

ESEMPI DI INTEGRAZIONE DI DENDROCRONOLOGIA E GEOMATICA PER LO STUDIO DEI PERICOLI NATURALI E I CAMBIAMENTI DEL PAESAGGIO

EXAMPLES OF DENDROCHRONOLOGY AND GEOMATICS INTEGRATION TO STUDY NATURAL HAZARDS AND LANDSCAPE CHANGES

M. Ciolli ^a, M. Bezzi ^a, G. Comunello ^a, G. Laitempergher ^a, S. Gobbi ^a, C. Tattoni ^a, M. G. Cantiani ^a

^a Department of Civil Environmental and Mechanical Engineering, University of Trento, Via Mesiano 77, I-38123 Trento (Italy) – marco.ciolli@unitn.it, marco.bezzi@unitn.it, gc.larix@gmail.com, GLaitempergher@stetspa.it, stefano.gobbi@unitn.it, clara.tattoni@unitn.it, maria.cantiani@unitn.it

PAROLE CHIAVE: GIS, Dendrocronologia, Valanghe, Colate di detrito, variazione del corso dei fiumi, foreste

KEY WORDS: GIS, Dendrochronology, Avalanches, Debris Flow, riverbed change, forests

Questo articolo è la traduzione e il sunto della versione sottomessa per uno SPECIAL ISSUE di APPLIED GEOMATICS collegata al convegno SIFET 2017.

RIASSUNTO

In un territorio come quello Italiano, soggetto a forti rischi di carattere valanghivo e idrogeologico in genere, lo studio ed il monitoraggio dei pericoli naturali sono di estrema importanza. Le serie storiche degli eventi sono talora disponibili, ma spesso i dati sono lacunosi. La storia passata ha dimostrato come lo studio e la mappatura di questi fenomeni potrebbero contribuire a evitare o ridurre i danni in futuro. In questo lavoro si presentano i risultati di alcuni studi svolti al Laboratorio di ecologia dell'Università di Trento attraverso un approccio integrato che combina geomatrica e tecniche dendrocronologiche. Si presentano dei casi di studio relativi a valanghe, colate di detrito, riforestazione naturale (Trentino) e cambiamenti del corso di fiumi (Albania). Le informazioni cartografiche utilizzate sono state ricavate da fonti ufficiali pubblicamente utilizzabili oppure elaborate da foto aeree o immagini satellitari. Tramite GRASS e QGIS è stato possibile creare delle mappe multi temporali che mostrano gli effetti dei fenomeni sulle foreste, produrre mappe di rischio e spazializzare informazioni provenienti dalle indagini dendrocronologiche. Integrando geomatrica e tecniche dendrocronologiche è stato possibile studiare le valanghe, le colate di detrito, le variazioni del corso dei fiumi e i cambiamenti del paesaggio ad un dettaglio tale da consentire talora la ricostruzione dei percorsi e dei volumi occorsi negli eventi. In un clima che cambia e dove gli eventi estremi tendono ad intensificarsi, queste ricostruzioni appaiono particolarmente importanti soprattutto per quelle aree che sono più esposte a dei rischi diretti di valanghe o colate di detrito.

ABSTRACT

The Italian territory is subject to high avalanche and hydrogeological risks and the monitoring of natural hazards is of extreme importance in this context. The historical records of past events are sometimes available but data are often incomplete. Past history showed that the monitoring and mapping of these phenomena can contribute to avoid or reduce damage in the future. We present the results of different studies carried out at the Ecology Lab of the University of Trento. In particular, an integrated approach has been used by combining geomatics and dendrochronology techniques. Case studies concerning avalanches, debris flows, natural reforestation (Trentino) and riverbed path changes (Albania) are presented. The cartographic information was provided by official sources of public organizations or processed from remote sensed imagery. Using GRASS and QGIS, it was possible to create multi-temporal maps showing the effects of the phenomena on forest landscape, to produce morphological and potential risk maps and to spatialize information coming from dendrochronological analysis. The integration of geomatics and dendrochronological techniques can effectively contribute to the study of avalanches, debris flow, riverbed change and landscape change, allowing the spatial and temporal modelling including the reconstruction of paths and volumes of occurred phenomena. In order to prevent new phenomena in a changing climate, these reconstructions are extremely important for the areas that are more exposed to the direct risks of avalanches and debris flows.

1. INTRODUZIONE

Lo studio ed il monitoraggio dei pericoli naturali sono di estrema importanza in Italia poiché il territorio è soggetto a forti rischi valanghivi ed idrogeologici, soprattutto nelle zone montuose. Le istituzioni governative locali dispongono di mappe che descrivono la localizzazione di alcuni di questi fenomeni e, a volte, sono disponibili anche registrazioni storiche degli eventi passati anche se spesso le informazioni sono incomplete. La storia passata e recente dimostra che lo studio e la mappatura di questi fenomeni può essere strategica per evitare o ridurre danni futuri.

Negli ultimi anni la comunità scientifica ha mostrato un crescente interesse nel rappresentare e modellare tramite GIS i rischi naturali come valanghe e colate di detrito, poiché questi fenomeni hanno causato molti disastri in tutto il mondo provocando anche perdite di vite umane (Tumajer and Trembl 2015; Pop et al. 2016; Jakob et al. 2013).

Le Alpi sono uno dei teatri naturali in cui questi fenomeni si verificano spesso, ma gli eventi recenti nella provincia de L'Aquila nel 2017 mostrano drammaticamente (Amos 2017) come essi possano essere distruttivi anche in Appennino. Molti studi hanno affrontato l'argomento utilizzando approcci di modellazione GIS (Dorren et al 2003; Volkwein et al., 2011) e sono disponibili in letteratura vari modelli GIS di valanghe,

colate di detrito e cadute di roccia (Dorren et al., 2007, Rammer et al., 2010; Volkwein et al., 2011; Horton et al. 2013).

