche del suolo su due profili per sito e 6/8 livelli: - capacità di ritenzione idrica (Available Water Capacity): pF 2,7 – 4,2 - granulometria/tessitura.
Dr. Klaus Hellrigl esperto entomologo, consulente per il settore tutela boschiva Wolkensteinstraße 83 I - 39042 Bressanone/Brixen	- indagine fitopatologia e valutazione fitosanitaria.
p.i. Claudio Mutinelli Provincia Autonoma di Bolzano – Ufficio Idrografico Via Mendola 33 I - 39100 BOLZANO	- database climatologia.
Dr. Stefano Minerbi Provincia Autonoma di Bolzano - Ripartizione Foreste Via Brennero 6 I - 39100 Bolzano	- lineamenti vegetazionali; - coordinamento del lavoro e sintesi dei risultati

2.4 Meteorologia e climatologia

Per l'analisi climatica sono stati utilizzati i dati di temperatura media mensile e di precipitazione mensile delle stazioni meteorologiche di

Bolzano/Bozen e di Bressanone/Brixen (Tab.3). I dati sono stati forniti dall'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano.

Tab. 3

Localizzazione geografica delle stazioni utilizzate per l'analisi climatica e periodo storico per il quale vi sono dati disponibili. — *Location of the meteorological stations used for the climate analysis and periods for which meteorological data are available.*

Stazione Site	Quota (m) Elevation	Coord Est (m)	Coord. Nord (m)	Temperatura Temperature	Precipit. Rain
Bolzano/Bozen	254	677493.7764	151961.1372	1926-2003	1921-2003
Bressanone/Brixen	560	703916.9644	177237.3594	1956-2003	1921-2003

Le serie storiche utilizzate presentano le seguenti interruzioni:

Bolzano/Bozen 1944-1948

Bressanone/Brixen 1969-1971

I dati mancanti non sono stati sostituiti con dati interpolati onde evitare di contaminare le serie storiche con dati non misurati.

2.5 Il bilancio idrologico (modello di Newhall)

I dati meteorologici e pedologici sono stati utilizzati per ricostruire la serie storica del bilancio idrologico dei siti di indagine.

A tale fine è stato utilizzato il modello idrologico sviluppato da NEWHALL (1972), attualmente utilizzato dalla *Soil Taxonomy* degli Stati Uniti per la classificazione dei regimi termo-udometrici dei suoli. Il modello presenta un passo di calcolo mensile e può essere quindi utilizzato su serie storiche di dati medi mensili, come quelle disponibili per i siti in esame.

Il modello simula la distribuzione dell'acqua nel suolo mediante un profilo di umidità che si estende dalla superficie fino alla profondità che garantisce una capacità di ritenzione idrica pari a 200 mm. Il modello è comunque in grado di simulare il comportamento idrico di suoli con capacità di ritenzione inferiore ai 200 mm, utilizzando solo una parte del profilo di umidità.

La situazione idrica del profilo del suolo viene rappresentata mediante un diagramma di umidità costituito da una matrice quadrata di elementi ognuno dei quali dotato di una capacità di ritenzione pari a 0.78 mm. Ai singoli elementi della matrice vengono attribuiti due stati: condizione di completa idratazione e di completa disidratazione. Il modello tiene in considerazione l'aumento di energia (in termini di evaporazione potenziale) necessario per estrarre umidità dal suolo a seguito del suo progressivo inaridimento, attribuendo ai singoli elementi della matrice un "potenziale" in

base alla loro posizione. Tale "potenziale" rappresenta il numero di unità di evaporazione potenziale necessarie per fare evaporare una unità di umidità e varia da 1 a 5.

Il modello di Newhall richiede i seguenti dati di input:

- dati meteorologici (valori mensili di temperatura media e precipitazione);
- dati topografici (latitudine, altitudine, pendenza, esposizione);
- dati pedologici (massimo contenuto di acqua disponibile del suolo, AWC).

In output il modello fornisce le stime delle seguenti variabili:

- evapotraspirazione potenziale;
- evapotraspirazione reale;
- deficit idrico;
- riserve idriche del suolo;
- surplus idrico.

La richiesta evaporativa dell'atmosfera (evaporazione potenziale) è calcolata in base al carico radiativo (da dati topografici) ed alla temperatura secondo l'algoritmo di THORNTHWAITE & MATHER (1955). L'evaporazione reale del sito è stimata a partire dall'evaporazione potenziale e dallo stato idrico del suolo. Una descrizione dettagliata del modello idrologico utilizzato per l'analisi è presentata in CESCATTI (1992).

Il modello è stato applicato utilizzando le serie di dati meteorologici di Bolzano e Bressanone e le informazioni raccolte con le indagini pedologiche presso i siti di Tschötsch e Schrambacher Leiten.

2.6 Indagini dendrocronologiche

2.6.1 Misura delle ampiezze anulari

I campioni sono stati preparati in laboratorio come in precedenza descritto. Per le sezioni trasversali sono state considerate due direzioni radiali opposte. Alcune misurazioni sono state ripetute più volte.

2.6.2 Sincronizzazione (cross-dating) e datazione

Il metodo del cross-dating presuppone la corrispondenza fra l'andamento delle curve di accrescimento (dato periodico relativo) di alberi cresciuti in analoghe condizioni stazionali in relazione a clima, posizione sociale, etc.

Escludendo quindi gli individui morti e considerando che tutti gli alberi abbiano completato la cerchia di accrescimento dell'anno 2003 (essendo stato effettuato il prelievo nell'inverno 2003/2004), questi può essere preso a riferimento comune per le comparazioni delle singole curve accrescimentali. Un ulteriore ausilio viene fornito dai cosiddetti "anni caratteristici", ovvero anni in cui l'accrescimento della maggior parte degli alberi si differenzia sensibilmente dagli accrescimenti degli anni precedenti o seguenti. Queste brusche variazioni del dato accrescimentale radiale si manifestano con cerchie annuali più larghe, per anni caratteristici positivi, o più strette, per anni caratteristici negativi (SCHWEINGRUBER 1983).

La corrispondenza fra queste sequenze di cerchie annuali consente l'allineamento (sincronizzazione) delle curve accrescimentali di alberi diversi per un

comune intervallo di tempo. Dalla sovrapposizione e dal confronto visivo dei plots di singole curve, selezionate per qualità e significatività e poste su un tavolo luminoso (cross-dating), si ottiene una curva media provvisoria e di riferimento per la sincronizzazione di ulteriori curve, dalle quali viene a sua volta integrata e consolidata.

Previo correzione di eventuali errori di misurazione riconducibili ad errori o ad annate con condizioni estremamente sfavorevoli alla crescita (es. falsi anelli o anelli mancanti - CHERUBINI *et al.* 2002), il software TSAP elabora una curva media standard ed i relativi parametri statistici correlati: *coefficiente di coincidenza, t di Student, il periodo di sovrapposizione, l'attendibilità statistica* (SCHWEINGRUBER 1983).

2.6.3 Analisi anatomica del legno mediante analisi di immagini (*Image analysis*)

Per ciascuna cerchia di accrescimento annuale viene misurata l'area effettiva del lume delle tracheidi e delle pareti cellulari.

L'immagine della sezione trasversale digitalizzata ed ingrandita al binoculare, appositamente calibrato per ottenere le superfici in mm², viene dapprima convertita a monitor nella scala dei grigi, quindi analizzata mediante il programma di analisi di immagini *Pro Image Plus*, in grado di differenziare tra le pareti cellulari (scure) ed il lume delle trachee (chiaro).

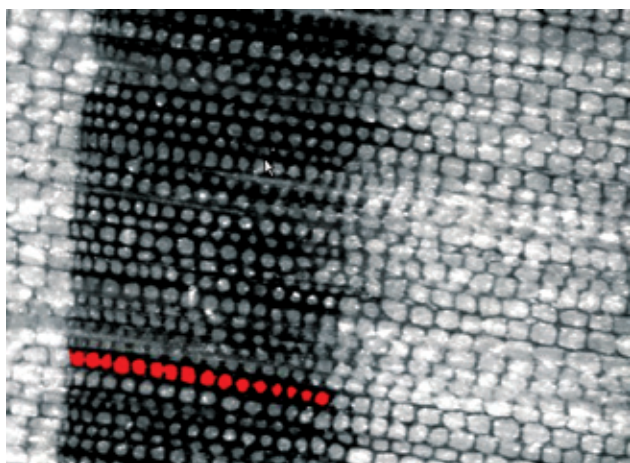


Fig. 7

Tracheidi del legno tardivo (scuro) e del legno primaverile (chiaro) di *Pinus sylvestris*
Tracheids in late wood (dark) and in early wood (light) of Pinus sylvestris

2.7 Ecofisiologia: analisi degli isotopi stabili del carbonio e dell'ossigeno

Per la prima volta in Alto Adige si è fatto ricorso ad una metodologia innovativa già ampiamente applicata negli studi di ecofisiologia vegetale, la quale considera la composizione degli isotopi stabili del carbonio e dell'ossigeno (senza decadimento radioattivo) nei tessuti vegetali.

La discriminazione isotopica consente l'accertamento, tramite l'analisi a livello di singolo anello di accrescimento legnoso, degli effetti di stress ambientali sulla conduttanza stomatica, sui processi fotosintetici e traspirativi, sull'assunzione del carbonio e sull'efficienza d'uso dell'acqua durante l'intera esistenza della pianta. Questa metodica è indicata soprattutto per l'accertamento di flussi e scambio di sostanze tra l'ambiente e gli ecosistemi, in particolare nello studio dei cicli biogeochimici del carbonio, dell'acqua e dei nutrienti.

Le variazioni isotopiche negli anelli di accrescimento legnoso hanno il vantaggio, rispetto ad altri approcci metodologici, di limitare ad un ristretto numero i diversi fattori coagenti.

Si ottengono inoltre informazioni sulle condizioni del suolo e dell'aria a livello stazionario (TREYDTE *et al.* 2001), come pure sulle fluttuazioni termiche e sulle variazioni del contenuto atmosferico di anidride carbonica (SAURER *et al.* 2003). Così ad esempio il contenuto di ^{13}C nei tessuti vegetali viene influenzato in primo luogo dalle disponibilità idriche per la vegetazione, ovvero dal contenuto di umidità dell'aria circostante (SIEGWOLF & SAURER 2000).

Il materiale da analizzare è stato opportunamente preparato presso il WSL (Birmensdorf, Svizzera),

in modo da permettere il confronto fra il rapporto isotopico di ciascuna cerchia annuale di accrescimento legnoso e la serie storica dei dati climatici, adottando la "tecnica del pooling". Questa fornisce un valore isotopico medio annuo, aggregato per gruppi di piante (morte e vive), come se si fossero misurati separatamente i campioni dei singoli alberi e solo successivamente si fosse calcolata la media. Ciò consente di ridurre sensibilmente i tempi di analisi, ma di non poter definire la deviazione standard di ogni singolo valore.

Prima dell'analisi si è proceduto dunque alla separazione fisica degli anelli (distinti fra legno primaverile e tardivo) di ciascun albero campione con l'ausilio di un microscopio binoculare (Leica, WILD M3Z). In taluni casi tale separazione non è stata possibile a causa dei ridottissimi accrescimenti, nel qual caso sono state tralasciate le rispettive annate o l'intero campione.

Per ciascuna area di saggio i singoli campioni di legno primaverile e tardivo dello stesso anno sono stati poi riuniti in un unico campione per l'insieme degli alberi vivi e per quelli disseccati rispettivamente. Questo è stato quindi finemente macinato con un mulino ad ultracentrifuga tipo ZM 1 (Retsch) dotato di setaccio a maglie di 0.5 mm.

Le analisi isotopiche mediante spettrometria di massa sono state effettuate presso il Paul Scherrer Institut (Villigen, Svizzera): piccoli cilindri di stagno sono stati dapprima riempiti con 0.6-0.8 mg di ogni campione quindi pesati e ben sigillati.

Le schede in appendice illustrano brevemente la tecnica ed i principi alla base della metodologia.

3 Risultati

3.1 Analisi Pedologica

Le informazioni relative ai parametri fisici di tessitura e porosità dei suoli forestali, di fondamentale importanza per la caratterizzazione delle relazioni idriche e la definizione del bilancio idrologico dei siti, e più in particolare del rapporto tra il potenziale e il contenuto idrico, sono state acquisite mediante il campionamento pedologico più sopra descritto presso le aree di Tschötsch e di Schrambacher Leiten.

Ambedue le aree sono caratterizzate da terreni in pendice, a tratti terrazzati, mediamente profondi con presenza di detriti di pendice (sfasciume) ed affioramenti del sottostante substrato geologico a Quarzofillite di Bressanone.

La tipologia dei suoli esaminati è sostanzialmente omogenea per i due siti: trattasi di terre brune, tendenzialmente moderiformi a Schrambacher Leiten, ascrivibili all'*Oxisol-group* (US-Soil Taxonomy), ovvero al *Cambisol* (classificazione FAO).

Mentre a Tschötsch è presente un anphimull, a Schrambacher-Leiten lo strato umifero è più orientato verso il moor.

Riguardo alla distribuzione volumetrica delle frazioni del suolo, il sito di Schrambacher Leiten presenta una maggiore pietrosità (38% contro il 23% di Tschötsch), abbondante fin dagli orizzonti superficiali. L'elevata forte pietrosità del sito di Schrambacher Leiten ne riduce la porosità (24% contro il 41% di Tschötsch), e quindi la capacità di ritenzione idrica.

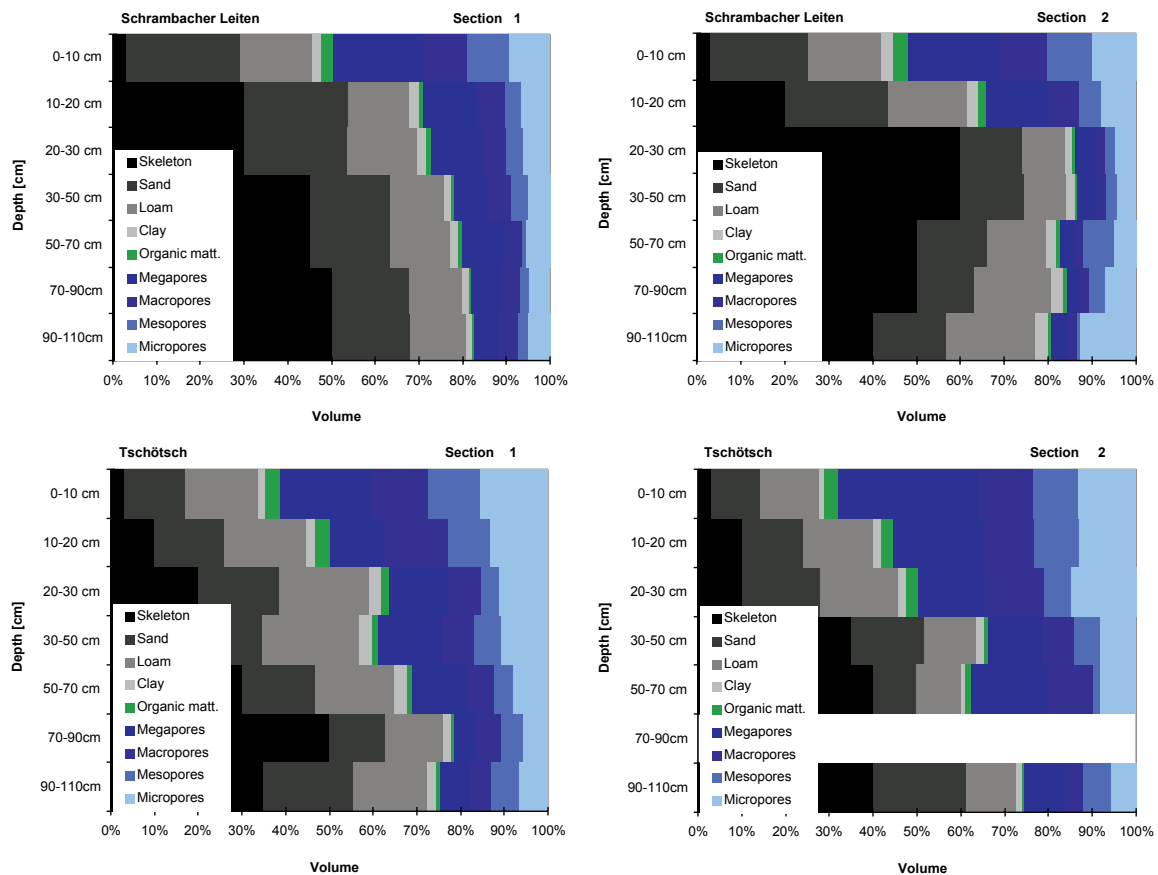


Fig.8

Distribuzioni volumetriche delle frazioni del suolo nei due siti d'indagine di Schrambacher Leiten e Tschötsch. — *Distribution in size classes of soil volume fractions in the two experimental areas of Schrambacher Leiten e Tschötsch*

Fig. 9

Distribuzioni di frequenza della tessitura e della porosità dei suoli nei due siti di studio (valori medi dei due profili rilevati per ogni sito). La ricchezza di limo nel sito di Tschötsch spiega la maggiore abbondanza di macro e mesopori nei suoli di quest'area.

Frequency distribution of soil texture and porosity in the two experimental plots (averages of two profiles are shown). The richness in silt at Tschötsch justifies the abundance of macro and mesopores in this area.

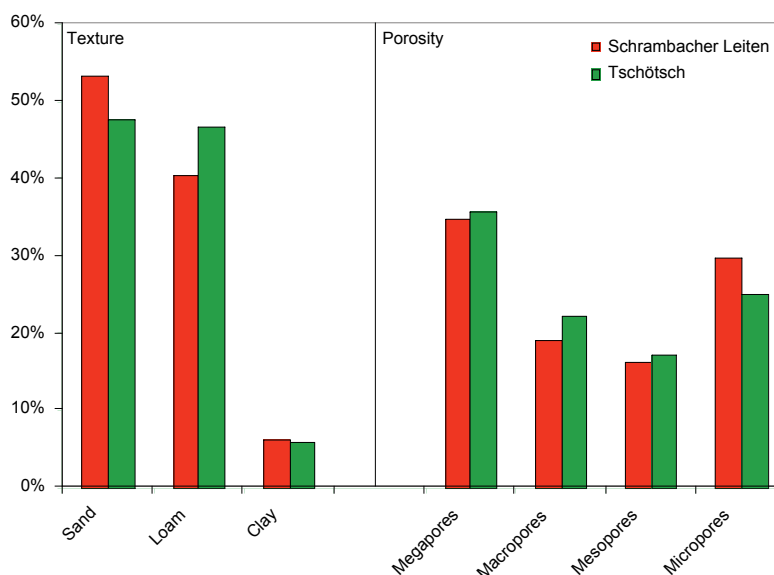
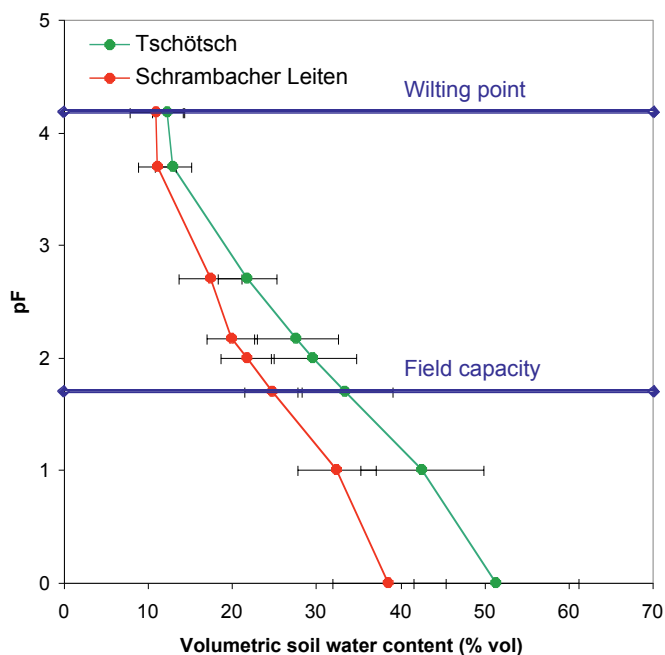


Fig. 10

Andamento del contenuto volumetrico d'acqua al variare del pF (valori medi $\pm$ dev. st) per i due siti di indagine. Grazie al minor contenuto di scheletro e alla migliore granulometria (cfr. Fig. 9), il sito di Tschötsch presenta un contenuto volumetrico d'acqua superiore al sito di Schrambacher Leiten.

