

MANUELA PELFINI (*), MAURIZIO SANTILLI (*) & MARTA COLZANI

L'EROSIONE DEI SENTIERI IN ALTA MONTAGNA. INDAGINI DENDROGEOMORFOLOGICHE E STIME QUANTITATIVE LUNGO ALCUNI ITINERARI DELLA VALFURVA (SONDRIO)

ABSTRACT: PELFINI M., SANTILLI M. & COLZANI M., *The erosion of tourist trails in high mountain. Dendrogeomorphological analysis and quantitative evaluations on some paths in Valfurva (Sondrio, Central Italian Alps)*. (IT ISSN 1724-4757, 2005).

The high mountain landscape is changing, following the climatic trend. Glaciers are retreating and new scenarios and mountain trails are now utilizable by tourists. The environment is somewhere affected by human impact due to the increased frequentation. Where mountain trails are cut on steep slopes a deepening of paths can be observed. In the present work the soil loss along some paths in the Upper Valtellina was estimated.

Along paths located below the timberline a dendrochronological analysis was carried out in order to evaluate the damages on roots, and on tree growth. Samples of stems and exposed roots were collected from 34 living trees. Two reference chronologies were built for *Larix decidua* Mill. and *Pinus cembra* L. The results show changes in the trees and roots growth in the last twenty years. The deepening of the trail has been extremely rapid on the lateral moraine of the Forni Glacier (13 mm in less than ten years) on the left side of the valley, frequented since 1995.

KEY WORDS: Erosion, Dendrogeomorphology, Mountain trails, Valfurva, Italy.

RIASSUNTO: PELFINI M., SANTILLI M. & COLZANI M., *L'erosione dei sentieri in alta montagna. Indagini dendrogeomorfologiche e stime quantitative lungo alcuni itinerari della Valfurva (Sondrio)*. (IT ISSN 1724-4757, 2005).

Il paesaggio d'alta montagna presenta un'evoluzione piuttosto rapida, specie alle alte quote, in risposta alle variazioni climatiche in atto. L'ambiente glaciale lascia progressivamente spazio a quello periglaciale e, parallelamente, si aprono nuovi scenari per il turista a cui vengono proposti itinerari diversi. L'intensificarsi del turismo e l'ampliamento delle proposte possono determinare, tuttavia, un impatto sul territorio; tra le conseguenze si osserva a volte una progressiva erosione superficiale lungo alcuni tratti di sentiero, che tendono ad approfondirsi. Nel presente lavoro

sono stati stimati la quantità di materiale rimosso e il tasso di erosione lungo alcuni itinerari escursionistici dell'Alta Valtellina («Sentiero Glaciologico del Centenario al Ghiacciaio dei Forni», «Giro della Val Cedech» e «Sentiero Luseda-Campec»). Per gli itinerari ubicati sotto il limite della vegetazione arborea è stato anche condotto uno studio dendrogeomorfologico al fine di valutare gli effetti del calpestio sulle radici degli alberi e la variazione del carico turistico nel tempo.

TERMINI CHIAVE: Erosione, Dendrogeomorfologia, Sentieri, Valfurva, Italia.

INTRODUZIONE

L'ambiente d'alta montagna rappresenta sicuramente un peculiare modello di evoluzione, legato prevalentemente alla morfogenesi glaciale, controllata a sua volta dalle vicende climatiche. Il paesaggio delle testate vallive, caratterizzato oggi dalla presenza di masse glaciali in progressivo ritiro, descrive attraverso la geometria e la successione delle morene deposte la storia climatica recente. L'evoluzione del paesaggio alle quote più elevate è attualmente molto rapida; di anno in anno la contrazione dei ghiacciai e l'arretramento delle fronti glaciali lasciano scoperti nuovi territori, soggetti a rapidi e continui rimaneggiamenti ad opera dei processi gravitativi e di quelli tipici dell'ambiente periglaciale. Più a valle la velocità di cambiamento sembra minore, anche se spesso si osserva una variazione di intensità di alcuni fenomeni clima-dipendenti o clima-correlati, quali ad esempio le frane per colata (*debris flow*) (Pelfini, 2001; Pelfini & Santilli, 2003).

In questo ambiente, quanto mai spettacolare e al contempo fragile, si aprono nuovi scenari per il turista, oggi più interessato agli aspetti naturalistici ed alla frequentazione di sentieri mono e pluritematici (Pelfini & alii, 2004; Diolaiuti & alii, 2002a-2002b). La segnalazione di nuovi percorsi dirige i flussi turistici anche lungo itinerari sino a pochi anni fa poco frequentati. Ciò da un lato permette la fruizione di spettacolari bellezze naturali (geomorfositi),

(*) Dipartimento di Scienze della Terra «Ardito Desio», Università di Milano, via Mangiagalli 34 - 20133 Milano.

Lavoro eseguito nell'ambito del cofinanziamento MURST 40% 2002 - progetto: Il clima e i rischi geomorfologici in relazione allo sviluppo turistico. Coord. Naz. Prof. M. Piccazzo; Resp. Loc. Prof. M. Pelfini.

Si ringrazia il Parco Nazionale dello Stelvio per le autorizzazioni ai campionamenti dendrocronologici.

dall'altro pone il problema dei possibili impatti su ambienti dall'equilibrio alquanto fragile.

Ne è un esempio classico il «Sentiero Glaciologico del Centenario» al Ghiacciaio dei Forni, in Valfurva (Pelfini, 1995; Smiraglia, 1995), inaugurato nel 1995 dove, lungo i tratti di sentiero più ripidi, ubicati in cresta alle morene «a lama di coltello», prima percorsi solo di rado dagli escursionisti, comincia ad essere evidente un solco in via di approfondimento.

Anche nelle zone boschive il flusso turistico è in grado di lasciare traccia delle sue variazioni, questa volta nella vegetazione arborea ubicata lungo i sentieri, che può subire danni di vario tipo, come il taglio di rami che sporgono sul percorso e il calpestio delle radici, progressivamente esposte a causa dell'approfondirsi del sentiero.