Inoltre, l'interazione tra vegetazione e pericoli naturali è complessa. La copertura della vegetazione, in particolare quella forestale, è soggetta a cambiamenti di uso del suolo, dovuti a disturbi antropici, pericoli naturali e cambiamenti climatici. Ad esempio, la vegetazione forestale può mitigare l'erosione del suolo e consolidare i pendii delle montagne, ridurre gli effetti delle cadute di roccia e limitare la formazione di valanghe naturali (cioè quelle il cui distacco avviene per cause naturali e non per un disturbo antropico diretto come lo sci fuoripista). D'altra parte, la vegetazione forestale non può fermare una valanga una volta che questa si è distaccata e può talvolta causare problemi e inondazioni quando crea delle dighe occasionali nei corsi d'acqua. Tuttavia, nella maggioranza degli studi sopra nominati, si tiene conto della geomorfologia e della natura geologica delle aree, mentre le caratteristiche della vegetazione non sono considerate. È molto difficile valutare l'effettiva influenza della vegetazione su fenomeni altamente distruttivi come valanghe, colate di detrito e cadute di roccia, ma di fatto sottovalutare o sovrastimare questo aspetto fondamentale può portare a conclusioni molto inaffidabili. Alcuni studi interessanti condotti con un approccio tecnico hanno tentato di stimare la resistenza della vegetazione alle cadute di roccia (Dorren al 2006, Moos et al 2017).

La dendrocronologia (o tree-ring dating) è il metodo scientifico per datare gli anelli degli alberi, chiamati anche anelli di accrescimento (Stoffel e Bollschweiler 2008). Gli anelli di crescita delle piante e la forma degli alberi sono spesso in grado di raccontare gli eventi passati che hanno coinvolto la vegetazione. La dendrocronologia si può praticare su piante viventi o su legno morto ed è utile per determinare tassi di cambiamento nelle condizioni ambientali o per identificare precisamente eventi particolari che lasciano traccia negli anelli. La vegetazione che è stata interessata da fenomeni distruttivi può essere studiata in modi diversi, ma uno dei più affidabili e completi è quello di utilizzare la dendrogeomorfologia e la dendroecologia (Shroder 1980; Butler and Malanson 1985; Rayback 1998; Santilli and Pelfini 2002; Winchester et al. 2007), tecniche che usano l'osservazione della vegetazione vivente e dei campioni dendrocronologici per interpretare fenomeni particolari come valanghe (Corona et al., 2012; Voiculescu e Onaca 2014; Tumajer e Treml 2015; Pop et al. 2016) o colate di detrito (Procter et al., 2011; Jakob et al., 2013).

Queste tecniche sono utili non solo per ricostruire i percorsi delle valanghe o delle colate di detrito ma anche per consentire una valutazione dei volumi di neve o di detriti che sono stati coinvolti. Inoltre, quando un singolo evento può essere isolato dagli altri combinando dati dendrocronologici con osservazioni meteorologiche, si possono trarre interessanti considerazioni per la modellazione dei fenomeni. Queste considerazioni possono essere utili per sviluppare le previsioni di eventi futuri o per quantificare i rischi. L'integrazione della geomatica e della dendrocronologia ha un elevato potenziale per monitorare e ricostruire vari fenomeni. Combinando gli studi dendrocronologici con i dati cartografici disponibili (ad esempio DTM, ortofotografie o immagini satellitari) è possibile ottenere ulteriori informazioni tramite elaborazioni GIS.

Gli studi presentati in questo lavoro, mostrano l'applicazione di questo approccio integrato per lo studio di diversi fenomeni: valanghe, colate di detrito, cambiamenti del corso del fiume e cambiamenti di copertura forestale. I dati sono stati trattati principalmente attraverso FOSS4G, in particolare GRASS (Neteler et al. 2012) e QGIS (Quantum GIS Development Team

2017) ed è stato possibile creare mappe multitemporali che mostrano gli effetti dei fenomeni sulla copertura forestale e produrre mappe di rischi morfologici e potenziali. In particolare, i casi di valanghe, colate di detriti e riforestazione naturale si trovano in Trentino (Italia) e il caso di studio sul cambiamento del corso d'acqua si trova in Albania. Ci concentriamo in particolare sul valore aggiunto della geomatica in questo approccio integrato.

2. MATERIALI E METODI

Diverse tecniche dendrocronologiche sono state utilizzate nei casi di studio che presentiamo (Cherubini et al., 1996; Bezzi et al. 2004; Laitempergher et al., 2004; Bezzi 2006; Ciolli et al., 2012). Il campionamento è stato effettuato in tutti i casi di studio prelevando sezioni trasversali del tronco (tabella 1) e carote di legno estratte con una trivella di Pressler. La trivella dendrocronologica è uno strumento utilizzato per estrarre sottili carote da un albero vivente provocando una lesione minima nell'albero. Le carote e le sezioni devono essere preparate levigandole finemente e quindi analizzate con un microscopio binoculare dedicato e i dati dendroecologici risultanti vengono elaborati con software specifico come TSAP (2017). Le anomalie che abbiamo cercato negli anelli erano cicatrici, sequenze di anelli di dimensioni straordinariamente grandi o piccole, legno di reazione, canali resiniferi traumatici e o la data di morte dell'albero. (figura 1).