Relationship between soil water content and soil water potential (pF, avg $\pm$ st.dev) in the two experimental plots. Thanks to the lower rock content and good texture (Fig. 9) the Tschötsch site shows a higher water holding capacity than Schrambacher Leiten.



L'acqua disponibile per la vegetazione è quella trattenuta dal suolo con un potenziale compreso tra la capacità di campo (pF 1.7) e il punto di appassimento (4.2). In termini volumetrici questa è risultata pari al 21,2% del volume del suolo per il sito di Tschötsch e del 13,8% per il sito di Schrambacher Leiten, pari

rispettivamente al 63% e al 55% della capacità di campo. La percentuale più elevata della capacità di campo disponibile per l'assorbimento radicale nel sito di Tschötsch è dovuta alla tessitura più ricca di limo, che consente una maggiore abbondanza di macro e mesopori (cfr. Fig. 9).

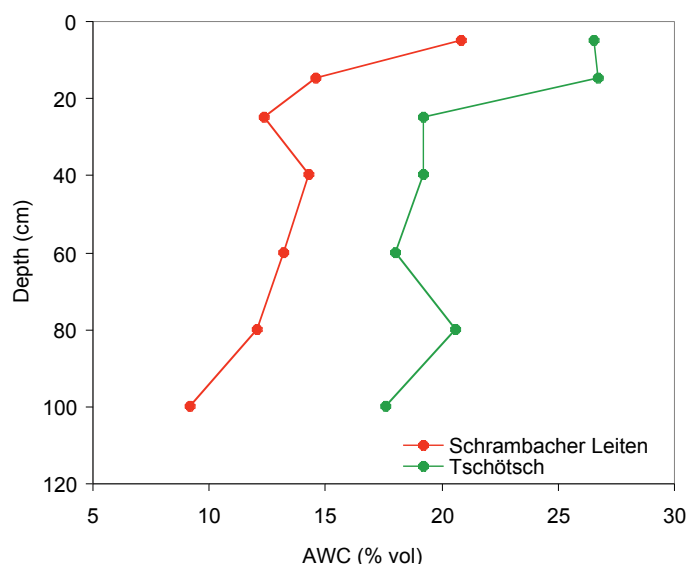


Fig. 11
 Profilo verticale del contenuto volumetrico di acqua disponibile, ovvero dell'acqua trattenuta dal suolo con potenziale compreso tra la capacità di campo (pF 1.7) e il punto di appassimento (pF 4.2) (Available Water Capacity AWC). Vertical profile of available water capacity (AWC) in a range of potential between the field capacity (pF 1.7) and the wilting point (pF 4.2)

Utilizzando i dati del profilo verticale di contenuto volumetrico di acqua disponibile (AWC) riportati in Fig. 13 si sono calcolati i valori di AWC cumulati sull'intero profilo (Tab.4) in mm di acqua. Come

si nota, il suolo del sito di Tschötsch può disporre di riserve idriche massime pari a **203 mm** contro i **146 mm** di Schrambacher Leiten.

Tab. 4

Valori di acqua disponibile (AWC in mm) osservata nei singoli profili delle due aree di indagine.

Values of Available Water Capacity (AWC) observed in the two experimental plots.

Aree di studio <i>Experimental sites</i>	Profilo 1 <i>Profile 1</i>	Profilo 2 <i>Profile 2</i>	Media <i>Average</i>
Tschötsch	216.62	189.26	202.94
Schrambacher Leiten	152.54	138.56	145.55

3.2 Analisi Climatica

L'estate del 2003 è stata caratterizzata da ondate di calore prolungate ed estese a tutto il continente europeo, accompagnate da precipitazioni alquanto limitate che hanno portato a siccità diffuse. L'eccezionalità di questo evento climatico per la climatologia della provincia di Bolzano è stata valutata utilizzando i dati registrati presso la stazione meteorologica di Bolzano, che presenta la serie storica più lunga (1926-2003) tra le stazioni

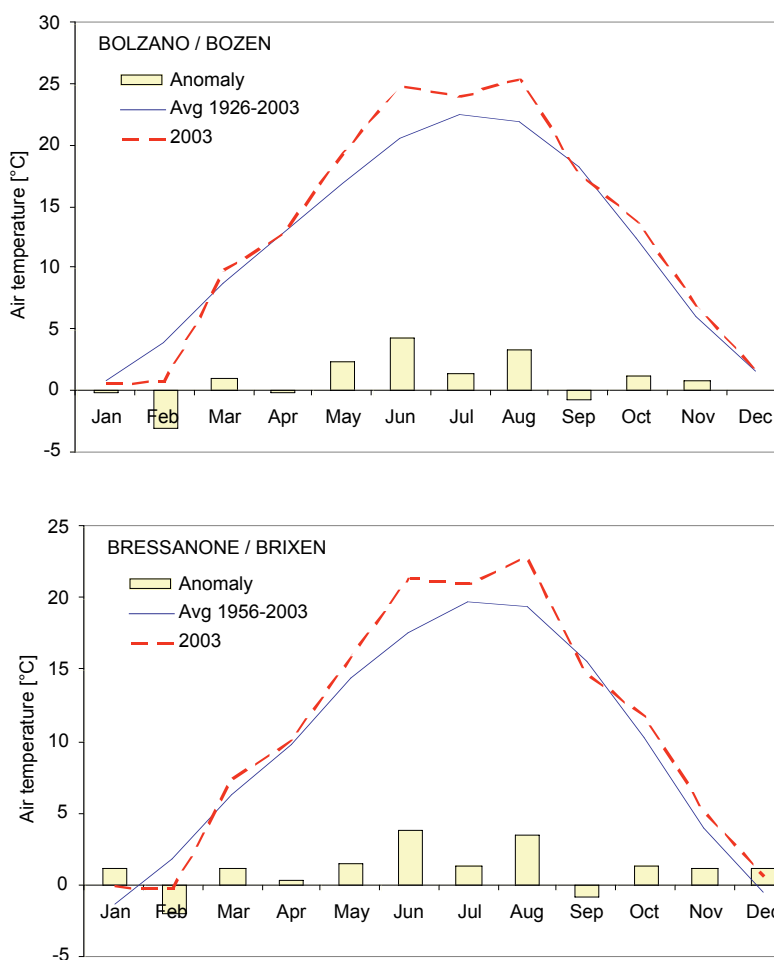
prossime all'area di studio, e della stazione di Bressanone, prossima ai popolamenti deperienti. Dal confronto delle temperature mensili medie del 2003 con la media di lungo periodo (Fig. 12) si nota una forte anomalia termica di 1.5 -4.4 °C durante i mesi estivi. Oltre alla particolare intensità dell'anomalia termica, va notata inoltre la sua durata (quattro mesi da maggio ad agosto).

Fig. 12

Andamento della temperatura mensile media del periodo 1926-2003 e della temperatura del 2003 per la stazione meteorologica di Bolzano e del periodo 1956-2003 per la stazione di Bressanone.

Le barre in giallo evidenziano l'entità dell'anomalia termica, che nei mesi da Maggio ad Agosto è variata da 1.5 a 4.4 °C.

Trends of montly mean temperatures in the period 1926-2003 and of the year 2003 for the meteorological station of Bolzano, and of the period 1956-2003 for the meteorological station of Bressanone. Yellow bars show the 2003 temperature anomaly than during May-August varied between 1.5 and 4.4 °C.



Dall'analisi della serie storica, il periodo maggio-agosto del 2003 è risultato il più caldo da quando sono iniziate le registrazioni dei dati meteorologici sia presso la stazione di Bolzano che quella di Bressanone (Fig. 13, 14). Dall'ordinamento delle annate più calde appare inoltre evidente il forte

aumento delle temperature estive nell'ultimo decennio, tanto che a Bolzano otto dei tredici anni più caldi dal 1926 ed a Bressanone dieci dei quindici anni con estati più calde dal 1956 si collocano nel periodo 1993-2003.

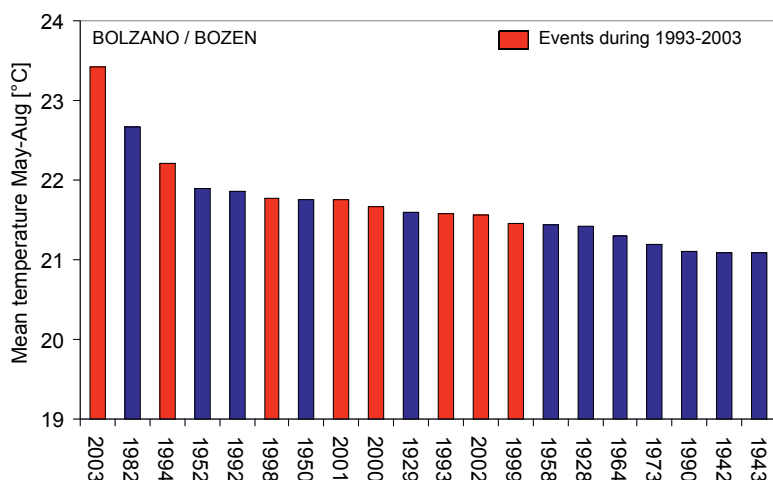


Fig. 13

Ordinamento decrescente degli anni 1926-2003 per temperatura media del periodo Maggio-Agosto per la stazione meteorologica di Bolzano. Otto dei tredici anni più caldi dal 1926 ricadono nell'ultimo decennio (barre in rosso).

Sorting of years between 1926 and 2003 for the mean temperature of the period May-August at the meteorological station of Bolzano. Eight out of the thirteen warmer years since 1926 happened in the last decades (red bars).

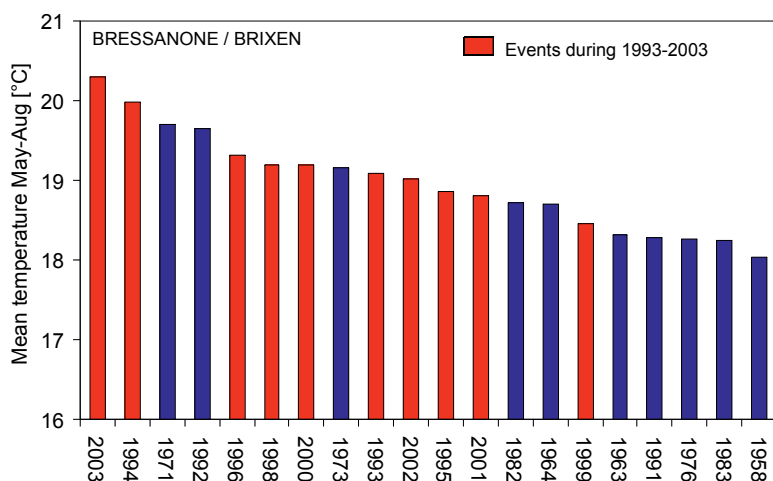


Fig. 14

Ordinamento decrescente degli anni 1956-2003 per temperatura media del periodo Maggio-Agosto per la stazione meteorologica di Bressanone. Dieci dei quindici anni più caldi dal 1956 ricadono nel decennio 1993-2003.

Sorting of years between 1956 and 2003 for the mean temperature of the period May-August at the meteorological station of Bressanone. Ten out of the fifteen warmer years since 1956 happened in the last decades (red bars).

Le condizioni termiche durante il periodo più importante per la crescita degli alberi (Maggio-Agosto) sono quindi sostanzialmente cambiate nell'ultimo decennio.

I valori mensili riportati in Fig. 15 evidenziano come le precipitazioni estive 2003 siano state sotto la media per entrambe le stazioni di Bolzano e

Bressanone, con la sola eccezione del mese di luglio. Complessivamente nel periodo maggio-agosto le precipitazioni del 2003 sono risultate solo il 65 % della precipitazione media, seguite da un mese di settembre particolarmente arido (precipitazioni pari al 16 % della media).

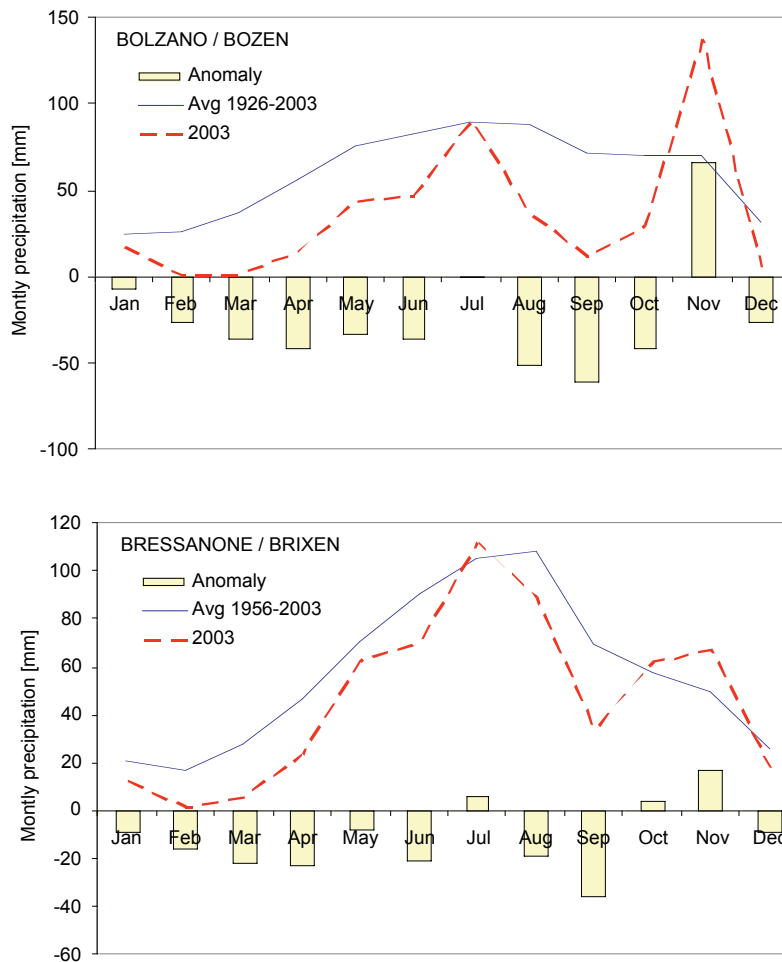


Fig. 15

Andamento delle precipitazioni mensili nel periodo 1926-2003 e delle precipitazioni del 2003 per la stazione meteorologica di Bolzano e del periodo 1956-2003 per la stazione di Bressanone. Le barre in giallo evidenziano l'entità dell'anomalia, che nei mesi da Maggio ad Agosto è variata da -50 a 1 mm. Complessivamente nel 2003 sono caduti a Bolzano 439mm di pioggia contro una media di 724mm, pari ad una riduzione del 40 % e 560mm contro una media di 690mm a Bressanone.

Trends of the mean monthly precipitation for the period 1926-2003 and of the monthly precipitation of 2003 at the meteorological station of Bolzano and for the period 1956-2003 at the station of Bressanone. Yellow bars show the 2003 precipitation anomaly, which varied from -50 to 1 mm during May-August. Precipitation at Bolzano in 2003 was 439mm in comparison with a long term average of 724mm (reduction of 40%), and of 560mm in comparison with an average of 690mm at Bressanone.

A Bolzano l'estate 2003 è risultata essere quindi la seconda più arida da quando sono iniziate le registrazioni, mentre a Bressanone è solo al quattordicesimo posto. A differenza di quanto osservato per la temperatura, l'ordinamento crescente delle estati piovose riportato in Fig. 16 e 17 mostra che

l'ultimo decennio non è stato caratterizzato da estati particolarmente aride. All'andamento generale di riscaldamento osservato nell'ultimo decennio si è quindi associata una tendenziale abbondanza di precipitazioni estive (progressiva oceanizzazione del clima).

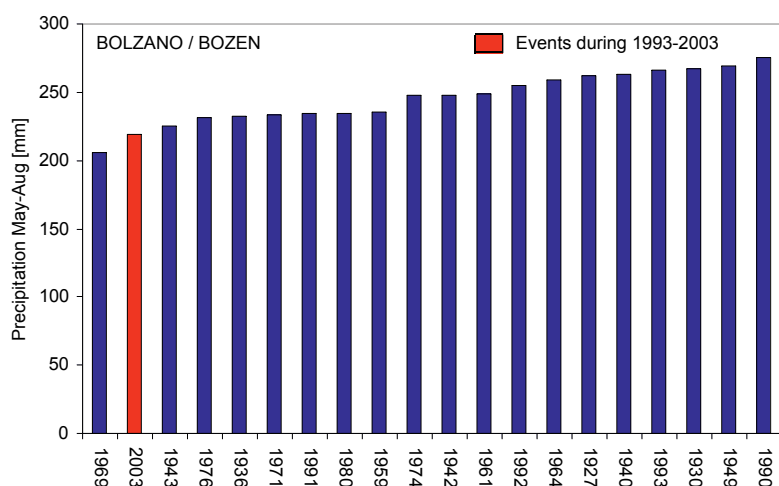


Fig. 16
Ordinamento crescente degli anni 1926-2003 per precipitazione nel periodo Maggio-Agosto per la stazione meteorologica di Bolzano. Solo il 2003 nell'ultimo decennio figura tra i 20 anni con le estati più aride (barra in rosso)
Sorting of years for the precipitation of the period May-August between 1926-2003 at the meteorological station of Bolzano. Only 2003 in the last decade falls within the 20 driest summers (red bar).

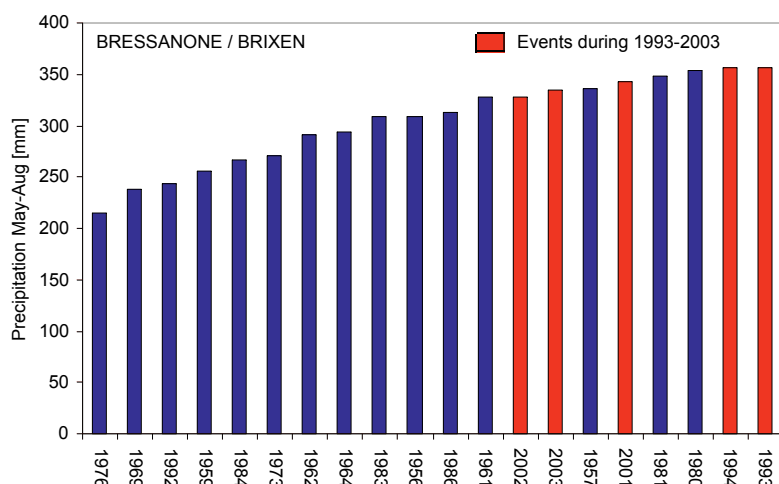


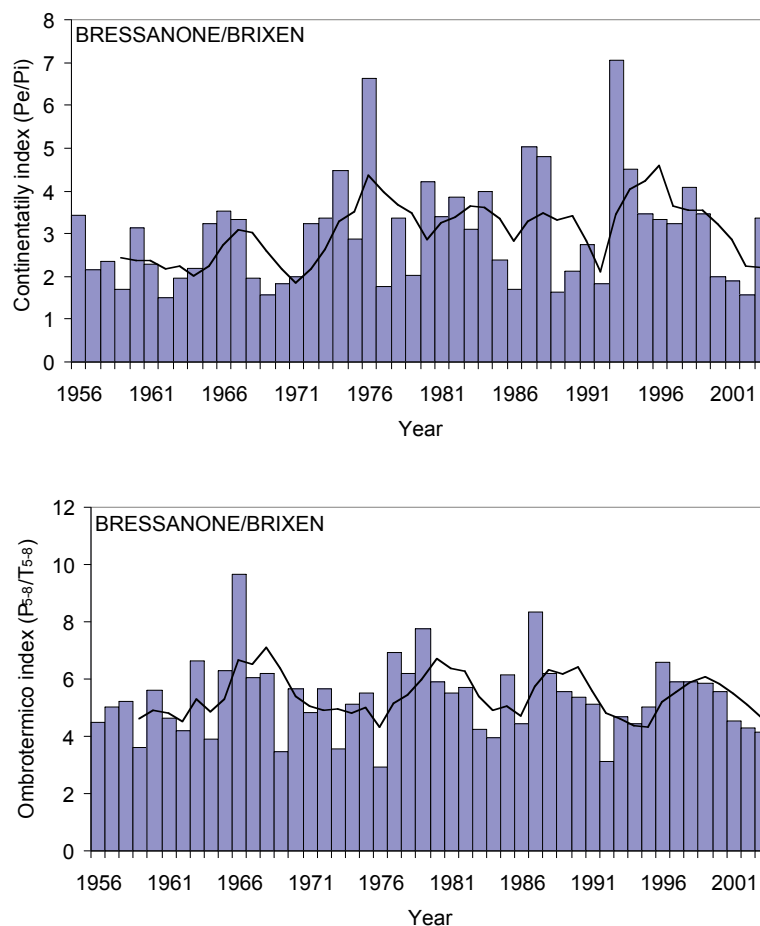
Fig. 17
Ordinamento crescente degli anni 1956-2003 per precipitazione nel periodo Maggio-Agosto per la stazione meteorologica di Bressanone.
Sorting of years for the precipitation of the period May-August between 1956-2003 at the meteorological station of Bressanone.