I danni meccanici sulla vegetazione vengono registrati nelle caratteristiche morfologiche degli anelli di crescita annuale, i quali costruiscono progressivamente un archivio di dati utilizzabile, in questo caso, per la stima della pressione legata al passaggio degli escursionisti lungo il sentiero.

Nel presente lavoro si è cercato di stimare la velocità di approfondimento di alcuni sentieri escursionistici ubicati in Alta Valtellina, nel Parco Nazionale dello Stelvio, evidenziando, dove possibile, le variazioni di «carico» turistico.

AREA DI STUDIO

L'area di studio è ubicata nella Valle dei Forni (alta Valfurva, fig. 1), dove sono stati presi in considerazione il «Sentiero Luseda-Campec», il «Sentiero Glaciologico del Centenario al Ghiacciaio dei Forni» e il «Giro della Val Cedech». I tre percorsi differiscono per le caratteristiche morfologiche del paesaggio che attraversano, per la quota e per il grado di frequentazione turistica.

Il «Sentiero Luseda-Campec» si articola tra la località Luseda (1.763 m), nei pressi di S. Caterina Valfurva, e la località Campec (2.059 m), vicino al Rifugio Stella Alpina, con un percorso che attraversa un bosco di conifere ed aree a pascolo sviluppate su alcuni conoidi. Si tratta di un sentiero frequentato in prevalenza da gruppi alloggiati in campeggi, avviati negli anni '60, e in case-vacanza.

Il «Sentiero Glaciologico dei Forni» si sviluppa per circa 8 km dapprima su versante, poi su una morena tardiglaciale, segue quindi la cresta della morena laterale destra, deposta all'acme della Piccola Età Glaciale (PEG), per poi perdersi sul ghiacciaio, attraversabile traguardando alcune paline. Successivamente il sentiero prosegue in discesa, impostato dapprima in cresta alla morena laterale sinistra deposta all'acme della PEG, quindi su depositi glaciali del Ghiacciaio di San Giacomo, per terminare sulla morena frontale più esterna corrispondente ad un'avanzata verificata poco prima di 2.670 ± 130 anni ^{14}C (Orombelli & Pelfini, 1985; Smiraglia, 1995). L'itinerario, permette di osservare e ripercorrere la storia glaciale recente e di osservare la dinamica glaciale passata ed attuale.

Il «Giro della Val Cedech» è un percorso ad anello, con un dislivello di circa 500 m, che parte dal parcheggio dei Forni (P in fig. 1), sale lungo depositi glaciali fino ad

intercettare la morena tardiglaciale laterale destra dei ghiacciai che scendevano dalla Val Cedech e prosegue verso il Rifugio Pizzini, per poi passare sul versante vallivo sinistro, in prevalenza su falde e coni detritici. Questo tratto rappresenta un itinerario di collegamento con il rifugio Branca nel complesso poco frequentato, in quanto ad esso viene preferita la strada sterrata percorribile anche con mezzi fuoristrada.

OBIETTIVI E METODI DI INDAGINE

L'obiettivo del presente lavoro è di valutare, ove possibile, la quantità di materiale (suolo, regolite) rimossa dai sentieri. Alla progressiva erosione concorrono sia i numerosi passaggi dei turisti, azione che risulta più efficace sui tratti ad elevata pendenza, sia i fattori naturali di erosione (dilavamento, azione del vento e della gravità), a loro volta facilitati dall'asportazione del suolo (Cremaschi & Rodolfi, 1991). Infatti, ad innescare un'erosione anormale concorrono non solo eventi naturali con carattere di eccezionalità, ma anche attività antropiche, che tendono ad assottigliare il suolo fino a far affiorare il substrato geologico (Rodolfi, 1991 in Cremaschi & Rodolfi, 1991); la resistenza all'erosione dipende, oltre che dalle caratteristiche del suolo, anche dalla posizione topografica, dall'inclinazione del pendio e dall'intensità del disturbo antropico. Si osserva come effetto diretto un abbassamento della superficie del suolo, specie nel tratto medio superiore dei versanti, reso visibile da situazioni tipiche quali l'esposizione dell'apparato radicale delle piante o l'assottigliarsi degli orizzonti superiori del suolo (Panicucci, 1972).

La presente ricerca si riferisce a zone dove comunque i suoli hanno uno sviluppo superficiale e le misure sono state applicate unicamente lungo i sentieri.

Per valutare il tasso d'erosione sono stati applicati metodi diversi in funzione delle caratteristiche del percorso: sopra il limite della vegetazione arborea sono state eseguite solo misure dirette dei parametri geometrici del sentiero, mentre al di sotto si è proceduto anche con indagini di tipo dendrocronologico.

Ogni 10 m di percorso sono state misurate profondità e larghezza del tracciato, caratteristiche e pendenza del versante o della forma attraversata, ad eccezione dei tratti di sentiero poco identificabili perché impostati su cono di detrito, affioramenti rocciosi, canali di valanga e tratti lastricati.

È stata considerata la lunghezza di ciascun percorso (Ls) e sono stati calcolati il volume di materiale rimosso (Vs) e il rapporto tra volume di materiale asportato e lunghezza dei percorsi (Vs/Ls).

Per quanto riguarda il «Sentiero Luseda-Campec», che attraversa un'area boschiva, la stima dell'erosione è stata realizzata anche impiegando tecniche dendrogeomorfologiche in quanto l'approfondirsi del tracciato, dovuto ai ripetuti passaggi degli escursionisti, determina una progressiva esposizione delle radici degli alberi, con conseguente formazione di cicatrici d'abrasione, e un generale disturbo del normale sviluppo delle piante (fig. 2).