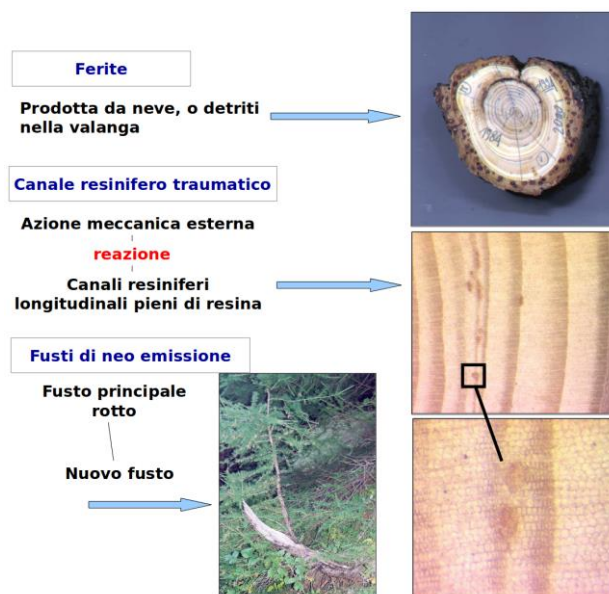


Figura 1. Esempio di alcuni indicatori usati in dendrocronologia.

Combinando le anomalie degli anelli con un'osservazione accurata della forma del fusto, la presenza di fusti di neoformazione ed altre caratteristiche macroscopiche della vegetazione, è possibile ricostruire gli eventi (Laitempergher et al 2004, Santilli et al 2005, Procter et al ., 2011, Corona et al., 2012; Pop et al., 2016; Jakob et al., 2013). La posizione degli alberi campionati è stata georeferenziata utilizzando un GPS per poter elaborare i dati con i GIS. Le informazioni dendrocronologiche sono state spazializzate come attributi del file vettoriale della localizzazione delle piante campionate. In questo modo le anomalie di accrescimento e tutti i parametri misurati possono essere tematizzati in singole mappe ed utilizzati quantitativamente in un GIS.

Il metodo dendrocronologico viene applicato confrontando le piante che portano segni particolari con una serie di riferimento che viene costruita usando campioni della stessa specie raccolti in una parte indisturbata della foresta con condizioni ecologiche e climatiche simili (Schweingruber et al., 1990). La presenza di un segno in un determinato anno in una pianta nel percorso di una valanga o di colata di detrito è confrontata con la serie di dati indisturbati per evitare che un indicatore ecologico leggibile nella serie degli anelli (ad esempio, un anno di siccità) possa essere erroneamente considerato un segno traumatico. In generale, una combinazione di due o più segni è preferita a un singolo segnale e consente un'interpretazione più affidabile (vedere le figure 1 e 2). Il campionamento può variare leggermente a seconda del tipo di studio. Ad esempio, nel caso di valanghe, vengono raccolte due carote per pianta, lato percorso o collina (in salita) e valle (in discesa) mentre per la variazione del corso dei fiumi è generalmente sufficiente un solo campione. Per ulteriori dettagli sui metodi dendrocronologici, si rimanda a Schweingruber (1988) e Schweingruber et al. (1990). GRASS GIS e QGIS sono stati utilizzati per rappresentare la posizione delle piante su diversi strati informativi multi-temporali tra cui le ortofoto. Alcune delle ortofoto sono state realizzate a partire da foto aeree storiche usando gli algoritmi di GRASS (Bezzi, 2004, Tattoni et al. 2011). Nel caso di valanghe o colate di detriti, ciò ha permesso di individuare dei percorsi presumibili dei diversi eventi. Nel caso di valanghe (Bezzi et al., 2004) e delle colate di detriti (Laitempergher et al., 2004), sono state create mappe di punti di inizio e di arresto secondo diversi algoritmi (Takahashi et al. 1981, Berger 1995, Scotton et al. 2011). La ricostruzione temporale degli eventi è stata confrontata con i record storici disponibili per verificare l'affidabilità del metodo (Schweingruber 1988).

Nei casi in cui i campioni dendrocronologici fornivano risultati sufficientemente affidabili è stato possibile integrare questi ultimi con le funzioni tridimensionali dei GIS per calcolare il volume degli eventi di frana o valanga. Per evidenziare l'evoluzione del paesaggio forestale nel tempo, è stato eseguito il campionamento in siti selezionati individuati attraverso mappature multi-temporali (Cherubini et al. 1996, Schöne e Schweingruber 2001). Per la realizzazione delle mappe multitemporali ci è avvalsi di diversi algoritmi di classificazione automatica a partire da materiale molto eterogeneo che includeva mappe storiche e materiale telerilevato.

Le informazioni cartografiche utilizzate nello studio sono state reperite da banche dati ufficiali degli enti (Regioni, Provincie) preposti alla gestione del territorio oppure elaborati ex-novo da fotografie aeree o immagini satellitari. Attraverso GRASS e QGIS si sono create sia mappe multi-temporali che mostrano gli effetti dei fenomeni sulla copertura forestale sia mappe di rischio morfologiche e potenziali.

L'utilizzo di GIS ha consentito l'integrazione di mappe DTM, elevazione e pendenza con la posizione delle piante che presentano segni di eventi passati, consentendo di migliorare la modellazione, come verrà descritto nel caso di valanghe e colate di detriti.

3. CASI DI STUDIO

3.1 Val di Pejo - Valanghe

La Val di Pejo si trova nel nord-ovest del Trentino, una provincia alpina italiana che mostra frequenti e importanti fenomeni di valanghe, come quelli di Tof Larch e Val dei Spini. La Val dei Spini è prevalentemente ricoperta da larici (*Larix*

decidua Miller) e abeti rossi (*Picea abies* L.), caratterizzata da pendenze ripide ad un'altitudine compresa tra 1300 e 2400 metri. Il percorso di valanga che si origina in Val dei Spini minaccia il villaggio di Cogolo. Nel 1901, un enorme valanga passò vicino al centro attuale del paese e distrusse alcuni edifici. L'evento fu poi "dimenticato" e nuove case vennero costruite dentro al vecchio e ora invisibile percorso della valanga del 1901. Una mappa dettagliata di CLPV "Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe" è disponibile per tutto il Trentino e quindi anche per l'area della Val di Pejo. Un DTM a 5 m di risoluzione è stato creato elaborando le curve di livello dal dataset ufficiale della provincia di Trento con GRASS. Con questo DTM è stato definito un rischio morfologico in quelle aree in cui il pendio è compreso tra 28 ° e 55 °, che hanno una superficie minima di circa 625 m² ed una variazione di pendenza a monte superiore a 10° (Berger 1995; Berger and Chauvin 1996; Ciolli et al. 1998; Comunello 2000). Dopo aver selezionato il percorso di valanga, sono state identificate le piante più rappresentative che mostravano segni di valanghe o si sospettava ne portassero ed è stata effettuata una campagna dendrocronologica per ricostruire le valanghe passate. Nel percorso di valanga sono stati campionati 61 larici e 11 ontani (*Alnus viridis Chaix DC*) mentre 25 larici di controllo sono stati campionati nella foresta indisturbata. Per tutte le piante la posizione è stata registrata con un GPS (Z12 e Topcon).