La variazione della distribuzione stagionale delle precipitazioni è stata esaminata utilizzando l'indice di continentalità pluviale, dato dal rapporto delle precipitazioni estive (maggio-ottobre) e delle precipitazioni invernali (novembre-aprile). L'indice viene interpretato ipotizzando una distribuzione prealpica per valori inferiori a 1.45, alpica nel range 1.45 - 2.25 ed endalpica per valori superiori a 2.25. Come si nota in Fig. 18, le precipitazioni nell'area di Bressanone variano da periodi con distribuzione tipicamente

endalpica ad altri con distribuzione prealpica. La serie storica mostra come gli anni '90 siano stati caratterizzati da una marcata "continentalità" della distribuzione delle precipitazioni, mentre i primi anni del 2000 presentino valori dell'indice tipici di una situazione prealpica. L'andamento della media mobile evidenzia inoltre che il passaggio tra queste due diverse distribuzioni sembra avere una tipica ciclicità circa decennale.

Fig. 18

Serie storica e media mobile di periodo quattro anni dell'indice climatico di continentalità e dell'indice ombrotermico per il periodo maggio-agosto.
Time series and moving averages (four year interval) of two climate indexes for the period May-August.



Il secondo indice climatico riportato in Fig. 18 è dato dal rapporto tra le precipitazioni e la temperatura media del periodo maggio-agosto. Questo rapporto definisce l'indice ombrotermico estivo di Rivas-Martinez (RIVAS-MARTINEZ 1990), e permette di rappresentare in maniera sintetica il rapporto tra la disponibilità idrica e la richiesta evaporativa. Valori dell'indice inferiori a 3.5 indicano clima xerico, mentre valori superiori a 6 indicano clima umido.

La serie storica riportata in Fig. 18 mette in evidenza come il 2003 sia stato il terzo anno consecutivo con un valore dell'indice inferiore a 4.5, mentre il decennio precedente è stato caratterizzato da un indice molto più elevato, tipico di climi subumidi. Questo indice conferma quanto è stato osservato dagli andamenti di temperatura e precipitazione,

ovvero che il 2003 è stato caratterizzato da un'estate eccezionalmente calda e arida, dopo un decennio di estati calde ma relativamente umide, grazie ad una distribuzione delle precipitazioni di tipo endalpico (massimo estivo).

Un'analisi più approfondita della climatologia delle aree interessate dal deperimento è stata sviluppata con l'applicazione del modello di bilancio idrologico di Newhall, in grado di simulare il processo evapotraspirativo e lo stato idrico del suolo.

In Fig. 19 viene riportato l'andamento storico nell'ultimo ventennio (1983-2003) delle principali variabili del bilancio, in particolare la temperatura media e la precipitazione estiva, e i valori simulati di deficit idrico ed evapotraspirazione reale nel periodo maggio-agosto.

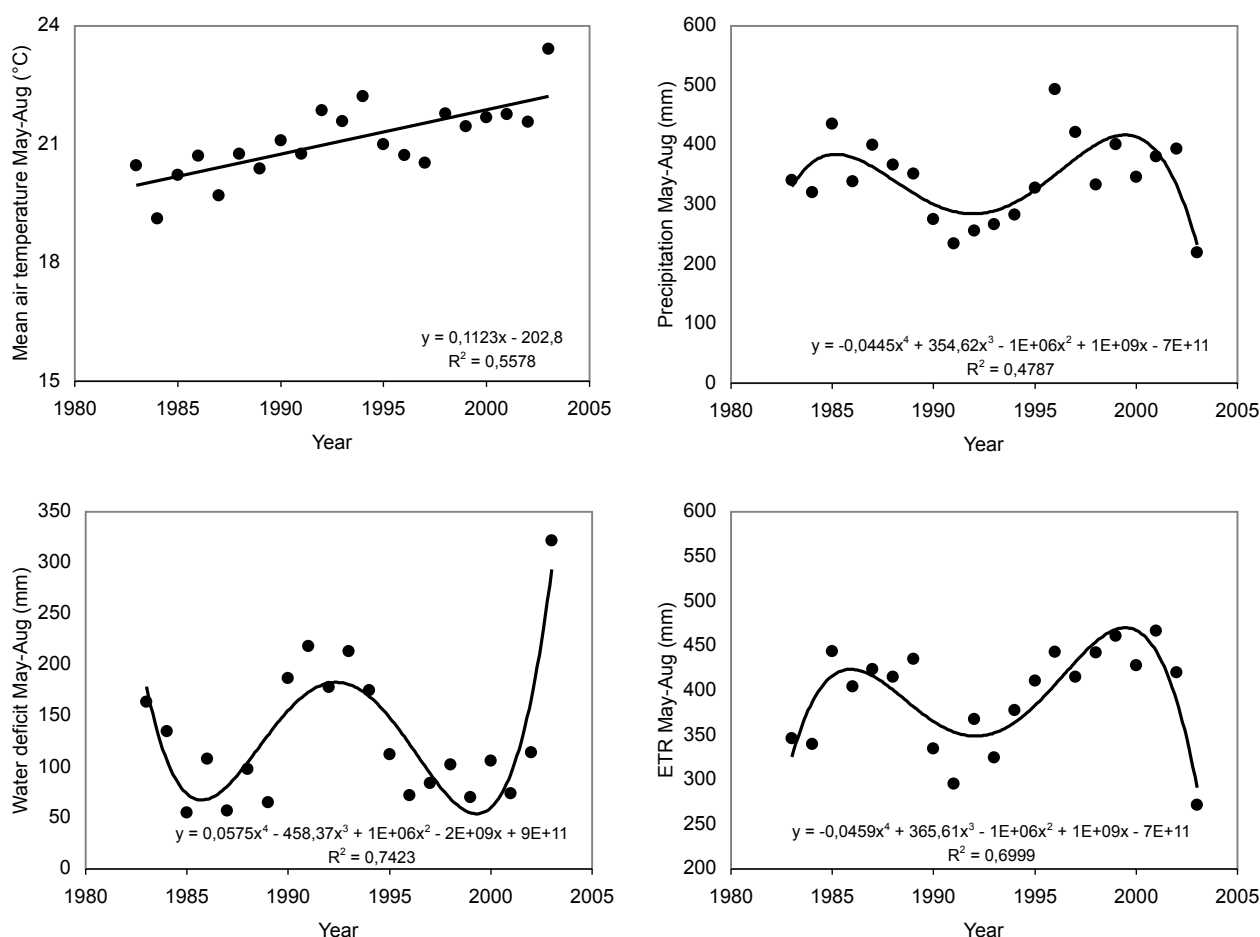


Fig. 19

Andamento storico di temperatura, precipitazione e variabili del bilancio idrologico nel ventennio (1983-2003) presso la stazione di Bolzano.

Time series of temperature, precipitation and parameters of the water balance during the period 1983-2003 at the meteorological station of Bolzano.

Il forte e significativo trend di aumento delle temperature estive del ventennio ($R^2=0.55$) unito ad un andamento ciclico della precipitazione estiva con un minimo all'inizio degli anni '90 e un secondo minimo nel 2003, ha generato una forte condizione di deficit idrico nei primi anni '90 e un evento di deficit idrico particolarmente intenso (circa 250 mm di pioggia) nel 2003.

Circa i potenziali effetti di questi periodi di stress idrico sullo stato fitosanitario delle formazioni

forestali, si deve ricordare che nelle Alpi i primi anni '90 sono stati caratterizzati da diffusi eventi di deperimento e da attacchi parassitari da imenotteri del genere *Cephalcia* e dal lepidottero *Lymantria monacha* (MARCHISIO, 1994).

Le Fig. 20-21 riportano il bilancio idrologico medio e quello del 2003 presso la stazioni di Schrambacher Leiten, calcolato sulla base dei risultati delle indagini pedologiche e utilizzando la serie meteorologica della stazione di Bolzano.

Dal confronto dei dati della Fig. 20 e della Fig. 21 appare evidente come mediamente la climatologia della stazione di Schrambacher Leiten sia in grado di garantire un apporto idrico estivo sufficiente a mantenere nel suolo riserve idriche superiori ai 40mm. Al contrario, durante il 2003 la carenza di precipitazioni primaverili ha determinato una forte riduzione delle riserve idriche fin dall'inizio dell'estate, quando le elevate temperature associate

alle scarse precipitazioni hanno determinato un disseccamento prolungato del suolo (luglio-ottobre). In questa situazione di estrema siccità solo gli individui arborei con apparati radicali maggiormente sviluppati entro fessure del suolo e con un rapporto più equilibrato tra apparati radicali e superfici fotosintetizzanti, sono riusciti a tollerare il forte stress idrico.

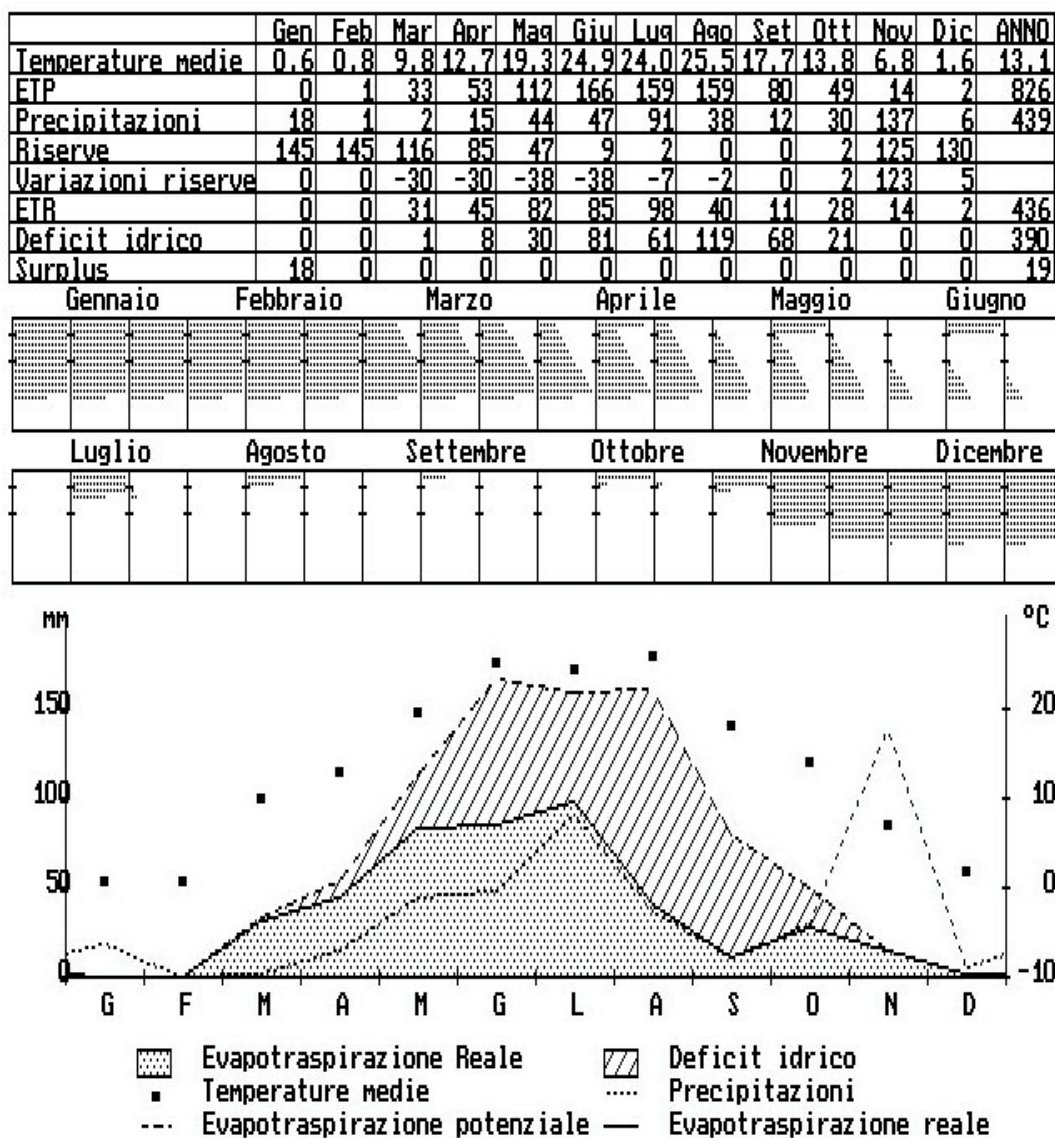


Fig. 21

Bilancio idrologico medio dell'anno 2003 per il sito di Schrambacher Leiten, sulla base della serie meteorologica della stazione di Bolzano. —

Water balance for the year 2003 at the Schrambacher Leiten experimental site, according to the meteorological data of Bolzano

La Fig.22 riporta i dati del bilancio idrologico medio della stazione di Schrambacher Leiten per il periodo 1956-2003 e la Fig. 23 il bilancio del 2003 utilizzando la meteorologia della stazione di Bressanone.

Il sito di Schrambacher Leiten in media non risulta interessato da forti stress idrici estivi e la sezione di controllo (area a massimo assorbimento radicale) del

profilo pedologico risulta sempre fornita di acqua. Nel 2003 il perdurare di un'alta esigenza evaporativa causata dall'alta temperatura ha portato al completo svuotamento della sezione di controllo nella tarda estate. Proprio la forte differenza nel regime idrico del suolo del 2003 dalla situazione media può aver portato al deperimento dei popolamenti di pino silvestre.

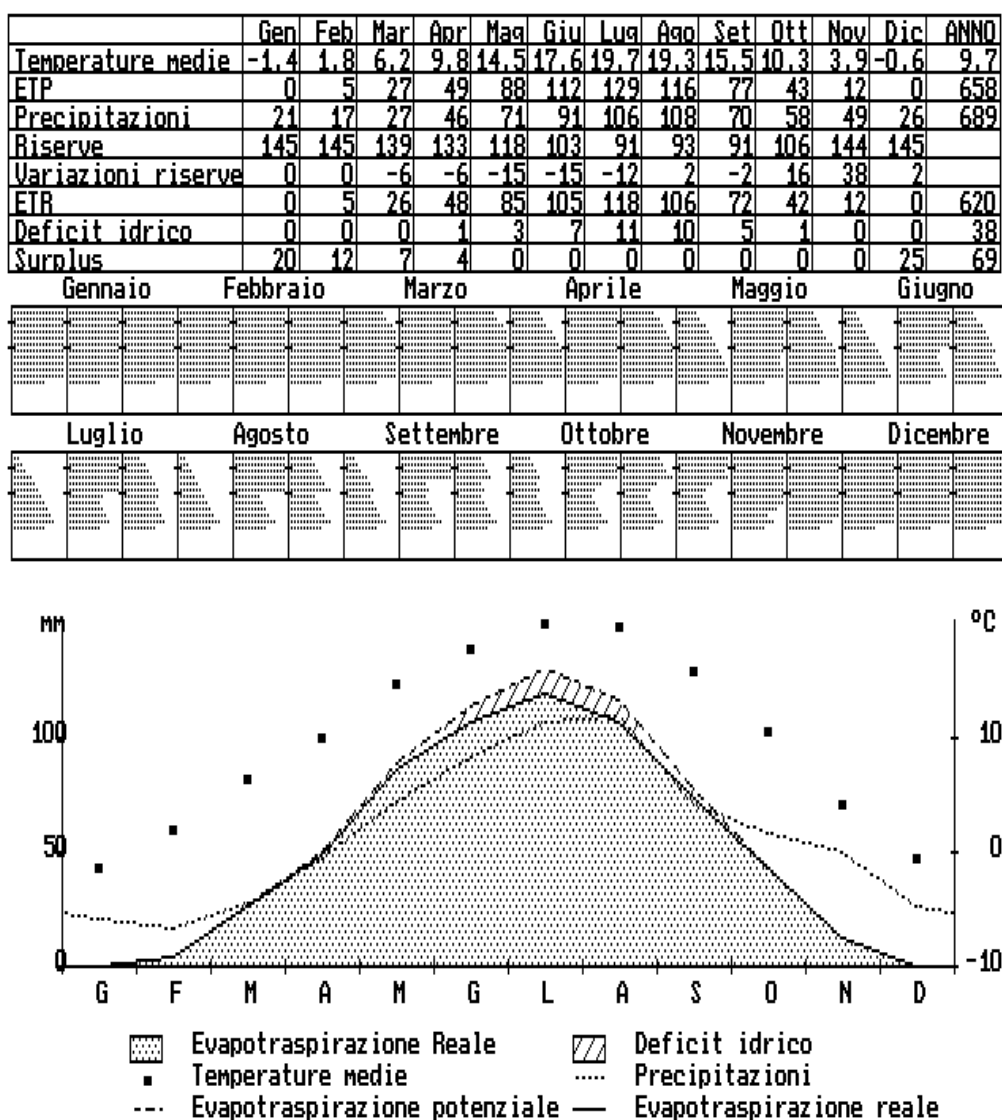


Fig.22

Bilancio idrologico medio del periodo 1956-2003 per il sito di Schrambacher Leiten, sulla base della serie meteorologica della stazione di Bressanone. —

Average water balance for the period 1956-2003 at the Schrambacher Leiten experimental site, according to the meteorological data of Bressanone.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mai	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	ANNO
Temperature medie	-0.1	-0.3	7.5	10.1	15.9	21.4	21.0	22.8	14.7	11.7	5.0	0.6	10.9
ETP	0	0	29	46	94	139	137	139	69	46	13	1	712
Precipitazioni	12	2	6	24	63	70	112	89	34	62	67	18	560
Riserve	145	145	123	104	83	47	50	33	22	44	98	114	
Variazioni riserve	0	0	-22	-20	-21	-36	3	-17	-11	22	54	16	
ETR	0	0	28	43	84	106	109	106	45	41	13	1	577
Deficit idrico	0	0	1	3	10	32	27	33	23	6	0	0	135
Surplus	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	15

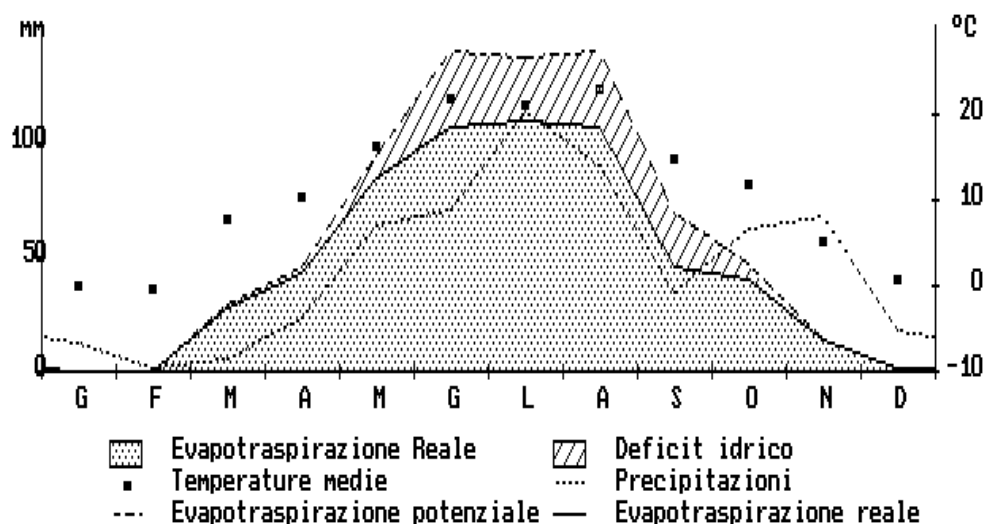
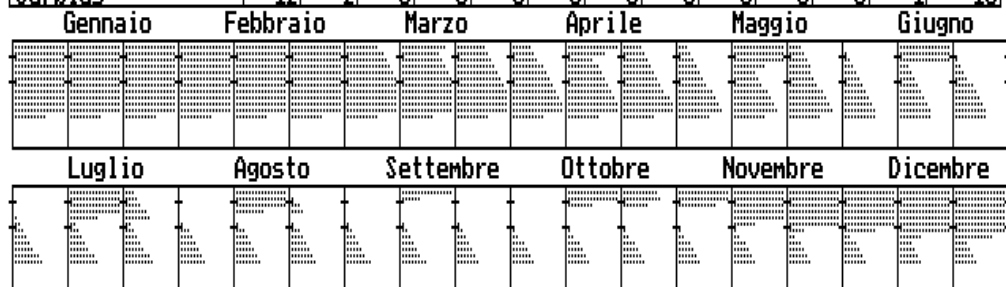


Fig.23

Bilancio idrologico medio dell'anno 2003 per il sito di Schrambacher Leiten, sulla base della serie meteorologica della stazione di Bressanone.