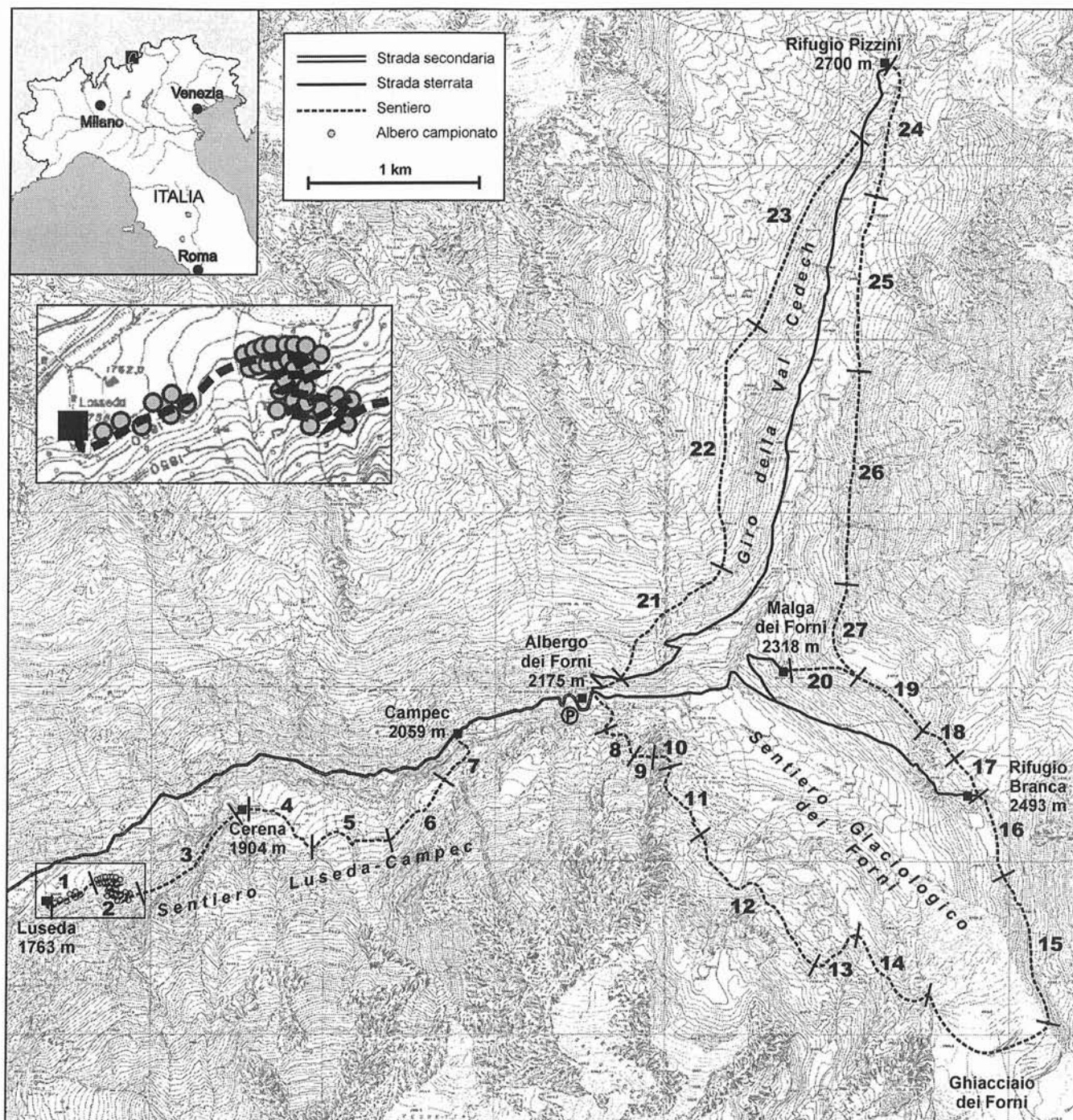


FIG. 1 - Ubicazione degli itinerari oggetto di indagine in Alta Valfurva. I numeri indicano i tratti di sentiero analizzati in tabella 1.

L'esposizione delle radici provoca, infatti, un cambiamento delle condizioni ambientali in cui queste vengono a trovarsi, stimola il loro sviluppo più in profondità (Alestalo, 1971) e modifica la loro anatomia, che passa da quella tipica della radice a quella tipica del fusto (Gärtner, 2003; Gärtner & alii, 2001). Inoltre, spesso queste radici appaiono, in sezione trasversale, allungate verticalmente, poiché

l'erosione rimuove la corteccia e il cambio dalla superficie superiore della radice, che continua invece a crescere sul lato inferiore protetto (LaMarche, 1963). La datazione delle cicatrici d'abrasione sulle radici indica il momento in cui è avvenuta l'esposizione (Carrara & Carrol, 1979).

Il presente studio è stato condotto su 34 alberi (18 larici, *Larix decidua* Mill., e 16 cembri, *Pinus cembra* L.) con



FIG. 2 - Radici esposte lungo il Sentiero Luseda-Campec (foto Colzani, 2002).

radici esposte, ubicati in gran parte lungo il tratto a tornanti del sentiero (fig. 1).

Per calcolare l'abbassamento della superficie del suolo è stata misurata la distanza tra la superficie del terreno ed il colletto degli alberi (D in fig. 3), mentre il tasso di erosione è stato ottenuto dividendo questa distanza per l'età degli alberi stessi [$E = D/A$ dove E rappresenta il tasso di erosione, D la profondità di esposizione e A l'età dell'albero] (Alestalo, 1971; Hupp & Carey, 1990). L'età degli alberi è stata ottenuta prelevando, mediante succhiello di Pressler, un campione (*carota*) alla base di ognuno dei 34 alberi studiati e contando gli anelli annuali di crescita.

Sono state quindi studiate le eventuali alterazioni dello sviluppo degli alberi dovute al disturbo arrecato dalla presenza del sentiero, analizzando le corrispondenti curve di crescita.

Per quanto riguarda le radici esposte, i campioni sono stati prelevati sia in corrispondenza delle eventuali cicatrici, sia del margine calloso, sia esternamente alla porzione

danneggiata (fig. 3). Complessivamente sono state campionate 39 radici esposte (21 prelevate da larici e 18 da cembri), per un totale di 74 carote (42 di larice e 32 di cembro). Di queste solo 63 si sono rivelate utili per l'analisi (36 di larice e 27 di cembro).

Per l'influenza sulla crescita del fusto sono state prelevate due carote per ognuno dei 34 alberi a circa 1 m da terra, per un totale di 68 carote.