3.2 Rio Santa Giuliana – Colate di detrito

Il Rio Santa Giuliana si trova in Valsugana (Levico, TN) ed è soggetto a fenomeni di colate di detrito. L'area di studio si trova ad un'altitudine compresa tra 500 e 1200 metri. Le specie più diffuse presenti nell'area sono pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), orniello (*Fraxinus ornus* L.), roverella (*Quercus pubescens* Willd) e carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.). In particolare, il pino silvestre è presente in molte altre colate di detriti delle Alpi a diverse quote ed è una pianta che permette di ricavare una notevole quantità di informazioni poiché è molto resistente alle colate e gli anelli sono facilmente leggibili. Sono state esaminate una serie di 91 piante per un totale di 233 campioni. La posizione delle piante è stata registrata con un GPS (Z12 e Topcon). Per ricostruire gli eventi passati, abbiamo selezionato alcuni pini che si trovavano in posizioni significative e coperte di detriti. Con l'aiuto di uno scavatore, abbiamo raggiunto le radici delle piante che in alcuni casi abbiamo trovato a 1,9 metri sotto la superficie. Le piante sono state liberate dal materiale, sezionate, portate in laboratorio e analizzate. Grazie ai segnali che si trovano a diverse altezze lungo il tronco, è stato possibile identificare diverse profondità di copertura dei detriti e di conseguenza usare i dati per datare e modellare con i GIS i volumi mobilitati.

3.3 Paneveggio – Cambiamento del paesaggio forestale

Questo studio è stato eseguito nel Parco Naturale di Paneveggio Pale di S. Martino. I gestori del Parco devono monitorare lo stato degli habitat per scopi di conservazione e gestione. Lo studio ha cercato di comprendere come la copertura forestale si sia evoluta negli ultimi 150 anni per creare un modello basato sulle catene di Markov per produrre scenari futuri a scala di dettaglio che possono contribuire alla pianificazione (Tattoni et al., 2011; Ciolli et al., 2012; Tattoni et al. 2017). Va sottolineato che il tasso di copertura forestale può contribuire a calcolare il tasso di erosione del suolo e l'influenza della vegetazione sulla stabilità del terreno. La classificazione semi automatica di una serie multi-temporale di ortofoto e mappe

storiche ha permesso di produrre mappe multi temporali della copertura forestale passata dal 1859 al 2010. In particolare dalle ortofoto è stato possibile produrre mappe della copertura forestale dal 1954 al 2010 con una risoluzione di 3-5 metri. Poiché non erano disponibili dati di verità a terra per confrontare i risultati dell'elaborazione GIS che rappresentano la situazione forestale passata, sono state utilizzate semplici tecniche dendrocronologiche per verificare l'affidabilità delle mappe e l'andamento e le tendenze spaziali della riforestazione naturale (Cherubini et al., 1996; Ciolli et al., Schöne e Schweingruber 2001). Le simulazioni con catene di Markov non sono spazialmente esplicite e cambiano un certo numero di pixel in uno stato diverso in modo stocastico, invece le dinamiche forestali sono un processo spaziale esplicito. La probabilità che una particolare zona cambi la propria classe di copertura del suolo è influenzata dal modello spaziale della copertura esistente. Per rendere spazialmente esplicita una simulazione di Markov, è necessario sviluppare mappe di idoneità (suitability map) per ogni classe di uso del suolo per guidare la transizione dei pixel in modo più realistico (Tattoni et al., 2011). È possibile assegnare una probabilità zero a quelle aree che sono escluse dalla modifica durante le previsioni, ad esempio gli edifici o le strade. I vincoli ecologici, l'analisi della vegetazione e i risultati dell'analisi del paesaggio a lungo termine sono stati utilizzati per costruire *suitability map* per le simulazioni (Tattoni et al., 2011).

3.4 Erzen – Variazione del corso di fiume

Individuare e monitorare il cambiamento della morfologia fluviale è una priorità comunitaria e può fornire informazioni preziose per la pianificazione spaziale al fine di ridurre o limitare gli effetti negativi delle inondazioni sulle attività umane. Inoltre si possono trarre informazioni sul fiume e sulla salute del bacino fluviale (direttiva 2007/60/UE). Il fiume Erzen è lungo 109 km e inizia nelle montagne ad est di Tirana, in Albania, vicino alla città di Shengjergj, scorre a sud della capitale e ha la sua foce nella baia di Lalzit, a nord di Capo S. Pietro. La prima parte del fiume scorre in una valle disabitata ed è caratterizzata da un percorso intrecciato con un ampio letto. La seconda parte del fiume è un canyon molto corto dove il corso si restringe in un letto roccioso. La terza parte dell'Erzen è intrecciata fino alla cittadina di Ibe, dove diventa monocursale. Dopo la confluenza con il fiume Zall, l'Erzen entra nella pianura alluvionale e raggiunge la foce. Ci sono pochi interventi antropici volti a stabilizzare gli argini o regimentare il flusso. Tuttavia, molti centri abitati sono stati costruiti a una distanza tale da poter essere facilmente colpiti da inondazioni o cedimenti degli argini (Cukalla 2009; Zolezzi et al., 2016). Le attività più sviluppate nel bacino del fiume Erzen sono l'agricoltura e la pesca, quindi la popolazione è legata fortemente al fiume e al suo stato di conservazione.