Water balance for the year 2003 at the Schrambacher Leiten experimental site, according to the meteorological data of Bressanone.

Il valore medio del deficit idrico (differenza tra l'evaporazione potenziale e l'evaporazione reale) osservato nel periodo 1926-2003 presso la stazione di Bolzano/Bozen e nel periodo 1956-2003 presso la stazione di Bressanone/Brixen è stato confrontato con il deficit osservato nel 2003 (Fig. 24). L'anomalia

tra la media di lungo termine e l'estate 2003 è di quasi 80 mm a giugno e agosto a Bolzano e di 18 mm a Bressanone, tanto da generare il valore di deficit idrico del periodo maggio-agosto più elevato da quando sono iniziate le registrazioni.

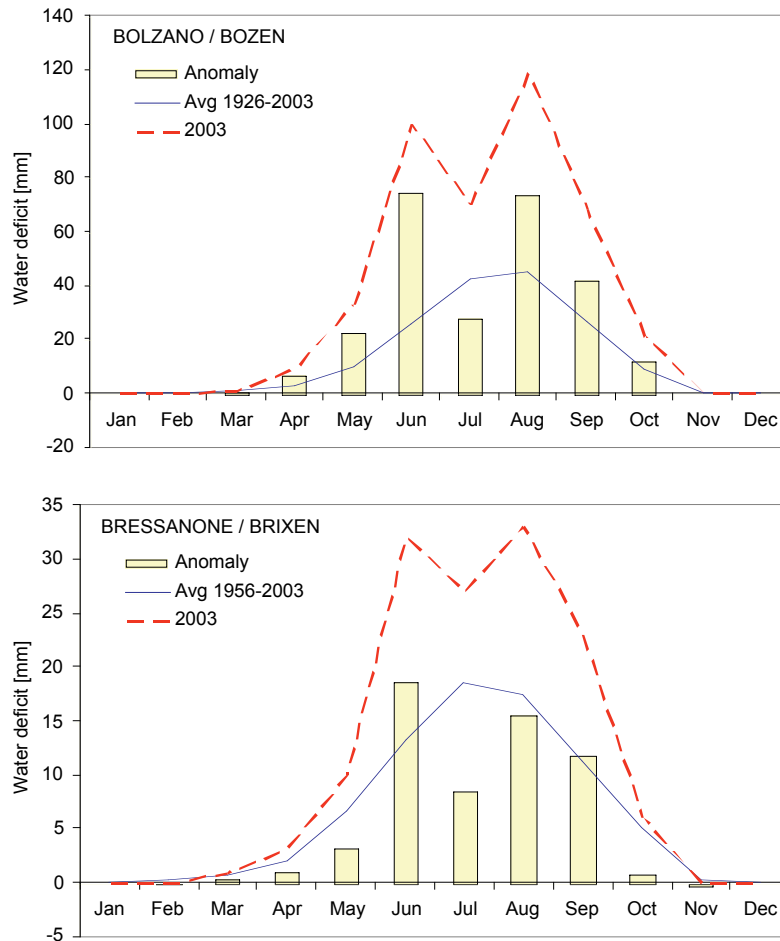


Fig.24

Andamento del deficit idrico medio nel periodo 1926-2003 e del deficit del 2003 per la stazione meteorologica di Bolzano e del periodo 1956-2003 per la stazione di Bressanone. Le barre in giallo evidenziano l'entità dell'anomalia, che nei mesi da Maggio ad Agosto è variata da 23 a 73 mm.

Trends of the mean monthly water deficit for the period 1926-2003 at the Bolzano station and for the period 1956-2003 at the Bressanone station. Yellow bars show the 2003 anomaly that, during May-August, ranged from 23 to 73 mm.

Dall'analisi della serie di Bolzano, ordinata secondo gli anni con valori di deficit idrico estivo più elevato dal 1926, oltre al 2003 solo il 1993 e il 1994 rientrano tra i venti anni più aridi nell'ultimo decennio. Questo dato conferma le osservazioni basate sui trend termici e pluviometrici e sugli indici climatici.

Il 2003 è stato caratterizzato da un deficit idrico molto forte che ha seguito un decennio di stagioni vegetative caratterizzate da una buona disponibilità idrica nonostante l'aumento tendenziale delle temperature estive (Fig. 26).

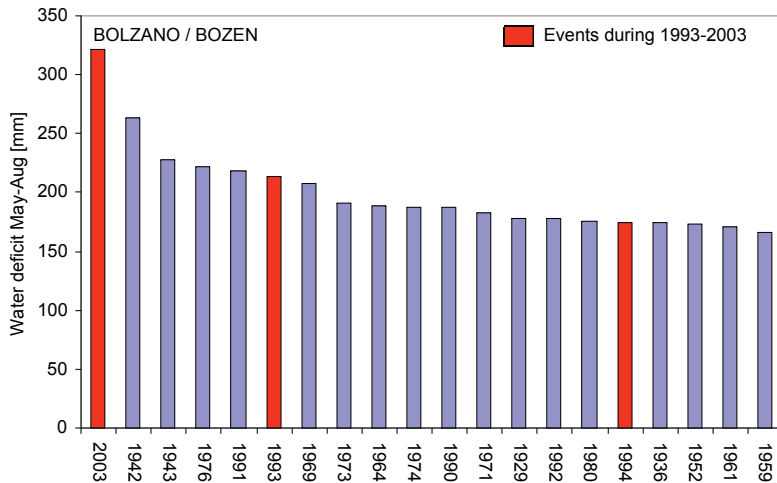


Fig.25

Ordinamento decrescente degli anni 1926-2003 per deficit idrico nel periodo Maggio-Agosto per la stazione meteorologica di Bolzano e degli anni 1956-2003 per la stazione di Bressanone. Il 2003 è risultato l'anno con l'estate più arida dal 1926 a Bolzano (-322 mm) e la quinta più arida dal 1956 a Bressanone. *Sorting of the year 1926-2003 for decreasing water stress in the period May-August at the Bolzano station and of the year 1956-2003 at the Bressanone station. 2003 was the driest year since 1926 at Bolzano (-322 mm) and the fifth driest year since 1956 at Bressanone.*

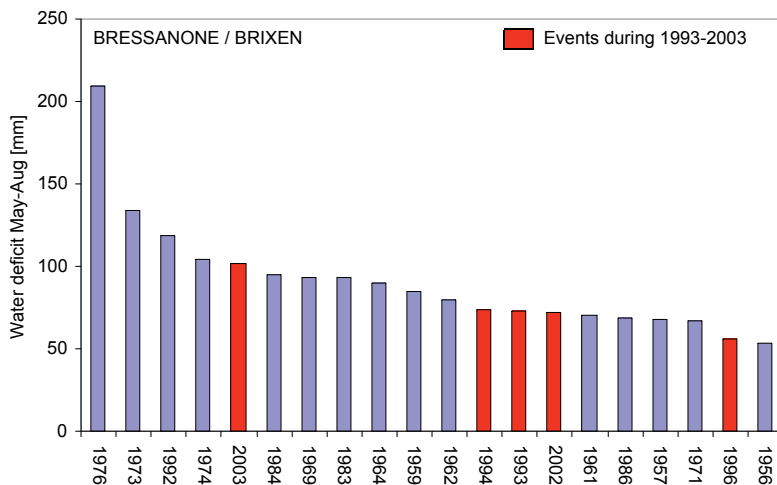
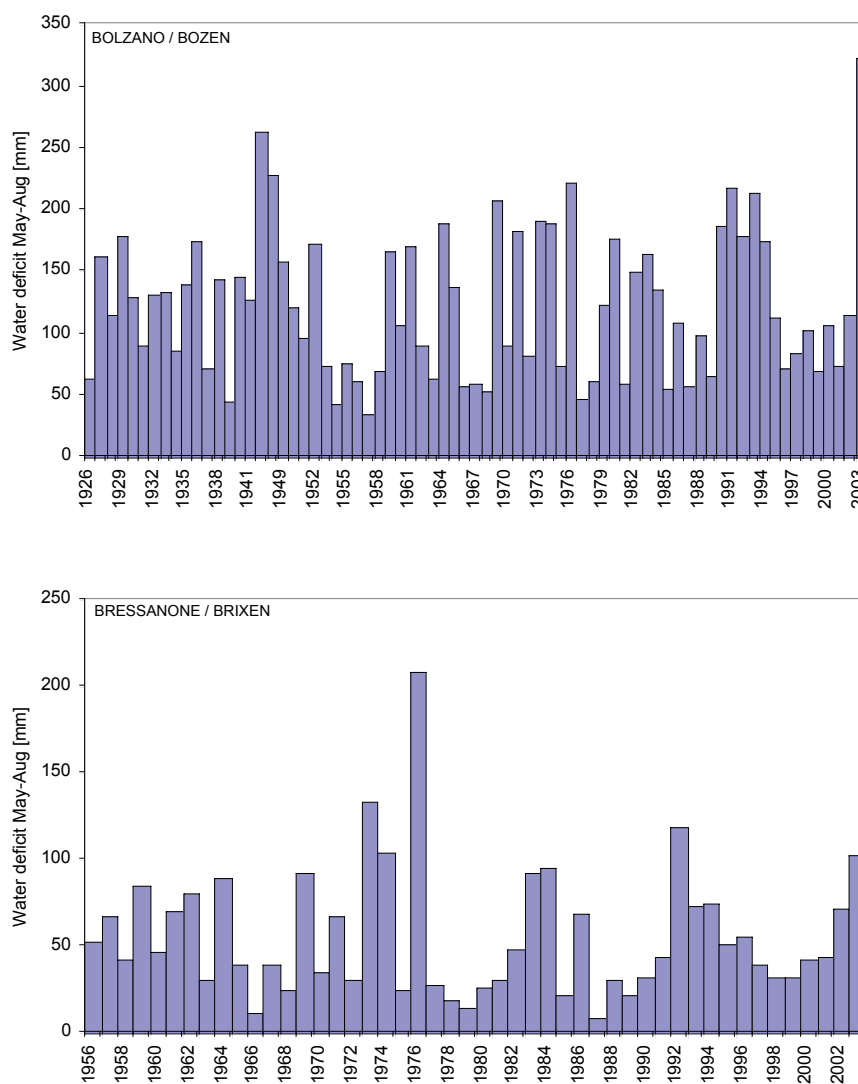


Fig.26

Andamento storico del deficit idrico (Maggio-Agosto) negli anni 1926-2003 per la stazione meteorologica di Bolzano e 1956-2003 per la stazione di Bressanone.

Time series of water deficit (May-August) for the period 1926-2003 at the meteorological station of Bolzano and for the period 1956-2003 at the meteorological station of Bressanone.



In sintesi, dall'analisi degli andamenti climatici presso le aree di studio emerge quanto segue.

Nell'ultimo ventennio si è osservato un tendenziale e significativo aumento delle temperature medie estive (Fig. 19), tanto che tra i 13 anni con le estati più calde dal 1926, ben 8 rientrano nell'ultimo decennio (Fig. 13-14). Nel corso del 2003 l'anomalia termica estiva è stata particolarmente forte (1,5-4,4°C durante i mesi estivi; Fig. 12), tanto che la temperatura media dei mesi maggio-agosto è risultata superiore di 3°C rispetto alla media di lungo periodo (23,4 invece di 20,4 del periodo 1926-2003).

Il tendenziale aumento della temperatura estiva nell'ultimo decennio è stato compensato da una buona disponibilità idrica estiva, tanto che solo il 2003 rientra tra le venti estate più aride dal 1926 (Fig. 16). Il regime pluviometrico durante gli anni '90 è stato caratterizzato da una distribuzione continentale, mentre nei primi anni del 2000 si è passati ad una distribuzione equinoziale, tipica delle aree esapliche (Fig. 18). La buona disponibilità idrica degli anni '90 ha garantito un clima sub-umido. In generale, mentre l'ultimo decennio ha avuto estati più calde della media, ma tendenzialmente più umide, l'accoppiamento dell'alta temperatura e

della bassa piovosità in controtendenza del 2003 ha generato una stagione vegetativa tipica di climi xerici (Fig. 18). L'anomalia nella precipitazione estiva del 2003 è pari ad una riduzione del 40 % rispetto alla disponibilità idrica media di lungo periodo.

L'applicazione di un modello dettagliato di bilancio idrologico ha mostrato che nel 2003 l'effetto combinato di alta temperatura e bassa precipitazione ha

generato condizioni di forte stress per la vegetazione, con un deficit idrico che nei quattro mesi Maggio-Agosto ha superato i 300 mm, contro una media di lungo periodo di 123 (Fig. 24). Questa concomitanza di eventi ha portato al più marcato periodo di stress idrico dal 1926, ed ha indotto una aridità pressoché totale nei siti di studio che si è protratta per circa 3 mesi (Fig. 21, Fig. 23).

3.3 Indagini dendrocronologiche

3.3.1 Età media del campione esaminato

Le piante deperite risultano avere in linea di massima un'età di poco superiore a quelle vive, in quanto

le carotine di quest'ultime, per motivi dovuti alla metodologia d'indagine (vedi), non sempre comprendono le cerchie annuali centrali.

Tab. 5

Età media del campione di piante deperienti e vive per sito.

Mean age of the dying and living sampled trees for the different experimental sites.

Aree di studio <i>Experimental sites</i>	Deperienti <i>Dying</i>	Vivi <i>Living</i>
Nössing-Büchel	90	50-75
Tschötsch	60	55
Schrambacher Leiten	55	45 (80)
Rotwand	55-100	-

3.3.2 Analisi statistica

Per ogni sito è stata elaborata la curva di ampiezza anulare media, poi messa a confronto con le curve dei singoli alberi.

A Nössing-Büchel il coefficiente di coincidenza fra le singole curve è elevato.

Tranne una pianta con $P \leq 0.05$ (dove P indica la probabilità che la correlazione tra le curve non sia statisticamente diversa da zero), l'83 % delle curve presenta una correlazione altamente significativa ($P \leq 0.001$).

A Tschötsch la correlazione tra le singole curve e la curva media è altamente significativa ($P \leq 0.001$) per un 33 %, per un altro 33% è $P \leq 0.01$, mentre per il restante 33 % è $P \leq 0.05$.

Rispetto agli altri siti il grado di corrispondenza fra le curve è il minore.

A Schrambacher Leiten la correlazione è elevata ($P \leq 0.001$) per il 55 % delle curve, per un 36% è $P \leq 0.01$, mentre per il restante 9% è $P \leq 5$.

A Rotwand la correlazione è molto significativa ($P \leq 0.001$) per l'80% delle curve. Per il restante 20 % è $P \leq 0.01$. Questo sito presenta la migliore correlazione fra le curve di ampiezza anulare.

3.3.3 Curve di ampiezza anulare

Nössing-Büchel

Anni caratteristici negativi: 1944, 1952, 1976, 1986.

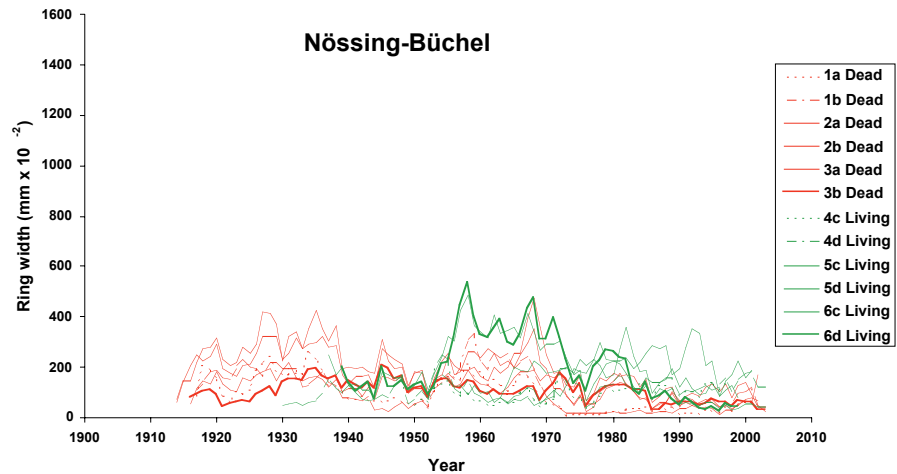
Anni caratteristici positivi: 1935, 1958, 1968.

La datazione delle curve è molto buona come conferma la sincronia con gli anni caratteristici 1952 e 1976.

In questo intervallo di tempo tutti i sei alberi campionati presentano buoni accrescimenti, mediamente

superiori per gli individui disseccatisi in seguito (tranne uno) rispetto agli alberi vivi. Tuttavia, dopo il 1976, anno notoriamente siccitoso, questi ultimi presentano migliori capacità reattive con accrescimenti sensibilmente maggiori rispetto ai deperiti, la cui situazione peggiora progressivamente a partire dal 1986. Dal 1990 anche per gli alberi vivi si evidenziano minori accrescimenti.

Fig.27
Nössing-Büchel -
Curva delle ampiezze
anulari
Nössing-Büchel -
Time series of the tree ring
width.



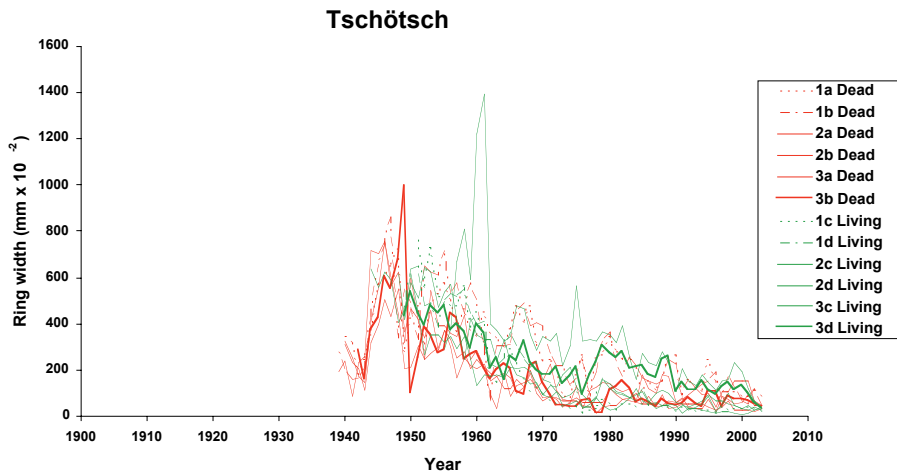
Tschötsch

Non sono evidenti anni caratteristici.

Non tutti gli individui reagiscono alla siccità del 1976. Dalla fine degli anni '70 si assiste ad una generalizzata riduzione degli accrescimenti, per quanto meno marcata per due piante.