Sono stati infine campionati, a circa 1 m da terra, 30 larici e 32 cembri (per un totale di 124 carote) esterni al sentiero da utilizzare per la costruzione delle cronologie di riferimento. Queste rappresentano la crescita media in condizioni indisturbate e costituiscono, pertanto, il termine di confronto per le curve dendrocronologiche degli alberi danneggiati lungo il sentiero. La variazione dello spessore anulare della cronologia di riferimento è idealmente indipendente dai processi geomorfologici (Wiles & alii, 1996); ciò rende la cronologia uno strumento indispensabile per il confronto con le curve degli alberi oggetto di studio. La loro realizzazione è pertanto necessaria per sincronizzare i campioni prelevati da piante danneggiate e datare quindi con precisione le cicatrici e le brusche variazioni di crescita (Schweingruber, 1988).

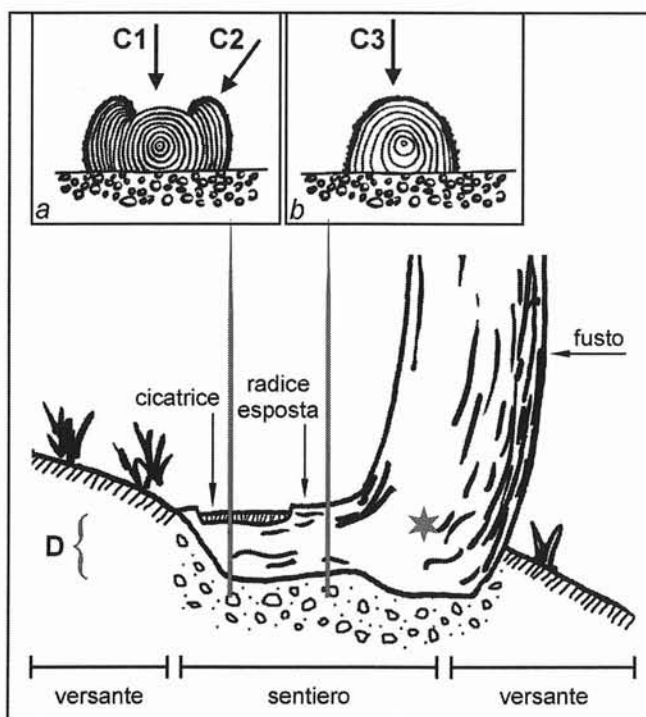


FIG. 3 - Schema della tipica situazione osservabile lungo il sentiero Luseda-Campec. La radice esposta, caratterizzata dalla presenza di una cicatrice, attraversa il sentiero. D indica l'approfondimento del sentiero dato dalla distanza tra la superficie del terreno ed il colletto dell'albero (asterisco). Nel riquadro sono schematizzate le sezioni della radice con cicatrice (a) e senza (b). Le posizioni in cui sono state prelevate le carote sono indicate come $C1$ (in corrispondenza della cicatrice), $C2$ (in corrispondenza del margine calloso) e $C3$ (su radice esposta senza cicatrice).

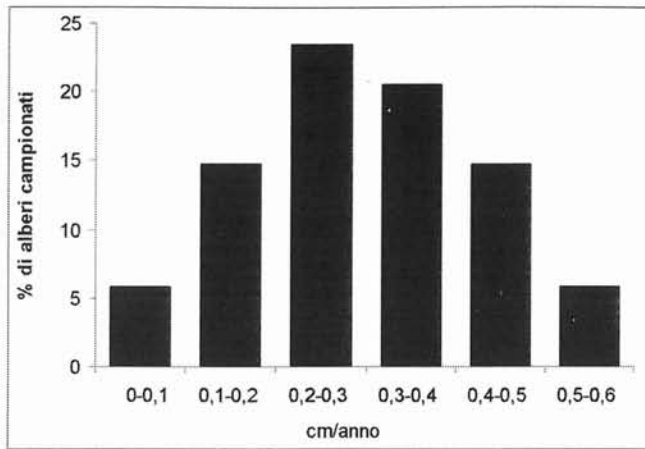


FIG. 4 - Tasso di approfondimento del Sentiero Luseda-Campec.

Le curve di crescita di tutti i campioni sono state costruite misurando la larghezza degli anelli con il programma TSAP (Rinn, 1996) e con analisi di immagine usando il software WINDENDRO. Ogni curva di crescita è stata sottoposta a cross-datazione con il programma COFECHA (Holmes, 1983).

La cronologia di riferimento relativa al larice, realizzata per la bassa Valle dei Forni, copre il periodo dal 1876 al 2001, mentre quella relativa al cembro va dal 1849 al 2001.

Per individuare eventuali brusche variazioni dello sviluppo, le curve di crescita di ogni campione sono state cross-datate e confrontate con le cronologie di riferimento; per datare le cicatrici d'abrasione, invece, il confronto è stato effettuato anche con le curve ricavate dai campioni prelevati dal fusto e in altri punti della stessa radice.

L'EROSIONE LUNGO IL SENTIERO LUSEDA-CAMPEC

TASSO DI EROSIONE

La misura della distanza tra il colletto e l'attuale superficie topografica divisa per l'età dell'albero ha permesso di stimare il tasso di approfondimento del sentiero. Quasi il 50% degli alberi ha fornito una velocità di erosione nel punto corrispondente compresa tra 2 e 4 mm/anno (fig. 4). Si può quindi ricavare un tasso medio di approfondimento pari a 2,5 mm/anno.

ALTERAZIONI DELLA CRESCITA RADIALE

Il confronto tra le curve di crescita delle radici con quelle del fusto dello stesso albero e con la cronologia di riferimento mostra un'evidente variazione dello sviluppo degli anelli radicali nel corso del tempo. Nelle curve di crescita delle radici esposte si osserva, su 13 dei 34 alberi esaminati, dopo un periodo di crescita uniforme, un brusco incremento della larghezza degli anelli, cui segue una

diminuzione considerevole della produzione di legno (figg. 5 e 6).

La fase di aumento di larghezza degli anelli delle radici segue quindi, in linea generale, l'andamento della cronologia e della curva relativa al fusto, ma presenta una risposta molto marcata. Il brusco incremento della larghezza degli anelli corrisponderebbe al momento di esposizione della radice, la cui crescita si interrompe nel caso di ingenti danni al cambio (apertura di ferite documentate dalla presenza di cicatrici) o prosegue in modo accelerato per produzione di tessuto calloso e/o per variazioni anatomiche (passaggio da struttura della radice a struttura del fusto).