Lo studio è stato condotto per capire sia come il fiume abbia cambiato il suo corso che i diversi modelli di ricolonizzazione della vegetazione. Il letto fluviale ha cambiato percorso sia in forma che in larghezza negli anni, ma una quantità molto limitata di informazioni è ricavabile nella poca cartografia georeferenziata disponibile. Pertanto è stata effettuata una classificazione automatica dell'uso del suolo a partire dalle mappe e immagini disponibili con gli strumenti di classificazione di QGIS (Congedo 2017) e GRASS. Quando possibile, i dati satellitari sono stati processati con la trasformazione di Brovey. Il metodo prevede il campionamento di alberi nei pressi delle rive del fiume e combinando la posizione spaziale ed i dati relativi all'età delle piante, la

dendrocronologia ha consentito di stimare la modifica della larghezza e dell'andamento del letto fluviale dagli anni '60 ad oggi.

Sono stati studiati tre siti: dal villaggio di Rushkull fino alla foce; vicino al villaggio di Kathund i Ri; vicino al ponte che collega le municipalità di Hardhiste e Pjeze. In questo ultimo sito, il modo in cui la foresta è cresciuta suggerisce che in passato il fiume fosse molto più ampio e coprisse tutta la zona tra i due villaggi. Oltre ai campioni dendrocronologici, sono state prese delle sezioni trasversali del fiume utilizzando un GPS Garmin, distanziometri laser Bosch e clinometri Suunto. La dendrocronologia è stata usata principalmente per datare l'età delle piante piuttosto che per evidenziare segni traumatici (Díez-Herrero et al., 2013).

Il campionamento è stato condotto su alberi che rappresentano la condizione più frequente (albero medio) del sito indagato al fine di stimare il cambiamento del fiume nel tempo. Le piante campionate si trovavano nei pressi dell'attuale corso del fiume, in aree che dall'analisi delle immagini satellitari, foto aeree e mappe erano in passato parte del corso del fiume.

Il rilievo è stato effettuato per lo più utilizzando carote prelevate con la trivella di Pressler ma è stato integrato dal campionamento opportunistico di sezioni trasversali del tronco di alberi abbattuti da recenti tempeste.

4. RISULTATI

4.1 Valanghe

La combinazione di dati dendrocronologici e mappe di rischio morfologico ha consentito una completa ricostruzione degli eventi degli ultimi trent'anni in Val dei Spini, compresi i punti di inizio e di arresto per alcuni anni, come si vede nella figura 2. Utilizzando la posizione delle piante con cicatrici significative o altri segnali evidenti e la modellazione GIS, in alcuni casi è stato anche possibile calcolare il volume della neve di eventi singoli (tabella 1).

Anno	Volume della neve (m ³)
1979	40,000
1986	30,000

Tabella 1. Ricostruzione del volume di valanga (metri cubi) nel 1979 e 1986 in Val dei Spini, Val di Pejo (Trentino) ottenuta con l'integrazione di tecniche dendrocronologiche e geomatiche.

In particolare GRASS GIS è stato utilizzato combinando il DTM di risoluzione 5 m con l'altezza dei segni nei fusti delle piante. Anche il volume degli eventi è stato calcolato utilizzando GRASS e confrontato con la serie storica.

Il campionamento dendrocronologico e il GIS hanno permesso anche di individuare un percorso di valanga non registrato nella mappa CLPV e una valutazione dell'influenza protettiva della diversa copertura della vegetazione (Bezzi 2006).

Questo aspetto è stato studiato creando mappe di copertura della vegetazione forestale e sovrapponendo queste informazioni con mappe di rischio morfologiche, CLPV e risultati dendrocronologici. La tabella 1 e la figura 2 sono esempi della ricostruzione del volume e del percorso valanghe in Val dei Spini, Val di Pejo.

4.2 Colate di detrito

L'analisi dei dati georeferenziati con GRASS GIS in due e tre dimensioni ha consentito la rappresentazione dell'estensione

spaziale e il calcolo della quantità di volume di alcuni eventi di colate di detriti nel Rio Santa Giuliana (figura 3). Si è quindi stati in grado di datare le varie terrazze originate dalle colate di detriti. È stato creato un DTM a risoluzione 5 m, elaborando le curve di livello dal dataset ufficiale della provincia di Trento. L'associazione di ferite, legno di compressione e brusche variazioni di accrescimento è stata considerata il miglior indicatore per ricostruire gli eventi di colate di detrito passate. Il confronto con le fotografie aeree conferma i segnali rilevati nella vegetazione. In particolare, per l'anno 1999, è stato calcolato il volume totale dell'evento. Le piante presentavano anomalie di crescita particolari, come radici epitropiche e crescita irregolare dei tronchi coperti da più di 80 cm di detriti.

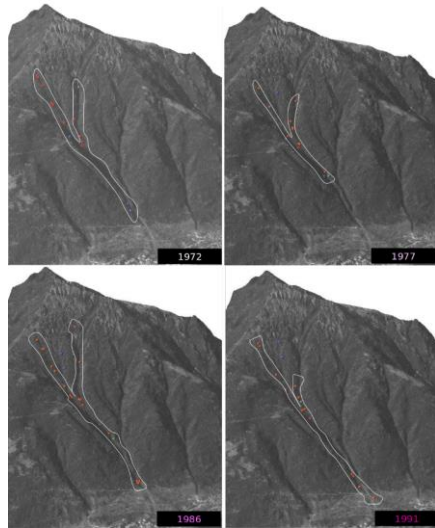


Figura 2. Esempio di ricostruzione spaziale dei percorsi di valanga in Val dei Spini (Trentino) ricavati integrando GIS e dendrocronologia.