Nel sito di Tschötsch non è possibile distinguere un diverso comportamento accrescimentale fra i due gruppi di individui.

Fig.28
Tschötsch -
Curva delle ampiezze
anulari.
Tschötsch -
Time series of the tree
ring width.



Schrambacher Leiten

Anni caratteristici negativi: 1963, 1976, 1990.

Anni caratteristici positivi: 1958, 1968.

Nel periodo 1950-1970 gli alberi disseccati presentano migliori accrescimenti rispetto a quelli tuttora vivi. Dal 1990 la situazione si capovolge a favore

di questi ultimi. Evidentemente le caratteristiche del terreno, mediamente profondo e sciolto, hanno favorito la crescita della popolazione di alberi poi deperiti, solo e fintanto che le condizioni climatiche hanno garantito sufficienti disponibilità idriche nel suolo.

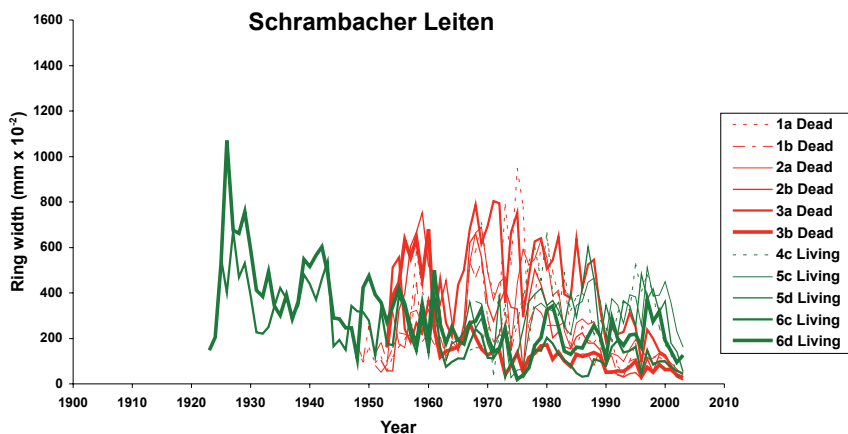


Fig. 29

Schrambacher Leiten - Curva delle ampiezze anulari.

Schrambacher Leiten - Time series of the tree ring width.

Rotwand

Anni caratteristici negativi: 1944-1946, 1976, 1984.

Anni caratteristici positivi: 1967.

Le curve di ampiezza anulare non correlano con le omologhe degli altri siti. Tanto per il periodo

1944-1946, quanto per l'anno 1976 i mediocri accrescimenti sono attribuibili al fattore siccità. Tranne un individuo, per tutti gli alberi campionati l'accrescimento, dopo una lieve ripresa nei due anni successivi, non ritorna ai valori precedenti.

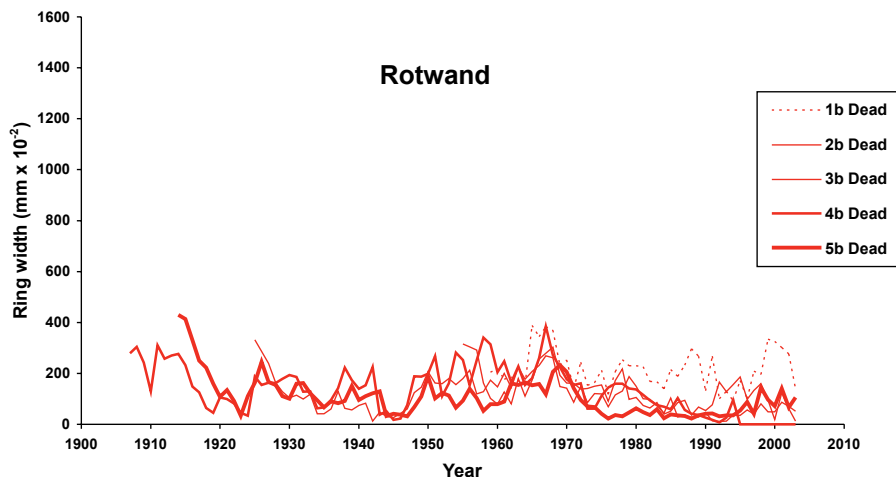


Fig. 30

Rotwand - Curva delle ampiezze anulari.

Rotwand - Time series of the tree ring width

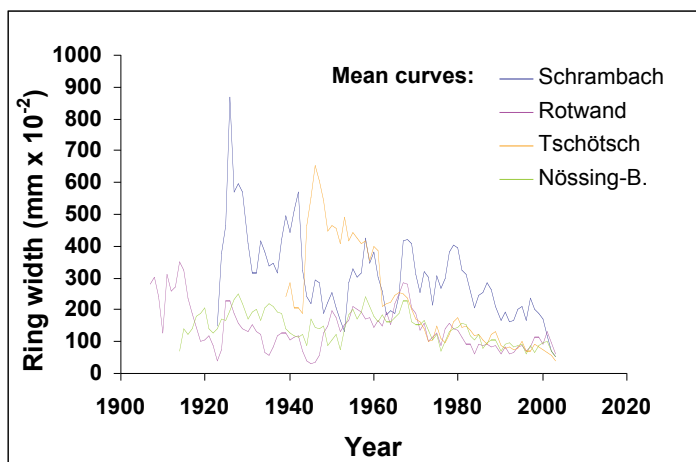
3.3.4 Confronto fra le curve di ampiezza anulare medie

La sincronicità delle curve medie dei quattro siti evidenziata in Fig. 31 è indice del buon grado di datazione delle stesse. Presso Schrambacher Leiten rispetto agli altri siti, gli alberi sono cresciuti decisamente meglio durante tutto il periodo considerato.

Elemento in comune è rappresentato invece dai ridotti accrescimenti che caratterizzano tutti i siti negli anni 1964 e 1976. In seguito tutti gli alberi presentano un lieve recupero degli accrescimenti che poi scemano progressivamente nel successivo decennio.

Fig. 31

Confronto fra le curve di ampiezza anulare medie delle quattro aree sperimentali.
Comparison of the mean ring width trends at the four experimental sites



3.3.5 Analisi anatomica del legno mediante analisi di immagini (Image analysis)

L'ampiezza del lume delle tracheidi non differisce significativamente fra piante disseccate e vive, per quanto in quest'ultime la superficie del lume sia

in media maggiore, mentre, come atteso, significativa appare la maggiore superficie del lume delle tracheidi nel legno primaverile rispetto al legno tardivo in tutte le piante esaminate.

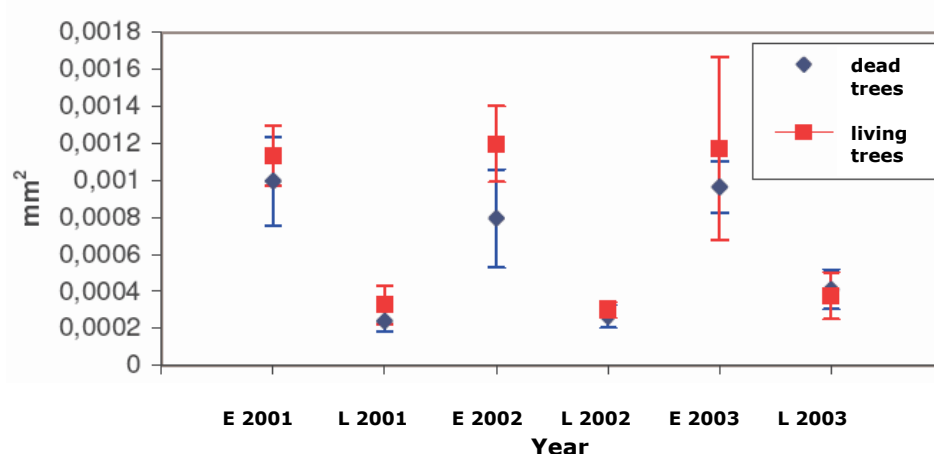


Fig. 32

Superficie media del lume di tracheidi nel legno primaverile (E) ed estivo (L) in alberi vivi e deperiti per il sito di Nössing-Büchel nel periodo 2001-2003.

Mean surface of the tracheid lumen of early (E) and late wood (L) in living and dying trees at the Nössing-Büchel site for the period 2001-2003

3.3.6 Interazioni tra clima e fisiologia degli alberi

Lo studio congiunto della meteorologia e della discriminazione isotopica del carbonio e dell'ossigeno nelle serie di anelli legnosi, consente di analizzare le risposte fisiologiche dei vegetali in relazione alla variabilità climatica.

3.3.6.1 Discriminazione isotopica del carbonio

L'impovertimento dell'isotopo ^{13}C nei carboidrati fissati con la fotosintesi dipende dalla concentrazione della CO_2 entro la foglia, ovvero dalla conduttanza stomatica e quindi dal potenziale idrico del sistema suolo-pianta.

In Fig. 33 sono riportati, separatamente per i diversi siti di indagine e per gli alberi vivi e deperiti, gli andamenti storici della discriminazione isotopica del carbonio nel legno primaverile ed estivo.

Dai diagrammi si evincono alcuni significativi aspetti.

I valori di $\delta^{13}\text{C}$ sono sistematicamente più elevati (tendono ad avvicinarsi al rapporto in atmosfera) nelle piante deperienti e morte (in media $-24,5\text{‰}$) rispetto a quelle vive (in media $-25\pm 26\text{‰}$),

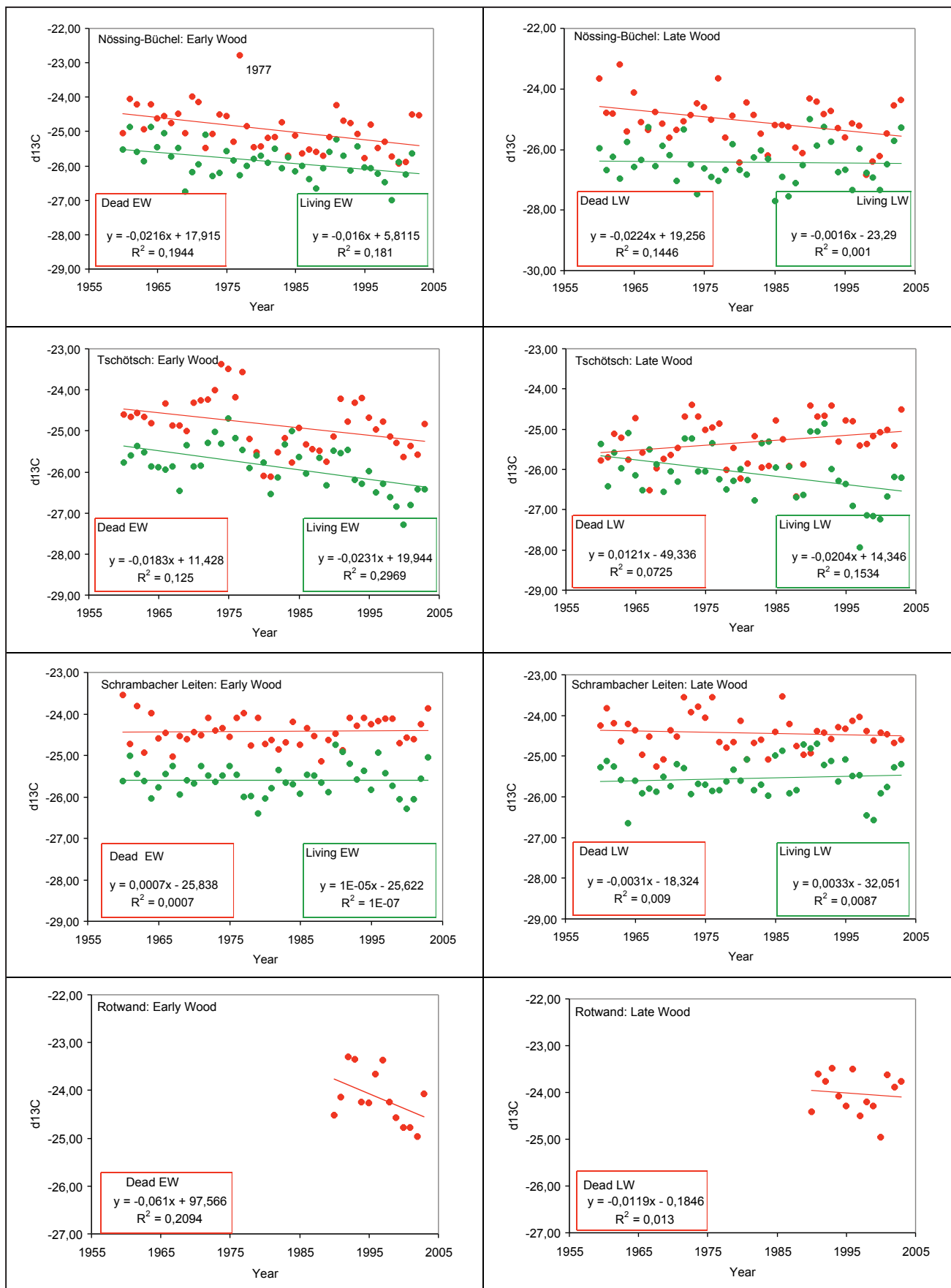
con valori che si distanziano progressivamente nell'ultimo decennio fino a differenziare in sostanza due diverse popolazioni di alberi. Tale aspetto è più marcato a partire dal 1992 nei siti di Tschötsch e Schrambacher Leiten, caratterizzati da una più diffusa mortalità.

Si nota una tendenza alla riduzione dei valori di $\delta^{13}\text{C}$ nell'ultimo ventennio che può essere solo in parte spiegata con la riduzione della discriminazione isotopica dell'anidride carbonica atmosferica. Questi trend negativi indicano una tendenziale riduzione nell'efficienza dell'uso dell'acqua, legata ad un aumento della disponibilità idrica durante il periodo vegetativo. Questo trend non emerge per gli alberi morti del sito di Schrambacher Leiten ed è comunque inferiore a quello presentato dagli alberi vivi.

Questi presentano inoltre maggiori fluttuazioni dei valori di discriminazione isotopica in risposta alle diversificate disponibilità idriche, quindi un inalterato grado di vitalità, rispetto agli alberi disseccati, la cui minore sensibilità e reattività testimoniano del declino fisiologico in atto già da tempo.

Fig. 33

Andamento storico dei valori di discriminazione isotopica del carbonio ($\delta^{13}\text{C}$) nel legno primaverile (EW) ed estivo (LW) di alberi vivi (Living) e deperiti (Dead) in Val d'Isarco.
Time series of the carbon isotope discrimination ($\delta^{13}\text{C}$) in early (EW) and late wood (LW) for living and dying trees.



3.3.6.2 Discriminazione isotopica dell'ossigeno

L'analisi ha considerato i periodi 1990-2003 per Nössing-Büchel e 1960-2003 per Tschötsch e Schrammbacher-Leiten.

La Fig. 34 illustra, separatamente per i tre siti, gli andamenti storici della discriminazione isotopica dell'ossigeno sulla base del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ per

il legno primaverile (EW) ed estivo (LW) e per gli alberi vivi (Living) e deperiti (Dead). Già a partire dagli anni '60 questi ultimi differenziano valori sensibilmente più elevati, in particolare per il legno tardivo (Tschötsch e Schrammbacher-Leiten), il quale rispecchia le condizioni dell'accrescimento durante il periodo vegetativo.

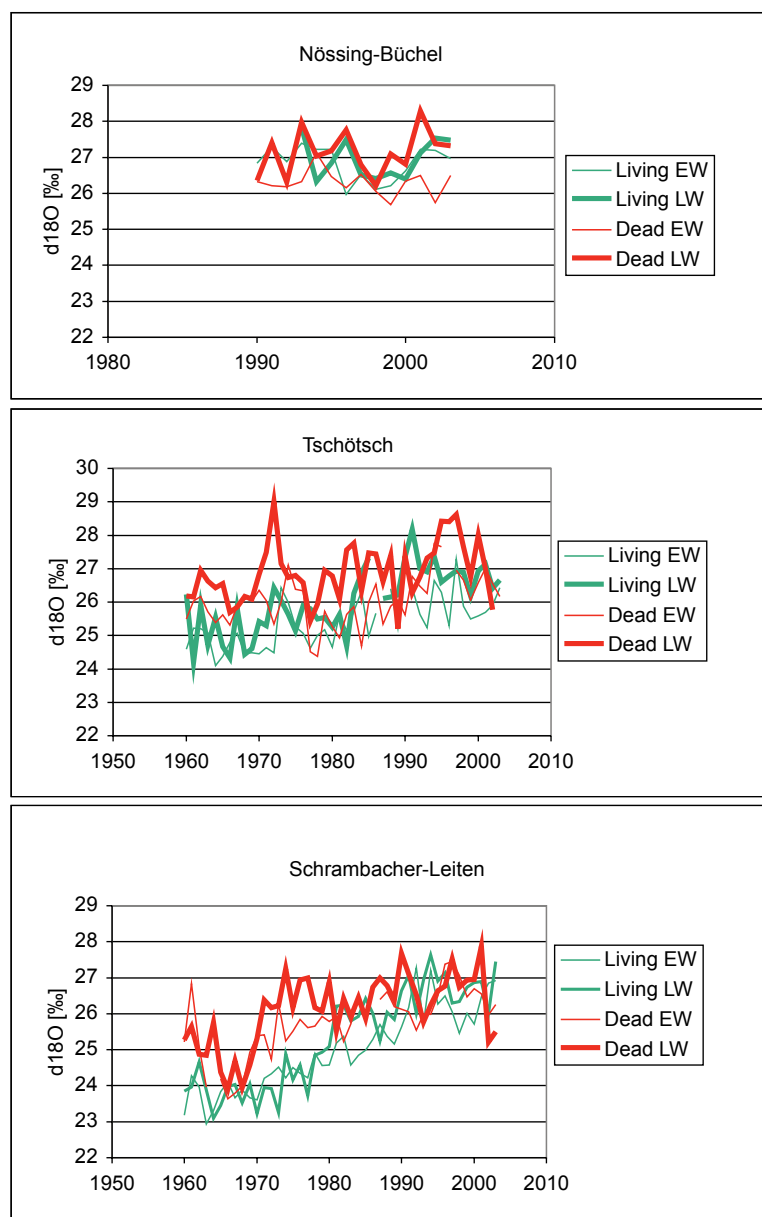


Fig. 34

Andamento storico della discriminazione isotopica dell'ossigeno ($\delta^{18}\text{O}$) in tre siti di indagine e separatamente per legno primaverile e estivo e per alberi deperiti e vivi.

Time series of oxygen discrimination ($\delta^{18}\text{O}$) in three experimental sites separately for early and late wood and for dying and living trees

Di rilievo l'iniziale differenziazione fra i due gruppi, che tuttavia in seguito si riduce progressivamente fino a scomparire negli anni '90. Tale riduzione viene meglio quantificata in Fig. 35 dal confronto fra i valori mediati del rapporto $\delta^{18}\text{O}$ nel legno primaverile ed estivo di ciascuna popolazione.

I più elevati valori di ^{18}O indicano una minore attività traspirativa a carico degli alberi deperiti, quale conseguenza della ridotta conduttanza stomatica

già evidenziata anche dall'analisi degli isotopi del carbonio.

Il minore dato di traspirazione può altresì dipendere più in generale da una minore assimilazione, dato che i due processi sono spesso correlati. In ogni caso gli alberi sofferenti non sono stati in grado di accumulare riserve negli ultimi anni, cosa rivelatasi poi fatale con il subentrare di periodi siccitosi negli anni '90.