L'intervallo tra l'inizio dell'incremento della crescita radicale e il raggiungimento del picco massimo è in media di 5 anni.

Dopo il picco positivo, le curve relative alle radici presentano un rapido declino del tasso di crescita (fig. 5).

Sono state evidenziate, inoltre, 36 cicatrici d'abrasione, dovute ai danni provocati alle radici (figg. 5 e 7). La loro età si colloca tra il 1979 e il 1998 (fig. 8) (solo due cicatrici indicano date precedenti: 1934 e 1960). Si può quindi ipotizzare che l'asportazione di suolo e di regolite sia stata particolarmente intensa negli ultimi vent'anni.

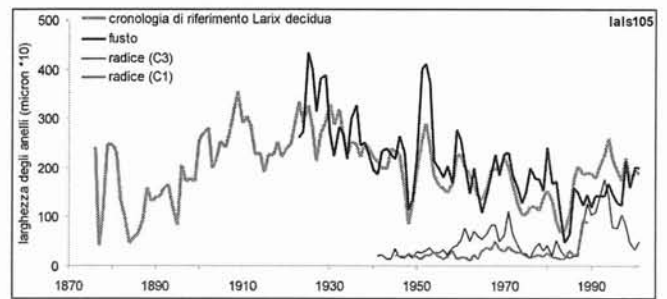


FIG. 5 - Confronto tra le curve di crescita delle radici e del fusto con la cronologia di riferimento del larice. Nel campione *lals105* la curva di crescita del fusto concorda con l'andamento della cronologia di riferimento. La radice (C3) mostra un brusco incremento della crescita a partire dal 1988, che dura per sei anni ed è seguito da una brusca riduzione. La radice (C1) ha una cicatrice datata 1989.

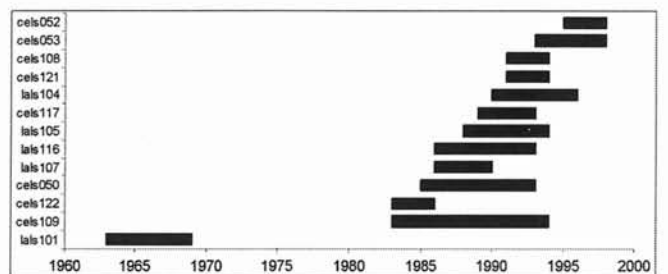


FIG. 6 - Intervallo in cui la crescita delle radici esposte presenta un brusco incremento rispetto alla curva di crescita del fusto ed alla cronologia.

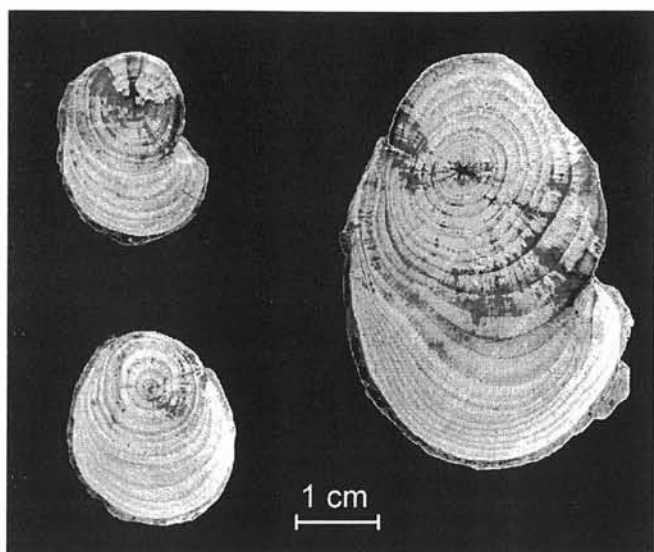


FIG. 7 - Sezioni di radici esposte con cicatrici d'abrasione (foto Colzani, 2002).

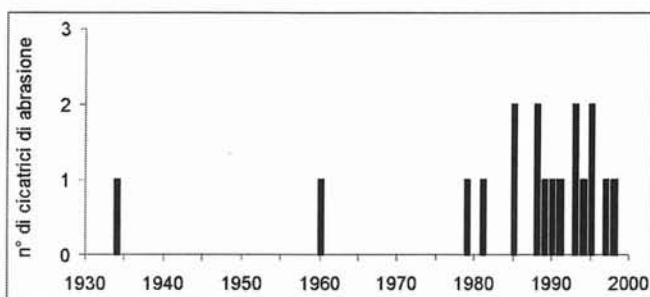


FIG. 8 - Datazione delle cicatrici d'abrasione sulle radici esposte lungo il Sentiero Luseda-Campec.

Situazioni particolari, inoltre possono portare localmente alla morte definitiva della radice, qualora venga esposto anche l'apice radicale, come verificatosi per il campione *cels050* dove le carote prelevate da alcune radici mostrano l'interruzione della crescita intorno al 1994.

A livello del fusto non si osserva, invece, un'alterazione significativa dello sviluppo che possa essere attribuita al disturbo arrecato dal sentiero, poiché le curve di crescita hanno un andamento pressoché concorde con quello delle cronologie di riferimento, anche in presenza di radici esposte e danneggiate (fig. 5).

Si può immaginare come il processo di erosione del sentiero avvenga gradualmente, e si intensifichi parallelamente all'aumentare del carico di turisti che vi transitano e del tempo trascorso. Si verificano tuttavia variazioni locali dovute alle diverse situazioni topografiche e morfologiche; ne consegue che anche il disturbo arrecato agli alberi ubicati lungo il sentiero procede parallelamente, variando sia in funzione dell'erosione normale e «da trekking» sia an-

che in relazione alla sensibilità della specie considerata e a quella individuale di ogni singolo albero.

Dall'analisi delle radici e dei fusti degli alberi campionati è possibile dedurre pertanto diversi gradi di disturbo, ricavati dalle diverse reazioni e alterazioni dello sviluppo. Le osservazioni raccolte permettono di dividere gli alberi esaminati in due gruppi.