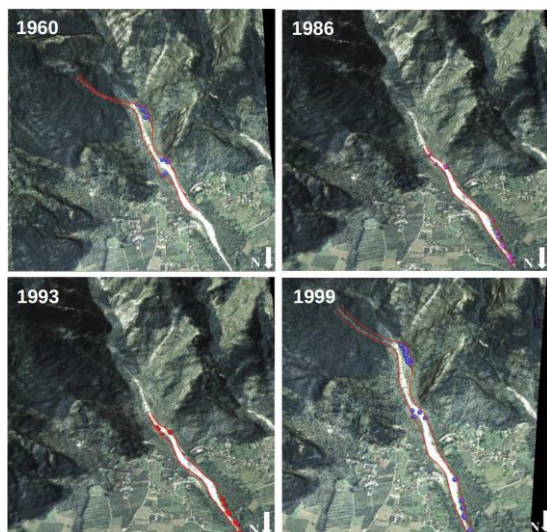


Figura 3. Esempio di ricostruzione spaziale di colate di detrito a S. Giuliana (Trentino) ricavati integrando GIS e dendrocronologia.

In particolare, le radici epitropiche nascono dalle radici esistenti coperte da un livello consistente (più di 80 cm) di detriti e crescono nella direzione opposta di ciò che si prevede per una radice, cioè verso l'alto. Non esiste invece una chiara corrispondenza tra l'anello e la crescita dell'altezza, quindi la semplice interpretazione della distanza tra gli internodi non

fornisce informazioni utili per comprendere i fenomeni di flusso dei detriti. Il DTM di risoluzione 5 m è stato rielaborato con GRASS usando l'altezza dei detriti scavati e i segni corrispondenti nei tronchi delle piante. Questo ha permesso il calcolo del volume degli eventi (tabella 2) e il confronto tra la serie storica e i segnali registrati negli alberi.

Periodo	Detrito nel letto del fiume (m ³)	Svuotamento artificiale (m ³)	Minimo volume della colata di detrito (m ³)
1975-2002	15,930	2,300	18,230
1985-2002	13,166	2,300	15,466
1999-2002	4,900	2,300+6,000	13,200

Tabella 2. Ricostruzione del volume (metri cubi) delle colate di detrito nel Rio Santa Giuliana (Trentino) ottenuta con l'integrazione di tecniche dendrocronologiche e geomatiche.

4.3 Cambiamento del paesaggio forestale

Il campionamento dendrocronologico ha confermato sia l'affidabilità della mappa della riforestazione naturale sia il tasso di crescita e il pattern spaziale individuati. Lo studio della vegetazione ha permesso di evidenziare che la riforestazione avverrà più probabilmente vicino ai bordi della foresta esistente piuttosto che in mezzo ad un'area aperta. Secondo i risultati dell'analisi del paesaggio la foresta crescerà dal confine della foresta precedente ad una velocità di circa 0,8 m/anno (Tattoni et al., 2011). Recentemente, queste osservazioni sono state confermate anche da un altro studio svolto in Trentino da Gallerani e Pradella (2016). Usando questi parametri, è stato possibile costruire *suitability map* affidabili; quindi, la probabilità di passaggio alla classe forestale è stata calcolata in base alla prossimità delle foreste esistenti, con la probabilità che diminuisce all'aumentare della distanza. A partire da queste mappe, utilizzando le catene di Markov abbiamo realizzato scenari futuri con risoluzione di 5 m che possono essere utilizzate per rilevare le aree prative protette più inclini ad essere naturalmente reinvasate dalla foresta (Tattoni et al. 2011).

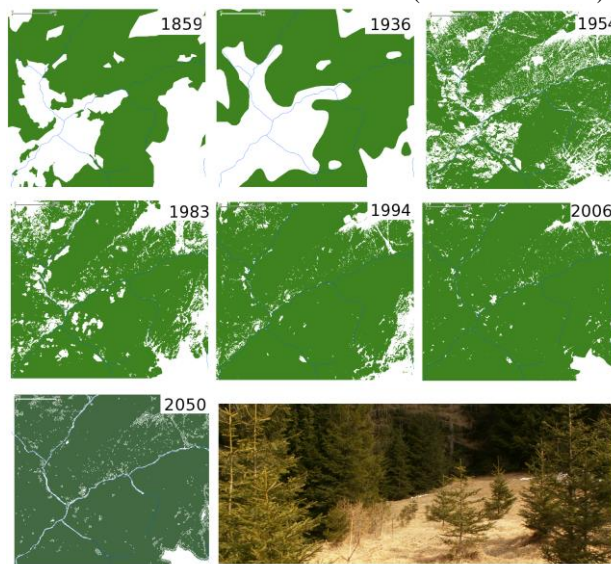


Figura 4. Ricostruzione della copertura forestale del passato e scenari futuri per il 2050 realizzati utilizzando i risultati dei rilievi di campo nel Parco di Paneveggio Pale di San Martino (da Ciolli et al. 2012 modificato).

Le mappe (figura 4) di cambiamento dell'uso del suolo possono essere utilizzate anche per valutare le aree potenzialmente soggette all'erosione del suolo ed evidenziare dove può essere necessario l'intervento o, viceversa, evidenziare dove la foresta dovrebbe aumentare l'efficacia protettiva in futuro (Ciolli et al 2012).

La raccolta di alcune carote provenienti dalle piante di Paneveggio ci ha consentito di confermare l'osservazione derivata dalla mappatura GIS della copertura forestale multi-temporale.

Tutte le elaborazioni delle mappe sono state eseguite usando GRASS e QGIS, ad eccezione della catena Markov, eseguita usando Idrisi Andes (Eastman 2006).