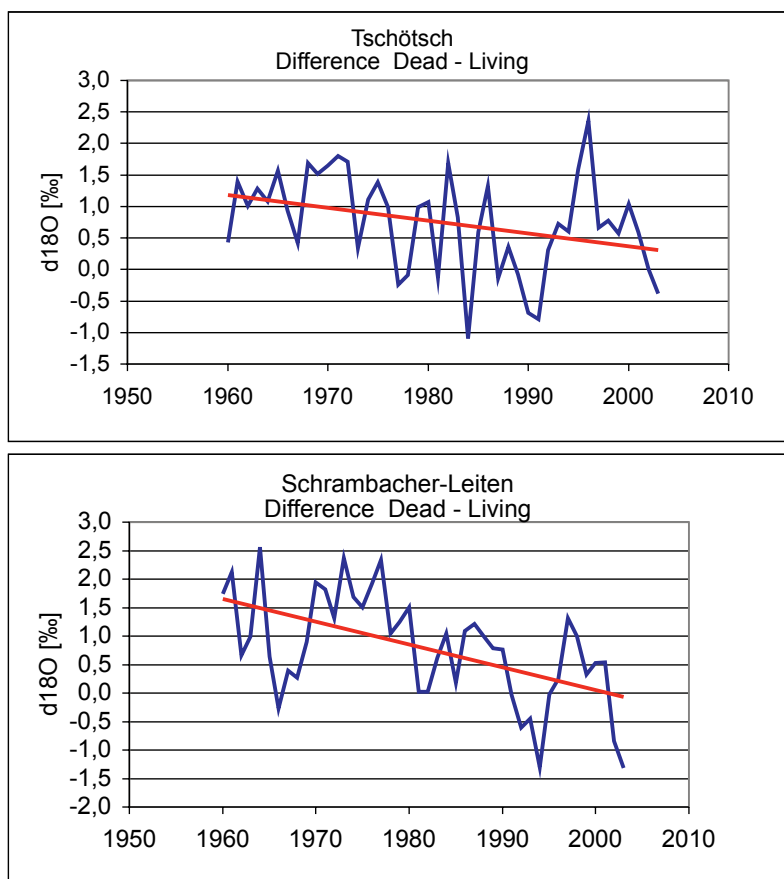


Fig. 35

Andamento storico della differenza di $\delta^{18}\text{O}$ tra alberi deperiti e alberi vivi in due aree di studio.

Time series of the differences in $\delta^{18}\text{O}$ between dying and living trees in two sampling areas

3.3.6.3 Analisi della varianza

Onde verificare se le differenze di $\delta^{13}\text{C}$ tra alberi vivi e deperiti e tra siti siano statisticamente significative, è stata effettuata l'analisi della varianza (ANOVA) sui dati del periodo 1990-2003, utilizzando come fattori di classificazione il sito, il legno estivo e primaverile e lo stato sanitario della pianta.

I risultati dell'ANOVA riportati in Tab. 6 mostrano che le differenze in $\delta^{13}\text{C}$ tra i siti e tra gli stati fito-sanitari sono altamente significative. Nello specifico

risultano significative le differenze tra i valori di $\delta^{13}\text{C}$ delle piante vive e delle piante morte, mentre non sono statisticamente diversi i valori del legno estivo e primaverile.

Relativamente ai siti, si riscontra una differenza statisticamente significativa tra il sito di Schrambacher Leiten e gli altri. Non è stato possibile inserire nell'analisi il sito di Rotwand in quanto il campionamento ha interessato solo alberi deperienti e quindi il disegno sperimentale è risultato incompleto.

Tab. 6

Risultati dell'analisi della varianza per la discriminazione isotopica del carbonio tra siti e stato sanitario. Entrambi i fattori sono risultati altamente significativi ($P < 0.00$), mentre l'interazione non è significativa.

Results of the ANOVA on the values of $\delta^{13}\text{C}$ between sites and tree state. Both factors are statistically significant ($P < 0.00$), while the interaction between the two is not significant.

ANOVA multifattoriale / *multifactorial*.

Fattore	Factor	GDL	MS	F	p
Stato sanitario	Status	3	18.24481	55.62642	1.83E-24
Sito	Site	2	9.352988	28.51623	2.85E-11
Interazione	Interaction	6	0.333874	1.017945	0.415713

Confronti post-doc sulla base del test Staffe (*differenze con $p < 0.05$).

*Post-doc comparisons based on Staffe-test (*differences with $p < 0.05$).*

Stato sanitario	Status		Siti / Sites	
Piante vive legno primaverile	Living tree, early wood	*	Nössing-Büchel	*
Piante vive legno estivo	Living tree, late wood	*	Tschötsch	*
Piante morte legno primaverile	Dying tree, early wood	**	Schrambacher Leiten	**
Piante morte legno estivo	Dying tree, late wood	**		**

In Fig. 36-37 i valori medi $\pm$ ES $\pm$ DS di $\delta^{13}\text{C}$ per i diversi siti mettono in evidenza come nel periodo 1990-2003 gli alberi deperienti presentino valori medi di $\delta^{13}\text{C}$ sistematicamente più elevati e una minore variabilità rispetto agli alberi vivi. In aggiunta, nelle piante vive la variabilità del $\delta^{13}\text{C}$ nel legno estivo è superiore alla variabilità nel legno primaverile.

Come evidenziato in Fig. 33, le differenze tra alberi vivi e morti sono molto più marcate nei siti di Tschötsch e Schrambacher Leiten rispetto al sito di Nössing-Büchel. Gli alberi morti nel sito di Schrambacher Leiten in particolare mostrano i valori di discriminazione più critici tra i diversi siti analizzati.

Fig. 36

Valori medi di $\delta^{13}\text{C}$ ($\pm$ errore standard $\pm$ deviazione standard) per i diversi siti e stati sanitari (V= alberi vivi, M= alberi morti, P= legno primaverile, E= legno estivo).

Mean values of $\delta^{13}\text{C}$ ($\pm$ standard error $\pm$ standard deviation) for the different sites and tree state (V= living trees, M= dying trees, P= early wood, E= late wood).

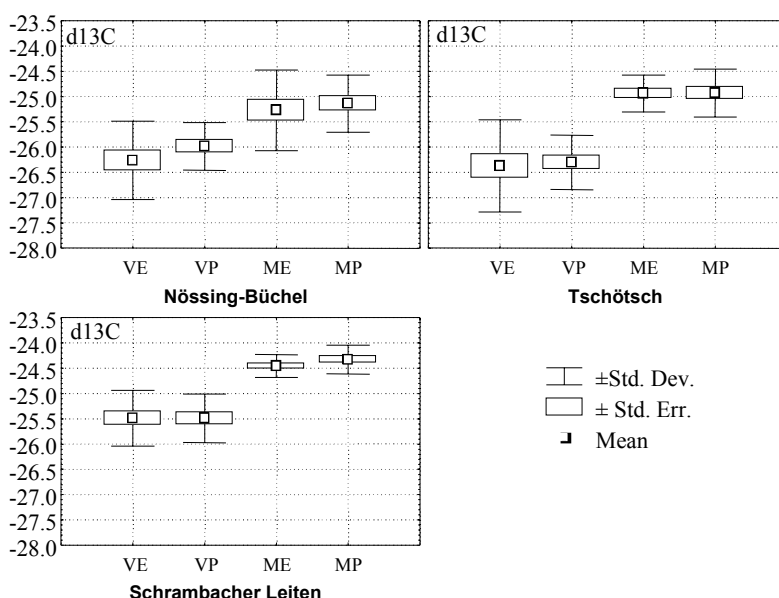
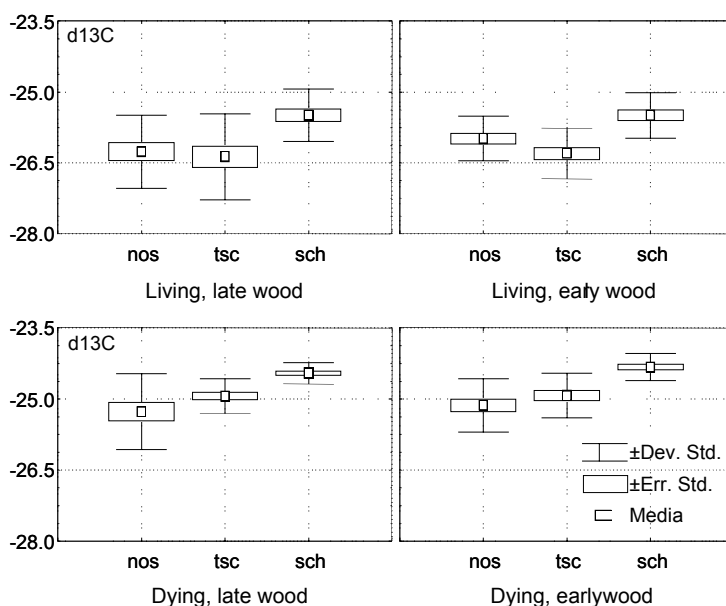


Fig. 37

Valori medi di $\delta^{13}\text{C}$ ($\pm$ errore standard $\pm$ deviazione standard) per i diversi siti e stati sanitari (nos= Nössing-Büchel, tsc= Tschötsch, sch= Schrambacher Leiten).

Mean values of $\delta^{13}\text{C}$ ($\pm$ standard error $\pm$ standard deviation) for the different sites and tree state (nos= Nössing-Büchel, tsc= Tschötsch, sch= Schrambacher Leiten).



Le relazioni tra $\delta^{13}\text{C}$ e deficit idrico nella stagione vegetativa (aprile-settembre) mostra relazioni positive statisticamente significative presso tutti i siti di indagine (Fig. 38-40). Le relazioni sembrano essere più forti per gli alberi rimasti in vita rispetto a quelli morti e per il legno estivo rispetto a quello primaverile.

Queste relazioni evidenziano come una riduzione delle disponibilità idriche si traduca in una riduzione della conduttanza stomatica e quindi della fotosintesi, segnalata dall'aumento sistematico del $\delta^{13}\text{C}$. Il rapporto isotopico può quindi essere usato come un indicatore sintetico dello stato idrico del sistema suolo-pianta.

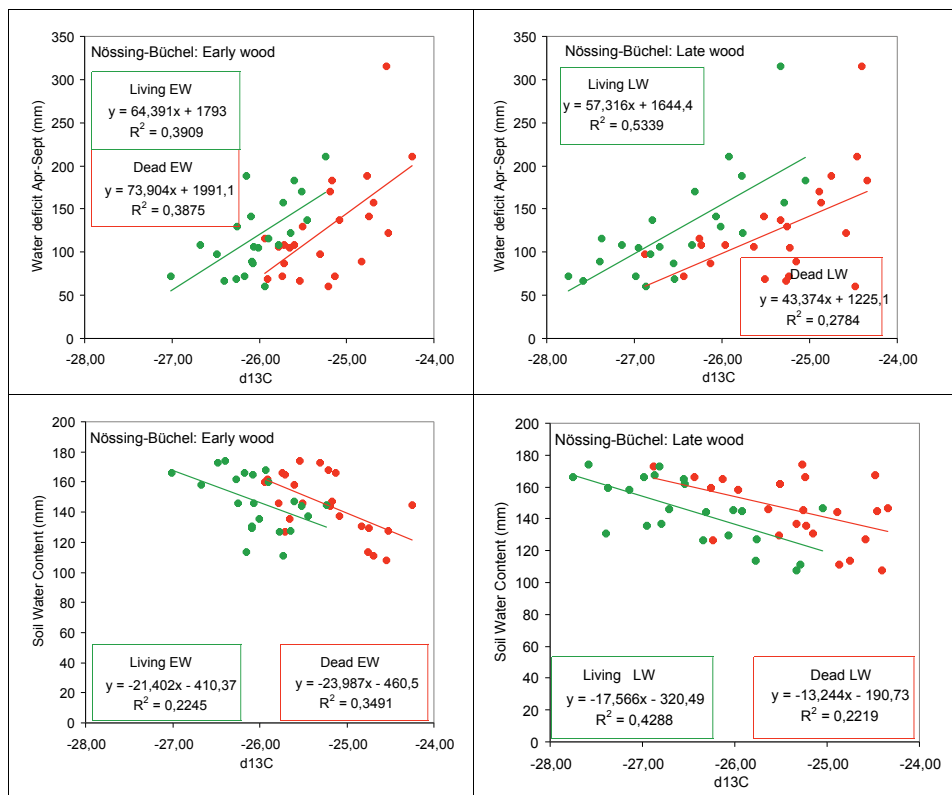


Fig. 38

Relazioni tra il valore di discriminazione isotopica del carbonio $\delta^{13}\text{C}$ e le variabili microclimatiche, deficit idrico e contenuto idrico del suolo, nel periodo aprile-settembre per il sito di Nössing-Büchel. I dati sono distinti per alberi vivi e morti e per legno primaverile ed estivo. *Relation between the carbon discrimination $\delta^{13}\text{C}$ and the microclimatic parameters, water deficit and soil water content, during the period April-September at Nössing-Büchel. Data are shown separately for dying and living trees and for early and late wood.*

Le Fig. 38-40 riportano inoltre le relazioni tra $\delta^{13}\text{C}$ e il contenuto idrico del suolo espresso in mm di pioggia. In questo caso le relazioni in tutti i siti indagati sono negative, ovvero all'aumentare del contenuto idrico medio del suolo durante la stagione vegetativa si osserva un aumento della concentrazione di CO_2 entro le foglie con una conseguente maggiore discriminazione contro il ^{13}C .

Di particolare interesse è il fatto che gli alberi morti e quelli rimasti in vita, pur mostrando sensibilità analoghe ai parametri ambientali, formano nei grafici due nuvole ben distinte di punti.

Questo fatto va interpretato come il risultato di una differenziazione microclimatica delle nicchie ecologiche nelle quali questi alberi sono inseriti, e in generale da un diverso assetto tra i processi di approvvigionamento idrico e quelli di evapotraspirazione.

Come si notava anche in Fig. 33, le popolazioni degli alberi morti e di quelli sopravvissuti alla siccità sono differenziate da più di un decennio in maniera statisticamente significativa in tutti i siti di indagine (Fig. 36) relativamente alla loro capacità di approvvigionamento idrico.

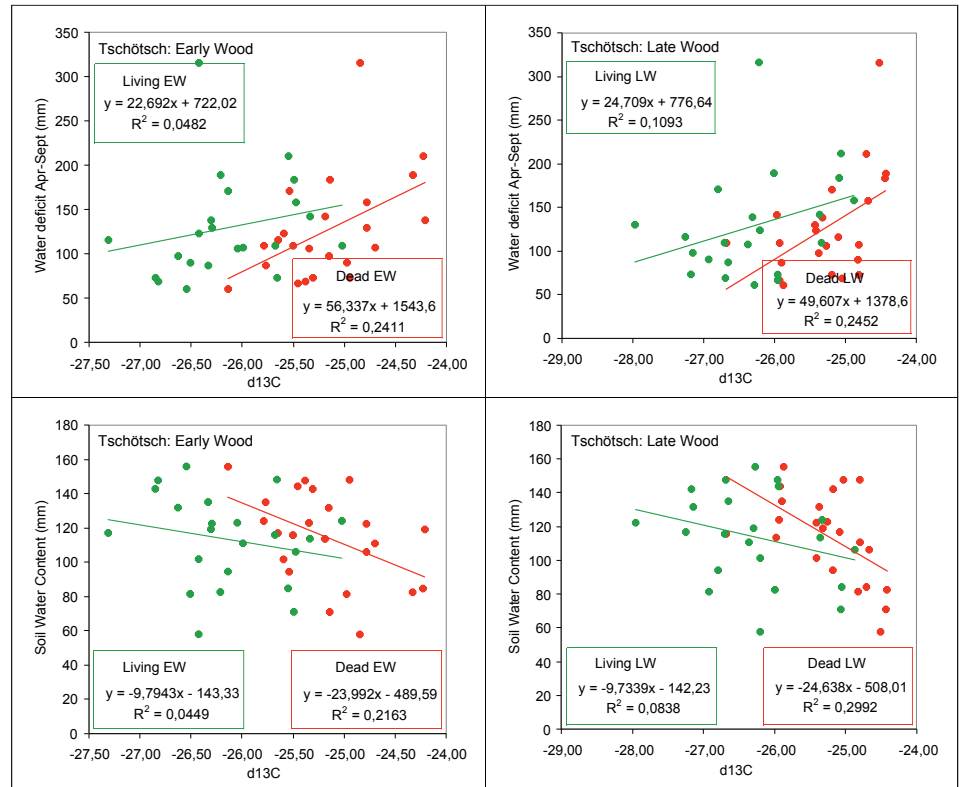
L'evento estremo di stress idrico verificatosi nel 2003 ha quindi portato a morte individui il cui equilibrio idrico era già compromesso, portando

ad una selezione naturale della copertura arborea verso gli individui con un migliore accesso alle risorse idriche.

Fig.39

Relazioni tra il valore di discriminazione isotopica del carbonio $\delta^{13}\text{C}$ e le variabili microclimatiche deficit idrico e contenuto idrico del suolo nel periodo aprile-settembre per il sito di Tschötsch. I dati sono distinti per alberi vivi e morti e per legno primaverile ed estivo.

Relation between the carbon discrimination $\delta^{13}\text{C}$ and the microclimatic parameters, water deficit and soil water content, during the period April-September at Tschötsch. Data are shown separately for dying and living trees and for early and late wood.



Un aspetto di particolare interesse per la comprensione della risposta fisiologica della vegetazione alla variabilità climatica riguarda la dinamica delle riserve di carboidrati, il cui immagazzinamento negli apparati radicali alla fine dell'autunno è di fondamentale importanza per la ripresa vegetativa nella stagione successiva. Questo aspetto è stato analizzato nei vari siti di indagine mettendo in relazione il livello di discriminazione isotopica nel legno estivo con quello del legno primaverile della stagione successiva (Fig.41). La figura dimostra come nei siti meno interessati dal deperimento

come Nössing-Büchel, non esistono differenze significative tra alberi vivi e morti, mentre nei siti più colpiti (Tschötsch e Schrambacher Leiten) gli alberi morti presentano una correlazione inferiore degli alberi vivi nel $\delta^{13}\text{C}$. In pratica solo gli alberi vivi sono stati in grado di mobilitare le riserve dell'anno precedente; gli alberi deperienti al contrario hanno avuto difficoltà (ridotta attività fotosintetica) a costituire riserve di carboidrati idonee a sostenere nell'anno seguente il processo di ripresa vegetativa e crescita.

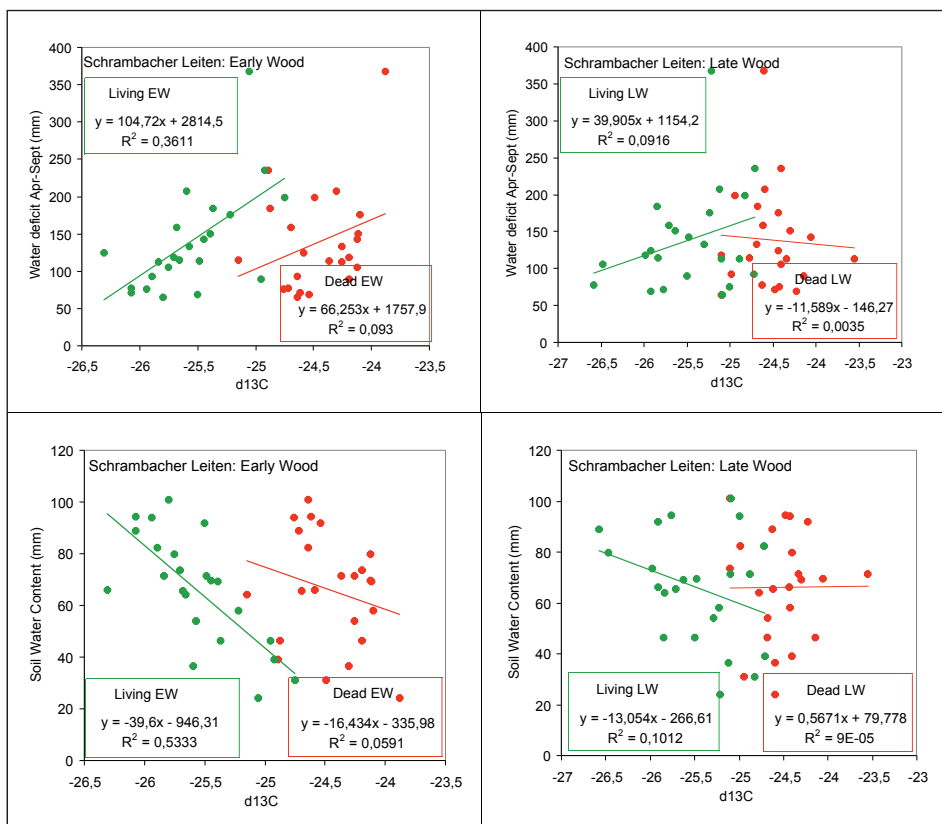


Fig. 40

Relazioni tra il valore di discriminazione isotopica del carbonio $\delta^{13}\text{C}$ e le variabili microclimatiche deficit idrico e contenuto idrico del suolo nel periodo aprile-settembre per il sito di Schrambacher Leiten. I dati sono distinti per alberi vivi e morti e per legno primaverile ed estivo.