Un primo gruppo non mostra variazioni della crescita evidenti né del fusto, né della radice (fig. 9). Osservando le rispettive curve dendrocronologiche infatti, è evidente il medesimo trend di crescita. Si può ritenere che, nei punti del sentiero corrispondenti, l'erosione non costituisca ancora un fattore limitante per la crescita.

È probabile che nella prima fase dell'erosione e dell'approfondimento del sentiero avvenga una progressiva esposizione delle radici arboree che diventano poi, col tempo, una sorta di ostacolo al passaggio degli escursionisti e spesso un gradino naturale utilizzato per l'appoggio dei piedi.

Un secondo gruppo di alberi (fig. 5), infatti, presenta radici scoperte ed un brusco incremento della crescita radiale che dura in media 5 anni fino a raggiungere un massimo. Il brusco incremento della crescita potrebbe essere attribuito all'inizio dell'esposizione, e quindi al passaggio in ambiente subaereo mentre il successivo rapido decremento della crescita radicale potrebbe indicare il danno causato dal calpestio, che provoca traumi meccanici fino all'eventuale formazione di cicatrici d'abrasione. Questa situazione può essere messa in relazione con uno stadio più avanzato di approfondimento del sentiero, in cui, probabilmente, l'albero risente in modo rilevante dell'esposizione delle radici e del loro calpestio.

Analizzando i periodi in cui sono state riscontrate le anomalie dello sviluppo radicale e le cicatrici d'abrasione, si può osservare come gran parte di queste siano concentrate negli ultimi 20-30 anni. Questa situazione potrebbe essere messa in relazione con l'incremento della frequentazione turistica avvenuto negli ultimi decenni.

Velocità di erosione lungo la morena laterale sinistra del «Sentiero Glaciologico dei Forni»

Lungo il «Sentiero Glaciologico dei Forni» si osservano alcune situazioni particolari: ad esempio le creste delle

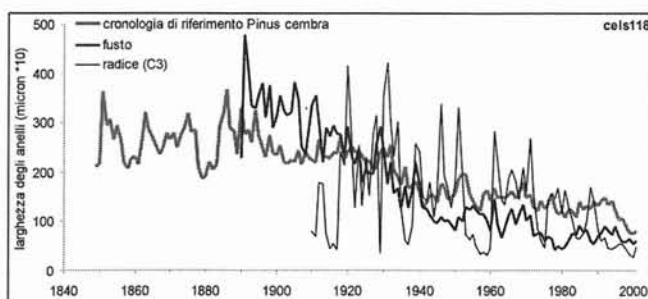


FIG. 9 - Grafico relativo al campione *cels118* appartenente al primo gruppo di alberi, che non mostra alterazioni della crescita attribuibili all'erosione del sentiero.

morene deposte durante l'acme della PEG, simmetriche per posizione rispetto all'asse vallivo differiscono tra loro (nei tratti percorsi dall'itinerario) per la pendenza: la morena laterale sinistra viene percorsa su una cresta stretta e molto ripida (pendenza localmente intorno ai 25-30°; 14 in fig. 1). Molto diverso è anche il grado di frequentazione turistica, inteso sia come numero di escursionisti, sia come numero di anni in cui il sentiero è stato utilizzato. La morena in destra idrografica (15 in fig. 1; fig. 10), infatti, è frequentata da lungo tempo, vista la sua vicinanza al Rifugio Branca (2.487 m) e la facile accessibilità. La morena in sinistra idrografica (14 in fig. 1; fig. 11), invece, era raramente percorsa prima del 1995, poiché al di fuori degli itinerari più frequentati. Il preesistente sentiero, all'inizio una traccia appena accennata e scarsamente visibile, ha subito in meno di un decennio un sensibile allargamento e un notevole approfondimento dovuto al passaggio di centinaia di escursionisti durante le ultime stagioni estive (Pelfini & alii, 2004).

Il solco creato tra il 1995 e il 2002 in corrispondenza della cresta della morena laterale sinistra del Ghiacciaio dei Forni ha una profondità media di 103 mm. Conoscendo il momento in cui la frequentazione è diventata più intensa e la profondità del sentiero è possibile calcolare la velocità di erosione, che è pari a 13 mm/anno, oltre cinque volte superiore al tasso di erosione misurato per il «Sentiero Luseda-Campecc» (2,5 mm/anno).

Stima del materiale rimosso lungo i tre sentieri della Valle dei Forni

Per i tratti di sentiero non coperti da vegetazione arborea e frequentati da lungo tempo non è stato possibile mi-

surare un tasso di approfondimento, ad eccezione della porzione sulla morena laterale sinistra del Ghiacciaio dei Forni.

Dall'analisi dei parametri geometrici misurati direttamente sul terreno è stato tuttavia possibile stimare il volume di materiale rimosso come conseguenza dei ripetuti passaggi degli escursionisti, dei processi erosivi naturali attivi nell'area e dell'attività di manutenzione dei sentieri, nonché il rapporto Vs/Ls (materiale asportato per unità di percorso).

L'entità dell'erosione (tab. 1) è dello stesso ordine di grandezza per il Sentiero Glaciologico dei Forni (0,20 m³/m) e per il Giro della Val Cedech (0,21 m³/m), mentre è inferiore per il Sentiero Luseda-Campecc (0,12 m³/m). In questo caso, è probabile che vi sia da un lato una minore frequentazione di questo percorso rispetto agli altri esaminati e dall'altro una maggiore protezione del suolo da parte della vegetazione arborea, che riduce il ruscellamento superficiale.

I dati relativi ai singoli elementi morfologici indicano che l'approfondimento è minore in corrispondenza dei tratti di sentiero che percorrono le creste delle morene tardiglaciali (Vs/Ls = 0,01 m³/m), dove il turista tende a muoversi liberamente in zone pressoché pianeggianti. I tratti di percorso che invece hanno registrato il volume maggiore di materiale eroso si collocano in corrispondenza dei versanti più ripidi, a conferma di quanto indicato in letteratura. Ad esempio, lungo il tratto di sentiero dal Rifugio Albergò dei Forni ai Resti delle Caserme, in Val Cedech (21 in fig. 1 e in tab. 1), il rapporto Vs/Ls è pari a 0,36 m³/m, e sulla morena PEG laterale sinistra del Ghiacciaio dei Forni, dove Vs/Ls è pari a 0,46 m³/m (14 in fig. 1 e in tab. 1).