4.4 Variazione del corso di fiume

Integrando dendrocronologia e GIS è stato possibile riempire le lacune presenti nelle informazioni geografiche (figura 5), dato che l'unica fonte disponibile dopo il 2007 era un'immagine Landsat con una risoluzione troppo grossolana per rilevare i movimenti di un letto fluviale largo meno di 30 metri. È importante osservare, infatti, che l'ampiezza attuale del fiume Erzen nei siti investigati raramente supera i 20 m.

L'evoluzione dell'alveo è riportata nell'esempio mostrato nella figura 5. Infatti, nel 1968, nell'area intorno alla curva, c'era una piccola area alluvionale che più tardi fu abbandonata dall'acqua e occupata da campi nel periodo compreso tra lo scatto delle due immagini. Confrontando il corso del fiume dal 1985 al 2007, le immagini mostrano che il fiume Erzen si è trasformato da un grande fiume non confinato in un fiume con un piccolo letto confinato che si sta incidendo gradualmente nel corso degli anni.

Le ragioni di questi cambiamenti sono da imputare ad un eccessivo sfruttamento dei sedimenti fluviali e alla costruzione di una diga nell'alto corso del fiume, diga che limita lo scorrimento dei sedimenti a valle.

La dendrocronologia è stata utile inoltre per determinare i possibili rischi futuri delle inondazioni e delle case e campi a rischio; l'incisione del fiume sta aumentando negli ultimi anni, quindi se si verificasse un importante evento di precipitazione, è possibile che il fiume possa recuperare il suo corso originario e inondare la pianura alluviale ora occupata da campi coltivati e da edifici.

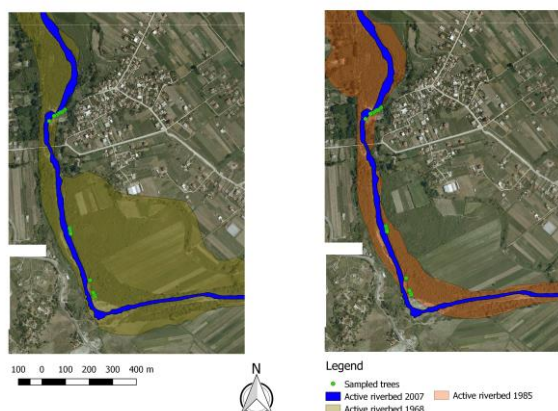


Figura 5. Particolare del sito fra Hardhiste and Pjeze (Albania), con il cambiamento del corso del fiume e la posizione degli alberi campionati (in verde). La georeferenziazione delle piante ed i dati relativi alla loro età hanno permesso di ricostruire la dinamica del fiume.

5. CONCLUSIONI

I nostri casi di studio confermano che la dendrocronologia è una tecnica molto affidabile ed efficace per ricostruire diversi fenomeni, come dimostrato anche da altri studi (Procter et al., 2011; Corona et al., 2012; Jakob et al., Voiculescu e Onaca 2014; Tumajer e Treml 2015, Pop et al., 2016).

Per quanto riguarda le valanghe, l'analisi dei campioni dendrocronologici ha permesso di individuare gli indicatori più affidabili dei passaggi passati della valanga; cioè fusti di neo emissione e legno di compressione in associazione con variazioni di accrescimento improvvisi. In questa ricerca sono stati presi in considerazione tutti gli indicatori dendrocronologici disponibili e i risultati ottenuti da ogni singolo indicatore sono stati integrati per filtrare il maggior numero di effetti climatici e altri possibili rumori. La stessa conclusione può essere tratta riguardo alle colate di detrito (Bezzi 2006).

A nostro parere, potrebbe essere molto interessante estendere questa ricerca ad altre regioni alpine; dovrebbe essere utilizzato lo stesso protocollo scientifico per la raccolta e l'analisi dei dati. Ciò sarebbe particolarmente utile per indagare le possibili conseguenze del cambiamento climatico ed evidenziare l'esistenza di una possibile connessione tra il cambiamento climatico e l'intensificazione di questi fenomeni pericolosi. Questa è senza dubbio una materia molto delicata e controversa, ma anche un argomento molto attuale e stimolante.

Combinando dendrocronologia e GIS, è possibile ricostruire l'entità degli eventi precedenti di flusso di valanghe e di detriti in ogni anno. Il confronto degli eventi registrati con dati dendrocronologici sembra confermare l'elevata affidabilità del metodo; i risultati devono essere interpretati in modo critico poiché questi fenomeni sono molto complessi.

La dendrocronologia è una tecnica che richiede un lungo, intensivo e accurato lavoro di campo al fine di ottenere informazioni che possono essere utilizzate per eseguire un'analisi scientifica affidabile. Tuttavia, in molti casi, la tecnica ha permesso di sviluppare dettagliate ricostruzioni di fenomeni e per quantificare la quantità di detriti o neve che si muovevano in un unico evento, raggiungendo un livello elevato di dettaglio (Laitempergher et al., 2004).

Le informazioni dendrocronologiche sono indispensabili per lo sviluppo di modelli dinamici di valanghe il cui sviluppo è particolarmente importante per controllare le valanghe che possano coinvolgere centri abitati o piste da sci. Infatti ci sono molte informazioni mancanti dei decenni passati che possono essere fornite utilizzando dendrocronologia e geomatica mentre per il futuro i percorsi di valanga potranno essere monitorati per registrare informazioni sul movimento della neve, sull'altezza della neve, sull'estensione reale delle valanghe all'anno e così via (Bezzi et al. 2004, Bezzi 2006).

Come si è visto l'integrazione di dendrocronologia e GIS è stata usata anche per individuare i cambiamenti passati in un fiume ed i risultati possono essere utilizzati per cercare di determinare i possibili rischi futuri di inondazione ed evidenziare edifici a rischio. In particolare si sottolinea la capacità di migliorare il dettaglio spaziale che utilizzando le sole informazioni da telerilevamento sarebbe stato invece insufficiente.