Relation between the carbon discrimination $\delta^{13}\text{C}$ and the microclimatic parameters, water deficit and soil water content, during the period April-September at Schrambacher Leiten. Data are shown separately for dying and living trees and for early and late wood.

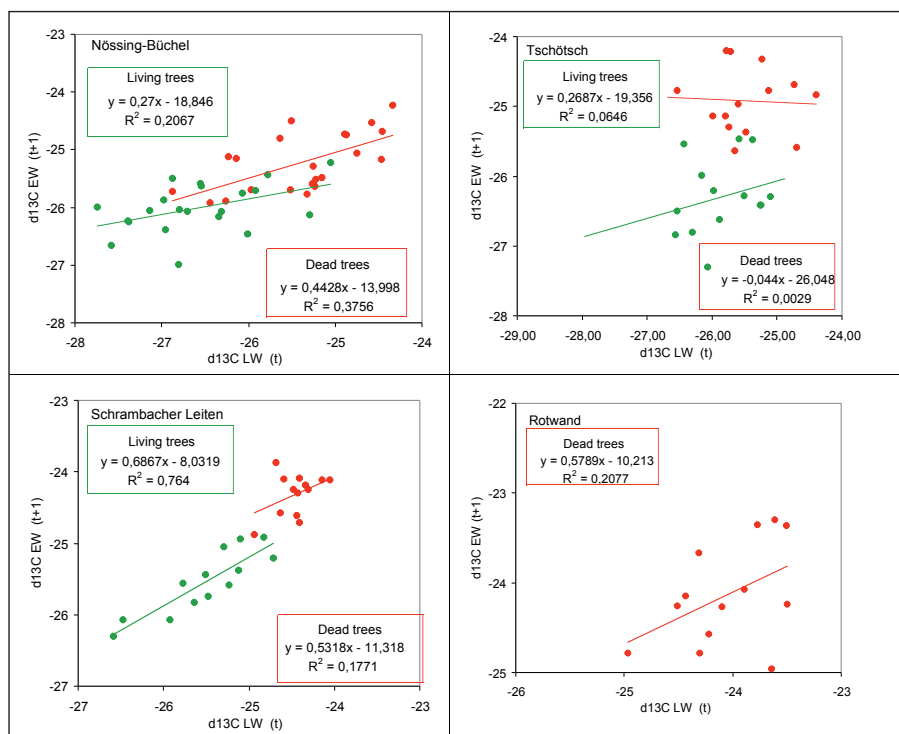


Fig. 41

Relazione tra i valori di discriminazione isotopica del carbonio $\delta^{13}\text{C}$ nel legno estivo e nel legno primaverile della stagione successiva per le quattro aree di studio.

Relationship between the carbon discrimination $\delta^{13}\text{C}$ in late wood and early wood on the following growing season in the four study sites.

3.3.7 Indagine fitopatologica

Nel novembre 2004, a distanza di un anno dalle prime manifestazioni di deperimento, ulteriori accertamenti entomologici e fitopatologici sono stati condotti allo scopo di individuare l'eventuale sviluppo di patologie secondarie.

In località Tschötsch i campioni di pini morti e/o deperienti esaminati indicano come dato costante la quasi totale assenza di attacchi di insetti primari, in particolare scolitidi, tipica potenziale causa di moria dei pini. Tutti gli insetti riscontrati, classificati in parte sulla base di esemplari (larve o adulti) repertati ed in massima parte sulla base delle caratteristiche gallerie larvali sui rami e sui tronchi, hanno una etologia tipicamente secondaria. La loro distribuzione per un albero campione tipo è riportata in Tab. 7.

Le porzioni superiori della chioma, da cui ha preso inizio il disseccamento, annoverano una maggiore diversità di specie di insetti, tuttavia con scarsa abbondanza di individui: così per es. del cerambicide *Pogonochaerus fasciculatus* si trovano diffuse gallerie larvali su alcuni rami già morti, mentre del più raro *Pogonochaerus decoratus* è stato rinvenuto un solo esemplare vivo. Lo stesso dicasi per altri insetti xilofagi riscontrati nella parte superiore delle piante, come per es. i coleotteri buprestidi *Chrysobothris solieri* ed *Anthaxia godeti* (specie parente della *A. quadripunctata*, dell'abete rosso), ed i curculionidi *Magdalis frontalis* (simile alla *M. violacea*) e *Magdalis rufa* ed *Pissodes piniphilus* e *Pissodes notatus*, diffusamente presenti, ma tutt'altro che frequenti.

A prescindere dal loro comportamento usuale di parassiti secondari, già per il loro scarso numero non avrebbero comunque potuto essere causa di morte dei pini. Questo vale anche per le pochissime gallerie di scolitidi secondari, trovati su alcuni rami.

Altresì scarsa è la presenza del cerambicide *Rhagium inquisitor* – specie considerata tipicamente secondaria, che normalmente si sviluppa in vecchie ceppaie. La contemporanea presenza di larve mature e pupe, ma anche di adulti sviluppati, dimostra che le piante attaccate – pur presentando ancora alcuni rami con aghi verdi – dovevano essere deperienti già da tempo.

Ciò ridimensiona anche il ruolo del curculionide *Pissodes pini* – parassita secondario sia pure con predilezione delle parti ancora fresche e vigorose della corteccia – presente in varie parti del tronco nelle gallerie subcorticali con diversi stadi larvali, ma non già allo stadio di insetto adulto. Elevato è invece lo sviluppo sul tronco delle gallerie di alcuni insetti xilofagi. Tra questi spiccano in particolare le gallerie subcorticali – in numero molto elevato (!) – del coleottero buprestide *Phaenops cyanea* e del cerambicide *Acanthocinus aedilis*. Ambedue le specie colonizzano tipicamente i pini deperienti.

Sorprende inoltre come vari scolitidi, pur presenti nell'ecosistema come testimoniano i residui in bosco di precedenti attacchi (ramaglia e cimali al suolo) – per es. *Tomicus minor* nelle porzioni del fusto con corteccia sottile e *Tomicus piniperda* in quelle più basse con corteccia più spessa –, non abbiano approfittato di questa “buona occasione” per un attacco in grande stile. Di essi non si è trovata traccia alcuna sui pini deperiti di recente. Lo stesso vale per l'*Ips acuminatus*.

Anche la presenza di infezioni fungine a livello di chioma, *Cenangium ferruginosum* e *Sphaeropsis sapinea*, già causa di forti infezioni negli anni '90 in queste aree, è risultata sporadica ed irrilevante nel contesto generale (Fig. 48); al contrario lo sviluppo di funghi dell'azzurramento nell'alburno ai vari livelli del fusto si propone quale elemento costante (Fig. 49).

La quasi totalità del popolamento maturo presenta inoltre un generalizzato ed elevato grado di colonizzazione da parte di *Viscum album*, epifita divenuto progressivamente il principale fattore di mortalità negli ultimi anni (Fig. 50-51). Questi rappresenta un elemento coagente decisivo nella progressione del quadro eziopatologico, giacché riduce ulteriormente la superficie assimilatoria di individui già di per sé compromessi dallo scarso sviluppo dell'apparato aereo in seguito all'elevata densità del popolamento, conseguenza dei mancati diradamenti nel passato, ed alla riduzione fisiologica della massa fogliare indotta dallo stress idrico (RIGLING *et al.* 2006).

Tab. 7

Pinus sylvestris

mt

INSECTS

FUNGI - EPIPHYTA



Pogonochaerus fasciculatus (Cerambycidae)
Pogonochaerus decoratus (Cerambycidae)
Chrysobothris solieri (Buprestidae)
Anthaxia godeti (Buprestidae)
Magdalis frontalis (Curculionidae)
Magdalis rufa (Curculionidae)
Pissodes piniphilus (Curculionidae)

Viscum album
Cenangium ferruginosum
Sphaeropsis sapinea

12

Acanthocinus aedilis (Cerambycidae)
Rhagium inquisitor (Cerambycidae)
Pissodes notatus (Curculionidae)
Pissodes pini (Curculionidae)

Blue Stain Fungi
Funghi di azzurramento

8

Acanthocinus aedilis (Cerambycidae)
Phaenops cyanea (Buprestidae)
Rhagium inquisitor (Cerambycidae)
Pissodes pini (Curculionidae)

Blue Stain Fungi
Funghi di azzurramento

4

Phaenops cyanea (Buprestidae)
Rhagium inquisitor (Cerambycidae)

Blue Stain Fungi
Funghi di azzurramento

0

Tschötsch 04.11.2004



Fig.42a
Fig.42b
Magdalis frontalis



Fig.43
Pissodes notatus



Fig.44a
Pissodes sp
gallerie larvali



Fig.44b
Pissodes pini



Fig. 45a: *Rhagium inquisitor*, Larvae



Fig. 45b: *Rhagium inquisitor*



Fig. 46a: *Acanthocinus aedilis*, Larvae



Fig. 46b: *Acanthocinus aedilis* ♂+ ♀



Fig.47a: *Phaenops cyanea*, Larva



Fig. 48: *Cenangium ferruginosum*
Cenangium limb cancer



Fig.47b: *Phaenops cyanea*



Fig. 49: Fungo di azzurramento
Blue stain fungus



Fig. 50: Popolamento di pino infestato da vischio.
Mistletoe (Viscum) growing on Pine



Fig. 51: Chioma di sostituzione.
Mistletoe substitutes the pine crown

4. Conclusioni

La rapida disidratazione dei tessuti corticali, a seguito dell'eccezionale intensità e repentinità dell'evento siccitoso del 2003 unitamente alla sua collocazione tardo-estiva, ha sortito l'effetto di contrastare lo sviluppo di patogeni secondari (*Tomicus minor*, *Ips acuminatus*) e di debolezza (*Cenangium ferruginosum*, *Sphaeropsis sapinea*, *Armillaria* sp.), tanto nell'immediato, quanto nell'anno seguente. Tale situazione ha rappresentato pertanto un'occasione ideale per verificare l'effettiva esclusione dei fattori biotici alla moria del pino silvestre in Val d'Isarco su così vasta scala, ovvero di circoscrivere ed ascrivere il fenomeno all'ambito più strettamente climatico, edafico e fisiologico. L'esclusività del danno a carico del pino silvestre trova spiegazioni in considerazioni di vario ordine:

la precaria situazione fitosanitaria pregressa, l'estremizzazione del deficit idrico rivelatosi fatale anche per questa specie in grado di colonizzare ambienti xerofili, per l'appunto disdegnati da altre conifere, e non ultime le condizioni microstazionali sfavorevoli in stazioni, sì caratterizzate da terreni mediamente profondi, ma sciolti ed a bassa capacità di ritenzione idrica. Ciò non potendo chiaramente il pino adattare gli apparati radicali all'abbassamento della falda nel volgere di poche settimane.

Limitate sono state viceversa le conseguenze su substrato roccioso, laddove gli apparati radicali, già da tempo approfonditisi nelle fenditure della roccia, garantiscono il necessario approvvigionamento idrico (Fig. 52).



Fig. 52

I pini sul margine di un pendio roccioso hanno superato senza danni esteriori la siccità estiva del 2003.

Pines at the edge with a rocky slope survived without damages to the summer drought in 2003.

Le indagini dendrocronologiche fanno risalire al 1976 – indicato allora come “l’anno più arido del secolo”, l’inizio comune del tracollo fisiologico delle pinete espresso in termini accrescimentali. La stabilità strutturale ed ecologica di questi popolamenti è stata poi sensibilmente condizionata da ripetute annate caratterizzate da siccità e caldo record susseguitesi nei decenni seguenti (1983 - 2003) oltre alla carenza di cure colturali, che ne hanno compromesso lo stato di salute generale, come testimonia la pregressa presenza endemica di numerosi parassiti ed epifiti.

Le analisi isotopiche del ^{13}C e ^{18}O , nel confermare il trend degenerativo a carico delle piante disseccate, evidenziano il forte legame con il bilancio idrico stazionario, quindi con lo stress idrico indotto dall’andamento climatico.

Si dimostra in particolare la capacità predittiva della discriminazione isotopica dell’ossigeno in relazione a condizionamenti negativi per i processi traspirativi ed assimilativi dei popolamenti di pino silvestre: la fase critica in cui versa questa specie in Alto Adige, e su tutto l’arco alpino, viene evidenziata in Fig. 34 e Fig. 35, ove le linee di trend accomunano nello stesso destino le piante disseccate e quelle ancora vive, delineando scenari futuri in cui essa sarà progressivamente sostituita da altre specie arboree.

È questa l’indicazione di fondamentale utilità gestionale che emerge dalle analisi condotte e che la naturale dinamica del popolamento già evidenzia con la spontanea ricolonizzazione del piano dominato da parte dell’orniello e di altre specie arbustive (Fig. 53).



Fig. 53

Eccezionale fioritura di orniello nel soprassuolo di pino silvestre presso Bressanone diradato in seguito al disseccamento (17.05.2006).

*Extensive flowering of Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) following the thinning of a pine stand after the drought (17.05.2006)*

Dal punto di vista fitosanitario, non esistendo la necessità di esbosco della massa secca in tempi ristretti, vista la scarsa reattività dei patogeni secondari, gli interventi sono limitati alle sole aree accessibili.

Ove conveniente si procede all'allontanamento del popolamento maturo di pino, onde consentire lo sviluppo delle latifoglie spontanee ivi già presenti - orniello, roverella, carpino nero e, nelle stazioni più fresche, castagno, ciliegio, pioppo tremulo, betulla – differenziando e modulando l'entità degli interventi in relazione alle tipologie forestali (RIPARTIZIONE FORESTE DI BOLZANO, 2006; RIGLING *et al.* 2006).

In considerazione delle attuali caratteristiche edafico-climatiche e nella prospettiva di futuri scenari di *global change*, sono queste le specie che indubbiamente meglio si adattano alle esigenze stazionali locali e che, si ritiene, nel volgere del prossimo decennio sostituiranno in gran parte le attuali pinete modificando l'aspetto paesaggistico della vallata. Le conseguenze di queste dinamiche sul paesaggio coinvolgono anche gli aspetti turistico-ricreativi, come testimonia l'inquietudine suscitata nel settore turistico-alberghiero, in seguito all'arrossamento delle chiome nell'autunno 2003, per il quale vale l'assioma "bosco sano uguale aria salubre".

Ai fini della tutela idrogeologica saranno dunque da assicurare quelle cure colturali atte a favorire lo sviluppo dell'altofusto misto di latifoglie nelle zone edaficamente favorite, anche mediante l'introduzione di specie di pregio, nell'ottica economica di un miglioramento qualitativo del soprassuolo e del sequestro di carbonio in forma durevole, lasciando al ceduo il compito della copertura del suolo nelle zone marginali e più xeriche.

Alla siccità del 2003 ha fatto seguito lo sviluppo di parassiti e patogeni del pino silvestre in diverse altre aree boscate dell'Alto Adige: un'infestazione di cocciniglia del pino (*Leucaspis* sp.) interessa dal 2004 diverse centinaia di ettari di boschi misti della Val d'Adige sulle pendici montane a ovest di

Bolzano e Merano (comuni di Caldaro, Appiano, Andriano, Prissiano), mentre sempre endemica è qui la presenza di *Cenangium ferruginosum* e *Sphaeropsis sapinea* dopo l'infestazione che nel 1997, in seguito a danni per aridità invernale, ha interessato una superficie complessiva di 1000 ha. Altre centinaia di ettari sono colpiti da *Leucaspis* in Val Venosta, dove già a partire dal 1992 ca. 1000 ha furono interessati da moria dei pini.

Aumentati sono pure gli attacchi di *Ips acuminatus* ed *Ips typographus* in tutto l'Alto Adige, con prevalenza dei versanti esposti al sole: +60% nel 2004 e 2005 rispetto al 2003 (PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO, 2005).

Tale quadro delinea per il pino silvestre una fase storica terminale, documentata peraltro su tutto l'arco alpino (RIGLING & CHERUBINI 1999), da cui discendono considerazioni di tipo fitosanitario e selvicolturale di evidente portata sovranazionale.

Trattasi perlopiù di popolamenti sottoposti in passato a diverse forme di pressione antropica, ove al pino, insediatosi spontaneamente o perché favorito artificialmente in seguito a pregresse irrazionali forme di gestione (pascolo in bosco, raccolta di stame, tagli a raso durante i due conflitti mondiali a scopo di legnatico), succedono le specie primigenie (latifoglie), ora alla riconquista dello spazio che loro compete. Il pino silvestre chiaramente non scomparirà dalla regione alpina, risulterà solo decisamente ridimensionato il suo dominio nella formazione dei soprassuoli forestali.

Dietro a quella che oggi potrebbe apparire come una normale successione nell'ambito dei naturali cicli degli ecosistemi forestali, potrebbe tuttavia celarsi una dinamica deviante indotta da modificazioni climatiche i cui futuri scenari sono solo in parte prevedibili. Ciò richiede una più attenta e costante sorveglianza di quelle aree boscate più sensibili ed a preminente funzione tutelare, al fine di attuare tempestivamente quelle misure che ne garantiscano la stabilità ecologica e strutturale (plurispecificità) o volte al contrasto ed al contenimento delle pullulazioni di patogeni. – E poi, dopo il pino silvestre, sarà il turno di quale specie?

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano il personale delle Stazioni Forestali di Bressanone e di Chiusa per il supporto

ed il valido contributo offerti in occasione delle indagini di campagna.

Riassunto

La siccità dell'estate 2003 causa di disseccamenti del Pino Silvestre in Val d'Isarco

Estesi fenomeni di deperimento si sono manifestati a carico dei soprassuoli boscati di pino silvestre, siti sui versanti più soleggiati ed aridi della Val d'Isarco, in seguito all'intensa e prolungata siccità che nell'estate 2003 ha investito il continente europeo. Gli accertamenti condotti a cura della Ripartizione Foreste di Bolzano secondo un approccio interdisciplinare, sono stati finalizzati all'acquisizione di elementi diagnostici discriminanti a diversi livelli funzionali dell'ecosistema e della specie in oggetto, proprio in quanto particolarmente sensitiva nei riguardi di andamenti climatici stagionali. I risultati conseguiti hanno fornito una chiave scientifica d'interpretazione del fenomeno, riconducibile a scompensi idrici piuttosto che ad altre cause di danno, come pure utili indicazioni ai fini dei necessari ed indifferibili interventi di carattere fitosanitario e per la futura gestione selvicolturale.

Zusammenfassung

Sommertrocknis 2003 als Ursache des Kiefernsterbens im Eisacktal

Zu ausgedehnten Absterbenserscheinungen war es in Weißföhrenbeständen in sonnenexponierten Lagen des Eisacktales gekommen, infolge der anhaltenden Trockenperiode, von der im Sommer 2003 weite Teile Europas betroffen waren. Von der Abteilung Forstwirtschaft Bozen wurde eine interdisziplinäre Untersuchung eingeleitet, mit dem Ziel durch diagnostisch-differenzierte Erhebungen in verschiedenen Fachbereichen (Bodenuntersuchungen, Analyse von Witterungsfaktoren und Wasserbilanz, dendrochronologische Jahrringsuntersuchungen, Schädlingsauftreten etc.) zu wissenschaftlich fundierten Aussagen und Schlußfolgerungen zu kommen über das betroffene Ökosystem und die auf Klimaeinflüsse besonders sensibel reagierende Weißföhre. Aus den wissenschaftlich gestützten Ergebnissen lassen sich als primäre Ursachen des Phänomens vor allem Störungen des Wasserhaushaltes ableiten, während anderweitige Schadensursachen mehr sekundär erscheinen. Aus den Erhebungen lassen sich auch wichtige Erkenntnisse über erforderliche phytosanitäre sowie für künftige waldbauliche Maßnahmen ableiten.

Appendice:

Le seguenti schede illustrano brevemente la tecnica ed i principi alla base della metodologia.