FIG. 10 - Morena laterale destra del Ghiacciaio dei Forni immediatamente a monte del Rifugio Branca, deposta durante la PEG (foto Santilli, 1999).



FIG. 11 - Particolare del tratto ripido della morena laterale sinistra del Ghiacciaio dei Forni su cui è evidente il solco in via di approfondimento (foto Gobbi, 2004).

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha permesso di osservare come l'ambiente d'alta montagna risponda in maniera sensibile non solo alle variazioni climatiche ed ambientali, ma anche alla frequentazione turistica, se questa si concentra in aree sensibili o con equilibrio precario.

L'analisi dendrocronologica ha mostrato come la vegetazione arborea costituisca un prezioso archivio di informazioni per stabilire in modo puntiforme la velocità di erosione e le variazioni della frequentazione turistica nel corso del tempo lungo i sentieri delle aree forestate.

Sebbene i risultati ottenuti abbiano valore solo per la zona studiata e non possano essere generalizzati, appare significativo il legame tra il calpestio, l'erosione del suolo e la crescita della vegetazione arborea. Le alterazioni dello sviluppo, costituite da bruschi incrementi e diminuzioni della crescita delle radici, possono essere in qualche modo

TABELLA 1 - Volume del materiale rimosso lungo i sentieri in corrispondenza delle diverse unità morfologiche prese in considerazione (V_s = volume materiale; L_s = lunghezza sentiero)

| | Tratto di sentiero | V_s (m ³) | L_s (m) | V_s/L_s |
|--|--------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| <i>Sentiero Luseda-Campecc</i> | 1 | 14,9 | 300 | 0,05 |
| | 2 | 334,0 | 1520 | 0,22 |
| | 3 | 2,9 | 880 | 0,003 |
| | 4 | 7,5 | 550 | 0,01 |
| | 5 | 17,0 | 260 | 0,07 |
| | 6 | 77,6 | 520 | 0,15 |
| | 7 | 48,3 | 240 | 0,20 |
| | <i>tot.</i> | 502,2 | 4270 | 0,12 |
| <i>Sentiero Glaciologico dei Forni</i> | 8 | 18,3 | 250 | 0,07 |
| | 9 | 24,3 | 170 | 0,14 |
| | 10 | 1,2 | 90 | 0,01 |
| | 11 | 101,2 | 350 | 0,29 |
| | 12 | 198,5 | 430 | 0,46 |
| | 13 | 32,3 | 270 | 0,12 |
| | 14 | 120,2 | 260 | 0,46 |
| | 15 | 39,0 | 740 | 0,05 |
| | 16 | 66,9 | 290 | 0,23 |
| | 17 | 15,6 | 200 | 0,08 |
| | 18 | 29,1 | 220 | 0,13 |
| | 19 | 3,6 | 360 | 0,01 |
| | 20 | 128,8 | 310 | 0,42 |
| | <i>tot.</i> | 779,0 | 3940 | 0,20 |
| <i>Giro della Val Cedec</i> | 21 | 399,1 | 1100 | 0,36 |
| | 22 | 12,8 | 830 | 0,02 |
| | 23 | 201,3 | 580 | 0,35 |
| | 24 | 124,1 | 760 | 0,16 |
| | 25 | 98,9 | 500 | 0,20 |
| | 26 | 167,3 | 800 | 0,21 |
| | 27 | 1,6 | 110 | 0,01 |
| | <i>tot.</i> | 1005,1 | 4680 | 0,21 |

ordinate secondo una sequenza di disturbo crescente, basata su una progressiva esposizione dell'apparato radicale per erosione e approfondimento del sentiero e sul danneggiamento meccanico operato dal calpestio.

Gran parte dei segnali osservati testimonia come l'esposizione di numerose radici sia avvenuta negli ultimi venti anni. Ciò è probabilmente da mettere in relazione sia all'aumento generalizzato della frequentazione turistica che si è avuto negli ultimi decenni, sia al sempre maggiore utilizzo delle aree adibite a campeggio avviate negli anni '60 in prossimità della località Luseda.

Per quanto concerne la stima generale relativa agli altri itinerari, va tenuto conto che i valori misurati comprendono anche la rimozione del materiale dovuta al mantenimento dei sentieri, ripristinati in alcuni tratti. Ciò che però emerge in modo significativo è l'estrema rapidità con cui si è approfondito il breve tratto di sentiero lungo la cresta della morena laterale sinistra deposta dal Ghiacciaio dei

TABELLA 2 - Classificazione dell'erosione del suolo proposta da Zachar (1982), ripresa da Cremaschi & Rodolfi (1991)

| Livello di erosione | Intensità annua mm m ³ /ha | | Attributo erosione | Tempo teorico occorrente per erodere 20 cm di suolo (anni) |
|---------------------|---|------------|----------------------|---|
| 1 | <0,05 | <0,5 | Nulla o trascurabile | > 400 |
| 2 | 0,05-0,5 | 0,5-5,0 | Leggera | > 400 |
| 3 | 0,5-1,5 | 5,0-15,0 | Moderata | 400-133 |
| 4 | 1,5-5,0 | 15,0-50,0 | Severa | 133-40 |
| 5 | 5,0-20,0 | 50,0-200,0 | Molto severa | 40-10 |
| 6 | >20,0 | >200,0 | Catastrofica | < 10 |

Forni durante la Piccola Età Glaciale. Qui, infatti, il solco è stato decisamente ampliato dal passaggio degli escursionisti che tendono a «puntare» gli scarponi nel terreno per far presa sul pendio ripido.

Facendo riferimento solo ai tratti di itinerario per i quali la frequentazione turistico-escursionistica può essere ritenuta tra le cause principali di erosione è stata utilizzata la «Classificazione dell'erosione in base alla quantità di materiale rimosso» proposta da Zachar (1982) per stabilire «l'attributo di erosione» (Cremaschi & Rodolfi, 1991; tab. 2).