Discriminazione isotopica del carbonio

I due isotopi stabili del carbonio ^{12}C e ^{13}C sono disponibili in natura nella misura del 98.89 % e dell' 1.11 % rispettivamente. Il rapporto fra tali isotopi in atmosfera non è tuttavia perfettamente costante, bensì variabile in funzione di processi fisici e biochimici nonché dell'uso di combustibili fossili.

Pertanto il rapporto δ fra il ^{13}C ed il ^{12}C presenti in atmosfera come CO_2 , risulta essere in media di **-7‰** rispetto ad uno standard internazionale di riferimento **PDB** (Peedee Belemnite), ovvero rispetto al rapporto isotopico misurato in un campione fossile di carbonato di calcio prelevato dal rostro del cefalopode "Belemnitella americana" proveniente dalla Peedee Formation (Cretaceo) in South Carolina, USA.



www.cretaceousfossils.com/invertebrates/belemnites/belemnitella_americana.htm
virtual.clemson.edu/Geomuseum/bcgm2419.html
ethomas.web.wesleyan.edu/ees123/belemnite.htm
fossilcollections.co.uk

Rostro fossile di *Belemnitella* sp.
Fossil of Belemnite rostrum

Durante il processo di fotosintesi avviene una duplice discriminazione nell'assorbimento dei due isotopi stabili del carbonio in funzione della capacità fotosintetica e del grado d'apertura stomatica, per cui viene assimilata preferibilmente l'anidride carbonica costituita da ^{12}C :

- la prima discriminazione è di tipo fisico, legata cioè alla minore massa atomica del ^{12}C rispetto al ^{13}C , per cui diffonde più facilmente come CO_2 attraverso le aperture stomatiche, nella camera sottostomatica e, attraverso il mesofillo, fino ai cloroplasti;

Il livello di discriminazione nella pianta $\delta^{13}\text{C}_p$ dipende dalla composizione isotopica dell'atmosfera $\delta^{13}\text{C}_a$ e dalla pressione parziale dell'anidride carbonica negli spazi intercellulari del mesofillo fogliare (**ci**) rispetto alla pressione parziale atmosferica (**ca**). La discriminazione contro il ^{13}C cresce al crescere della pressione parziale dell'anidride carbonica nel mesofillo fogliare e quindi al crescere della conduttanza stomatica secondo l'espressione (GRIFFITHS, 1993):

$$\delta^{13}\text{C}_p = \delta^{13}\text{C}_a + 4.4 \cdot (ca - ci) / (1000 \cdot ca) + 27 \cdot ci / (1000 \cdot ca)$$

- la seconda discriminazione è di tipo biochimico; essa avviene durante la carbossilazione enzimatica e dipende dalla maggiore affinità fra il ^{12}C e l'enzima ribuloso-1,5-bisfosfato-carbossilasi/-ossigenasi (= rubisco).

Poiché nei carboidrati sintetizzati con la fotosintesi viene dunque fissato selettivamente il ^{12}C , i tessuti vegetali risultano mediamente impoveriti, ovvero "alleggeriti" (valore negativo), rispetto al ^{13}C , secondo un valore medio per le piante a metabolismo C3 di un $\delta^{13}\text{C}$ di ca. il **-25÷30‰** rispetto alla **concentrazione isotopica standard PDB**.

L'indice di discriminazione isotopica del carbonio risulta dalla seguente:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C del campione}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C standard}} - 1 \right) 1000$$

da cui è possibile stimare il bilancio delle limitazioni stomatiche e biochimiche alla fotosintesi e degli effetti esercitati da stress ambientali sulla produttività delle piante.

In occasione di episodi di stress idrico, le piante a metabolismo C3 riducono immediatamente la conduttanza stomatica (chiusura degli stomi) al fine di minimizzare le perdite idriche traspirative e garantire la sopravvivenza della pianta. Ciò provoca una riduzione nella pressione parziale della CO₂ nei siti di carbossilazione, mentre aumenta il rapporto ¹³C/¹²C (a favore del ¹³C, la cui pressione parziale aumenta all'interno degli spazi intercellulari del mesofillo fogliare).

Ne consegue una ridotta azione discriminante dell'enzima rubisco a favore del ¹²C con conseguente utilizzo di tutta la CO₂ presente nell'aria contenuta nella camera sottostomatica e negli spazi intercellulari del mesofillo fogliare, ¹³C compreso, che viene dunque assimilato in misura maggiore, come evidenziato da più elevati valori del rapporto δ¹³C nei tessuti vegetali.

Ad uno stato idrico deficitario del sistema suolo/pianta corrispondono dunque valori di concentrazione di ¹³C più elevati rispetto a piante non stressate.

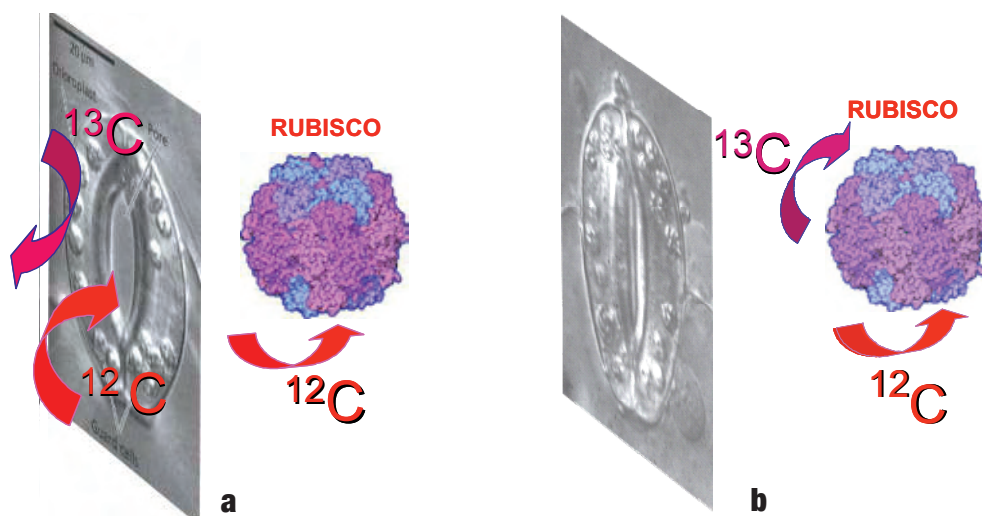
Viceversa valori bassi del rapporto indicano un'annata favorevole con precipitazioni abbondanti e sufficiente approvvigionamento idrico. Sono queste le premesse ideali per l'accrescimento, come in seguito evidenzia la maggiore ampiezza della cerchia annuale, a sua volta indicatore di ottimali condizioni vegetative per la pianta.

Vengono elencati di seguito alcuni fattori, che, agendo sulla conduttanza stomatica, influiscono sul rapporto δ¹³C.

Effetti di alcuni fattori su δ¹³C - (SIEGWOLF & SAURER, 2000)

Effect of specific factors on δ¹³C.

Fattore	Factor	δ¹³C (↓ negative, ↑ positive)
Aridità, stress idrico, temperature elevate	<i>Droughth, water stress, high temperature</i>	↑↑
Carenze nutrizionali (in particolare N)	<i>Nutrient shortage (particularly N)</i>	↓
Inquinanti aeriformi	<i>Air pollution</i>	↓↑
Ombreggiamento	<i>Shading</i>	↓
Aumento concentrazione atmosferica di CO ₂	<i>Increasing atmospheric CO₂ concentration</i>	↓
Elevata densità del popolamento, concorrenza	<i>High growing stock, competition</i>	↓
Interventi antropici	<i>Management</i>	↓↑
Diverse condizioni del metabolismo	<i>Metabolic status</i>	↓↑



Schema della discriminazione isotopica del C durante il processo di fotosintesi: organizzazione selettiva del ^{12}C in presenza di stomi aperti (a) ed organizzazione indifferenziata fra ^{12}C e ^{13}C con stomi chiusi (b).
Scheme of the Carbon isotope discrimination during photosynthesis: Selective fixation of ^{12}C in case of opened stomata (a) and indiscriminate fixation of ^{12}C and ^{13}C in case of closed stomata (b).

Efficienza nell'uso dell'acqua

La discriminazione isotopica del carbonio durante il processo di fotosintesi è per le piante C3 inversamente correlata con l'efficienza d'uso idrico (WUE - Water Use Efficiency) (BRUGNOLI et al., 2003), data dal rapporto molare tra anidride carbonica assimilata e acqua evaporata (assimilazione/traspirazione).

La WUE dipende infatti dalla differenza di concentrazione dell'anidride carbonica ($c_a - c_i$) e dalla differenza di deficit di saturazione dell'acqua (D_w) entro e fuori la foglia secondo il rapporto (GRIFFITHS, 1993):

$$\text{WUE} = (c_a - c_i) / (D_w \cdot 1.6)$$

Se dunque le risorse idriche sono sufficienti, l'assimilazione si svolge con stomi aperti ed elevati rapporti evapotraspirativi, ovvero la quantità di acqua utilizzata per unità di carbonio assimilata (mole su mole) è elevata (spreco di acqua!), viceversa con stomi chiusi la pianta è costretta ad utilizzare più efficacemente l'acqua disponibile.

Discriminazione isotopica dell'ossigeno

L'ossigeno presente in natura è rappresentato da tre isotopi stabili secondo i seguenti valori di abbondanza (GARLICK, 1969 in: GERMANI & ANGIOLINI, 2003): ^{16}O 99,763 %, ^{17}O 0,0375 %, ^{18}O 0,1995 %.

Le piante assumono ^{18}O esclusivamente tramite l'acqua del suolo. Nell'acqua fogliare, e quindi nei tessuti vegetali, è contenuto più ^{18}O rispetto all'acqua del suolo, poiché le molecole d'acqua contenenti ^{16}O , più leggero, evaporano più rapidamente rispetto a quelle contenenti ^{18}O .

Questo processo viene influenzato da diversi fattori ambientali (temperatura, umidità relativa dell'atmosfera, etc.), ma è la conduttanza stomatica che, regolando la velocità di traspirazione in risposta all'ambiente, determina di fatto l'arricchimento in ^{18}O dell'acqua fogliare (BRUGNOLI et al., 2003).

Ciò vale tuttavia solo per bassi o moderati valori traspirativi. Se aumentano la traspirazione e quindi il consumo idrico da parte dell'albero, non può compiersi il completo arricchimento di ^{18}O nell'acqua fogliare in quanto questa viene diluita dall'acqua del suolo. In altre parole, quanto minore è la traspirazione, tanto maggiore è il rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

Il rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ nei cerchi legnosi di accrescimento può pertanto essere assunto quale indicatore dei processi traspirativi della pianta ed indirettamente della conduttanza stomatica.

Tale valore viene quindi confrontato con il valore di riferimento dato dalla composizione isotopica media attuale delle acque oceaniche (SMOW - Standard Mean Ocean Water).

Bibliografia

- ANONYMUS: Natural abundance of the stable isotopes of C, O AND H - (www.iaea.org/programmes/ripc/ih/volumes/vol_one/cht_i_07.pdf).
- BAAS P., SCHWEINGRUBER F.H., 1987: Ecological trends in the wood anatomy of trees, shrubs and climbers from Europe. *IAWA Bulletin n.s.* 8, 245-274.
- BIGLER CH., BRÄKER O.U., BUGMANN H., DOBBERTIN M., RIGLING A., 2006: Drought as an inciting mortality factor in Scots Pine stands of the Valais, Switzerland – Ecosystems (2006) 9: 330-343, DOI 10.1007/s10021-005-0126-2.
- BRUGNOLI E., DI ORAZIO F., GRATANI L., SCARTAZZA A., 2003: Impatto del cambiamento climatico sui sistemi agricoli: studio degli isotopi stabili e ricerca di indicatori di tolleranza alla siccità. - Atti workshop “CLIMAGRI – Cambiamenti Climatici e Agricoltura”, Cagliari, 16-17 gennaio 2003.
- BRUGNOLI E.: Impatto del cambiamento climatico sui sistemi agricoli: ricerca di indicatori di tolleranza alla siccità. Relazione Finale I° Anno - Linea di ricerca 3.5 Climagri - Cambiamenti Climatici e Agricoltura, sottoprogetto 3 siccità, desertificazione e gestione delle risorse idriche - <http://www.climagri.it/finaleBrugnoli.htm>
- CESCATTI A., 1992: Un programma di calcolo per l'applicazione del modello di Newhall nella classificazione del regime di umidità dei suoli. Atti dell'Istituto di Ecologia e Selvicoltura. Università degli Studi di Padova. Vol. VI, 3: 67-85.
- CHERUBINI P., FONTANA G., RIGLING D., DOBBERTIN M., BRANG P., INNES J.L., 2002: Tree-life history prior to death: two fungal root pathogens affect tree-ring growth differently. *Journal of Ecology*, 90, 5, 839-850.
- CHERUBINI P., GARTNER B.L., TOGNETTI R., BRÄKER O.U., SCHOCH W., INNES J.L. 2003: Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 78, 1, 119-148.
- FRANCEY R. J., ALLISON C. E., ETHERIDGE D. M., TRUDINGER C. M., ENTING I. G., LEUENBERGER M., LANGENFELDS R. L., MICHEL E., STEELE L. P., 1999: A 1000-year high precision record of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO_2 - Munksgaard, Tellus B, Vol. 51, issue 2, 170-193 - Bibl. Code 1999 Tell B..51..170F (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1999TellB..51..170F>)
- GARLICK G.D., 1969: *The stable isotopes of Oxygen*. In WEDEPOHL K.H. (Ed.): *Handbook of Geochemistry*, 8B. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- GERMANI D. & ANGIOLINI L., 2003: Guida italiana alla classificazione e alla terminologia stratigrafica – APAT, Agenzia per la Protezione dell'ambiente e per i Servizi Tecnici, Dipartimento Difesa del Suolo, Quaderni - Serie III – Volume 9/2003 (www.apat.gov.it/site/it-IT/APAT/Pubblicazioni/Quaderni/Documento/quaderni_2003_09.html)
- GRIFFITHS H., 1993: Carbon isotope discrimination. In: Hall D.O. et al. eds. *Photosynthesis and production in a changing environment*. Chapman & Hall, London. 181-192 pp
- HELLRIGL K. & MINERBI S., 2006: Untersuchungen zur Verbreitung der Misteln in Südtirol (*Viscum album*: Loranaceae). – Forest observer, 2 (2006): 30 pp. (in press).
- HELLRIGL K. & MINERBI S., 2006: Klimaextreme und Schädlinge als Faktoren des Kiefernsterbens. – Forest observer, 2 (2006): 10 pp. (in press).
- HIGHAM T.: Sample isotopic fractionation - Radiocarbon Laboratory, University of Waikato, New Zealand (<http://www.c14dating.com/frac.html>) HILKER N., RIGLING A. & DOBBERTIN M., 2005: Föhrensterben im Wallis – mehr Misteln wegen der Klimaerwärmung ? – Wald Holz, 85 (3): 39-42.
- LOCK S., PAHLMANN S., WEBER P., RIGLING A., 2003: Nach Staliden kehren die Flaumeichen zurück – Swiss Federal Institute for Forest, Snow & Landscape Research (WSL), Wald und Holz 9/2003.
- MARCHISIO C., CESCATTI A., BATTISTI A., 1994: Climate, soils and Cephalcia arvensis outbreaks on Picea abies in the Italian Alps. *For. Ecol. Manage.* 68: 375-384.
- NEWHALL F., 1972: Calculation of soil moisture regimes from climatic record. Rev. 4 Mimeographed, Soil Conservation Service, USDA, Washington DC.
- NÖTZLI M. & STARY N., 2004: Trockensommer 2003: Eine dendrochronologische Untersuchung der abgestorbenen Bäume im Südtirol. – Interner Bericht für die Autonome Provinz Bozen, Geographisches Institut Universität Zürich 2004
- PHYTOSANITÄRER BEOBACHTUNGS- UND MELDEDIENST, PBMD, WSL, BIRMENSCHDORF, 2003: Die Trockenheit wird Spuren hinterlassen – Swiss Federal Institute for Forest, Snow & Landscape Research (WSL), Wald und Holz 9/2003.
- PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO, 2005: Relazione Agraria e Forestale 2004. - Assessorato Agricoltura e Foreste.
- RIGLING A., FORSTER B., WERMELINGER B., CHERUBINI P., 2003: Waldföhrenbestände im Umbruch – Swiss Federal Institute for Forest, Snow & Landscape Research (WSL), Wald und Holz 13/1999.
- RIGLING A., CHERUBINI P., 1999: Wieso sterben die Waldföhren im “Telwald” bei Visp? – Schweiz. Z. Forstwes. 150 (1999) 4: 113.131.
- RIGLING A., DOBBERTIN M., BÜRGI M., GIMMI U., GRAF-PANNATIER E., GUGERLI F., HEININGER U., POLOMSKI J., REBETZ M., RIGLING D., WEBER P., WERMELINGER B., WOHLGEMUTH T., 2006: Verdrängen Flaumeichen die Walliser Waldföhren? - Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Merkblatt für die Praxis, Nr. 41 April 2006, (www.wsl.ch/publications).
- RIGLING A., DOBBERTIN M., BÜRGI M., FELDMEIER-CHRISTE E., GIMMI U., GINZLER CH., GRAF U., MAYER P., ZWEIFEL R., WOHLGEMUTH T., 2006: Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern - Eidg. Forschungsanstalt WSL, CH-8903 Birmensdorf, Forum für Wissen 2006: 23-33 (www.wsl.ch/lm/publications/e-publ/forum/2006/Forum_06_23_33.pdf).

- RIPARTIZIONE FORESTE DI BOLZANO, 2006: Classificazione delle tipologie forestali dell'Alto Adige. – (in progress).
- RIPULLONE F., BORGHETTI M., CERNUSAK L., MATSUO N., FARQUHAR G., 2006: Isotopi del carbonio e dell'ossigeno: un utile strumento per analizzare i flussi di CO₂ e H₂O tra le piante e l'atmosfera – Sezione Speciale: Atti 5° Congresso SISEF: Foreste e Società - Cambiamenti, Conflitti, Sinergie in Italian Society of Silviculture and Forest Ecology - *Forest@* 3 (2): 205-212, 2006.
- RIVAS-MARTINEZ S., 1990: Bioclimatics Belts of west Europe (Relations between Bioclimate and Plant Ecosystems) Comm. Europ. Communities Climat. Nat. Hazards Rev. Prag. Arles, France.
- SAURER M., CHERUBINI P., BONANI G., SIEGWOLF R., 2003: Tracing carbon uptake from a natural CO₂ spring into tree rings: an isotope approach. *Tree Physiology* 23: 997-1004.
- SAURER M., CHERUBINI P., SIEGWOLF R., 2000: Oxygen isotopes in tree rings of *Abies alba*: The climatic significance of interdecadal variations. *Journal of Geophysical Research* Vol. 105, No. D10, p. 12, 461-470.
- SCHLOERER J., 1996: Why does atmospheric CO₂ rise – Uni. Ulm Biometrie & Med. Dokumentation, Ulm, Germany - Version 3.1, October 1996 (<http://www.radix.net/~bobg>).
- SCHWEINGRUBER F.H., 1983: Der Jahrring – Paul Haupt Bern u. Stuttgart.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1988: Tree rings. Basics and applications in dendrochronology - Reidel, Dordrecht, The Netherlands.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1993: Trees and wood in dendrochronology - Springer Verlag, Berlin.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1996: Tree rings and environment. Dendroecology - Paul Haupt, Berne.
- SIEGWOLF R. & SAURER M., 2000: Einführung zur Isotopenanalytik in der Ökologie und Physiologie der Pflanzen. Basel, 27./28. April, 2000 (unveröffentlicht).
- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R., 1955: The water balance. Dressel Institute of Technology, Centerton New Jersey.
- TREYDTE K., SCHLESER G.H., SCHWEINGRUBER F.H., WINIGER M., 2001. The climatic significance of δ¹³C in subalpine spruces (Lötschental, Swiss Alps). A case study to altitude, exposure and soil moisture. *Tellus* 53B, 593-611.
- ZINGG A. & BRANG P., 2003: Sterben Buchen wegen der Trockenheit? – Swiss Federal Institute for Forest, Snow & Landscape Research (WSL), Wald und Holz 9/2003.