Sulla base di questa classificazione, l'erosione media del Sentiero Luseda-Campec (2,5 mm/anno) può essere definita severa. In queste condizioni occorrerebbero 133-30 anni per erodere 20 cm di suolo. Per la morena laterale sinistra (PEG) del sentiero glaciologico dei Forni, invece, l'erosione (13 mm/anno) può essere ritenuta molto severa, e sarebbero necessari 40-10 anni per erodere 20 cm di suolo.

Occorre però precisare che questa classificazione si riferisce ad un'erosione areale che comprende quella idrica da impatto e da ruscellamento diffuso, e quella eolica. I limiti tra i livelli sono convenzionali in quanto l'intensità del processo di erosione dipende da molteplici cause (Rodolfi, 1991 in Cremaschi & Rodolfi, 1991). Tale classificazione, probabilmente, non può essere utilizzata come tale per definire il livello di erosione su un'area così limitata, ma permette comunque di evidenziare da un lato il ruolo del «carico turistico» e dall'altro la fragilità di alcune forme del paesaggio d'alta montagna.

In conclusione, il carico turistico sui sentieri dimostra di essere un agente di erosione non trascurabile che può provocare modificazioni più o meno marcate che possono assumere un'importanza determinante in quelle aree dove le forme del paesaggio sono in una situazione di disequilibrio o dove le forme attraversate dai sentieri hanno vita breve per le loro caratteristiche geomorfologiche intrinseche. Ciò non deve limitare la proposta di nuovi itinerari per la valorizzazione delle aree poco conosciute, ma deve far sì che questa di articoli in modo consapevole per consentire la fruizione dei geomorfositi più spettacolari senza alterarne la loro bellezza ed il loro valore, magari semplicemente modificando, ove possibile, il tracciato.

BIBLIOGRAFIA

- ALESTALO J. (1971) - *Dendrochronological interpretation of geomorphic processes*. Fennia, 105, 1-140.
- CARRARA P.E., CARROL T.R. (1979) - *The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado*. Earth Surf. Proc. Landf., 4, 307-317.
- CREMASCHI M. & RODOLFI G. (a cura di) (1991) - *Il suolo*. Nuova Italia Scientifica, 427 pp.
- DIOLAIUTI G., D'AGATA C., PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (2002a) - *Gestione tramite GIS di beni geomorfologici, glaciologici e naturalistici per la valorizzazione mediante un turismo sostenibile di aree di alta montagna*. Atti su CD-Rom Convegno «GIS per la tutela e valorizzazione dei beni ambientali e storico-culturali», Firenze, 25 Maggio 2001.
- DIOLAIUTI G., D'AGATA C., PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (2002b) - *Geomorphosites in glacialized areas: routes in the upper Valtellina for the valuing of the high mountain environment*. Proceedings Workshop «Geomorphological sites: research, assessment and improvement». Modena Italy, 19-22 June 2002, 57-58.
- GÄRTNER H. (2003) - *Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse*. Dissertationes Botanicae, Band 378, 118 pp.
- GÄRTNER H., SCHWEINGRUBER F.H. & DIKAU R. (2001) - *Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots*. Dendrochronologia, 19 (1), 81-91.
- HOLMES R.L. (1983) - *Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement*. Tree-ring Bull. 43, 69-77.
- HUPP C.R. & CAREY W.P. (1990) - *Dendrogeomorphic approach to estimating slope retreat. Maxey Flats, Kentucky*. Geology, 18, 658-661.
- LAMARCHE JR V.C. (1963) - *Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California*. U.S. Geological Survey Professional Paper 475, 148-149.
- OROMBELLI G. & PELFINI M. (1985) - *Una fase di avanzata glaciale nell'Olocene superiore, precedente alla Piccola Glaciazione, nelle Alpi Centrali*. Rend. Soc. Geol. It., 8, 17-20.
- PANICUCCI M. (1972) - *Ricerche orientative sui fenomeni erosivi nei terreni argillosi*. Annali Ist. Sper. Studio e Difesa del Suolo, 3, 197-216.
- PELFINI M. (1995) - *La storia del Ghiacciaio dei Forni*. In SMIRAGLIA C. (1995) - *Ghiacciaio dei Forni. Il sentiero glaciologico del centenario*. Lysis Guide Natura, 19-34.
- PELFINI M. (2001) - *Variazioni climatiche e processi correlati: L'esempio dell'instabilità dei versanti e della sua registrazione nelle conifere*. Atti del Convegno: L'uomo e l'ambiente d'alta montagna, dalla conflittualità all'integrazione, Mem. Soc. Geogr. Ital., 66, 287-331.
- PELFINI M., BELÒ M., D'AGATA C. & SMIRAGLIA C. (2004) - *The collapse of an ice corred moraine along a tourist trail*. EGS, Nizza, Aprile 2004, EGU04-A-06973.
- PELFINI M., DIOLAIUTI G. & SMIRAGLIA C. (2004) - *Proposte ed esempi di fruizione turistica dell'alta montagna glacializzata: metodi di indagine per la percezione dei beni geomorfologici e per la loro valorizzazione*. In: F. Adamo (ed.), «Turismo e territorio in Italia», I, Patron (ed.), 355-363.
- PELFINI M. & SANTILLI M. (2003) - *Variabilità spazio temporale dei processi di versante in alta montagna negli ultimi secoli, indagati mediante tecniche dendrogeomorfologiche*. In: Biancotti & Motta (eds.), «Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali», Atti convegno conclusivo, Bologna, 10-11 Febbraio 2000, 345-364.
- RINN F. (1996) - *TSAP-Reference manual*. Rinn, Heidelberg, 262 pp.
- SCHWEINGRUBER F.H. (1988). *Tree-ring. Basic and applications of dendrochronology*. Kluwer Academic Publisher. 276 pp.
- SMIRAGLIA C. (1995) - *Ghiacciaio dei Forni. Il sentiero glaciologico del centenario*. Lysis Guide Natura, 19-34.
- WILES G.C., CALKIN P.E. & JACOBY G.C. (1996) - *Tree-ring analysis and quaternary geology: principles and recent applications*. Geomorphology, 16, 259-272.
- ZACHAR D. (1982) - *Soil Erosion*. Elsevier, Amsterdam, 547 pp.