Le tecniche geomatiche facilitano significativamente anche la fase di pianificazione dei rilievi dendrocronologici e migliorano significativamente la quantità di informazioni che possono essere estratte dal campionamento degli alberi e la successiva elaborazione dei dati.

Inoltre, la possibilità di rappresentare e elaborare dati georeferenziati multi-temporali consente la rappresentazione

degli eventi passati ma fornisce anche la base per elaborare solidi modelli di dinamiche future.

Questo aspetto è particolarmente stimolante considerando le potenzialità che l'integrazione delle tecniche dendrocronologiche e GIS offrono sia alla modellistica che alla produzione di scenari futuri in tutti quanti i casi presentati. Il software FOSS4G, in particolare GRASS e QGIS, è stato in grado di fornire la maggior parte degli algoritmi e degli strumenti necessari per eseguire studi dendrogeomorfologici sia per la modellazione che per la rappresentazione. Nella nostra esperienza, il software Idrisi rappresenta altresì la procedura più collaudata per la catena di Markov e fornisce lo strumento più trasparente per interpretare i risultati statistici di questa specifica analisi (Ciolli et al., 2012).

BIBLIOGRAFIA

Amos J., 2017. Italy avalanche: A cruel coincidence. Science correspondent 19/01/2017 BBC News-Science & Environment <http://www.bbc.com/news/science-environment-38679129> (30 Maggio 2017)

Berger F., 1995. Appréciation des potentialités d'avalanche sous couvert forestier, CEMAGREF-Grenoble.

Berger F., Chauvin C., 1996. Cartographie des fonctions de protection de la forêt de montagne: appréciation des potentialités d'avalanches sous couvert forestier. *Revue de géographie de Lyon*, 71 (2), pp. 137-145

Bezzi M., Cantiani M.G., Ciolli M., Comunello G., Cherubini P., 2003 Leggere gli anelli degli alberi per ricostruire la frequenza e l'estensione delle valanghe nel passato. in De Angelis P., Macuz A., Bucci G., Scarascia Mugnozza G., eds. Viterbo: Società Italiana di Selvicoltura ed Ecologia Forestale, 2003. Vol. 3, pp. 147-152. , *Atti del convegno: Alberi e foreste per il nuovo millennio*, Viterbo, 15-18 Ottobre 2001

Bezzi M., Ciolli M., Comunello G., Cherubini P., Cantiani M.G., 2004. Integration of dendrochronology and GIS techniques to study avalanche phenomena. *Geomatics workbooks*, v. 3, <http://geomatica.com.polimi.it/workbooks/n3/articoli/mcmbmgcpcgc.pdf>

Bezzi M. 2006. Integrated Analysis of Natural Hazards in Mountain areas, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale. 142 pp

Butler D.R., Malanson G.P., 1985. A reconstruction of snow-avalanche characteristics in Montana, U.S.A., using vegetative indicators. *J Glaciol* 31, pp. 185-187.

Cherubini P., Piussi P., Schweingruber F.H., 1996. Spatiotemporal growth dynamics and disturbances in a subalpine spruce forest in the Alps: a dendroecological reconstruction. *Canadian Journal of Forest Research* 26, pp. 991-1001.

Ciolli M., Tabarelli S., Zatelli P., 1998. 3D spatial data integration for avalanche risk management. International symposium on GIS - Between Visions and Applications September 7-10 Stuttgart, Germany, 1998 *International archives of photogrammetry and remote sensing* vol. XXXI, part 4:121-127

Ciolli M., Tattoni C., Ferretti F., 2012. Understanding forest changes to support planning: A fine-scale Markov chain approach. in F Jordán, Se Jørgensen (edited by), *Models of the ecological hierarchy from molecules to the ecosphere*, Great Britain: Elsevier, 2012, pp. 341-359. (Developments in Environmental Modelling; 25)

Congedo L., 2017. SCP Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) <https://fromgistors.blogspot.com/p/semi-automatic-classification-plugin.html?spref=sacp> (31 Maggio 2017)

Corona C., Lopez Saez J., Stoffel M., Bonnefoy M., Richard D., Astrade L., Berger F., 2012., How much of the real avalanche activity can be captured with tree rings? An evaluation of classic dendrogeomorphic approaches and comparison with historical archives. *Cold Reg Sci Technol* 74-75, pp. 31-42.

Cukalla M., 2009. Study on small scale mining in Albania: improving transparency, economics and financial issues, and health and safety impacts for Erzen river, Technical report, World Bank.

Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks

Díez-Herrero A., Ballesteros J.A., Ruiz-Villanueva V., Bodoque J.M., 2013. A review of dendrogeomorphological research applied to flood risk analysis in Spain. *Geomorphology* 196, pp. 211-220.

Dorren L.K.A., Seijmonsbergen A.C., 2003. Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. *Geomorphology* 56, pp. 9-64

Dorren L.K.A., Berger F., Putters U.S., 2006. Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Nat Haz Earth Syst Sci* 6:145-153.

Dorren L.K.A., Berger F., Jonsson M., Krautblatter M., Mölk M., Stoffel M., Wehrli A., 2007. State of the art in rockfall – forest interactions. *Schweiz Z Forstwes* 158 (6), pp. 128–141

Gallerani G., Pradella C., 2016. Indagine dendrocronologica sui boschi in neo-formazione. Report per il corso di Ecologia Applicata, Università di Trento 15 pp.

Horton P., Jaboyedoff M., Rudaz B., Zimmermann M., 2013 Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat Haz Earth Syst Sci* 13, pp. 869-885

Eastman J.R., 2006. Idrisi Andes (Worcester, MA: Clark University)

Jakob M., Holm K., Weatherly H., Liu S., Ripley N., 2013. Debris flood risk assessment for Mosquito Creek, British Columbia, Canada. *Nat Hazards* 65 (3) pp. 1653-1681.

Laitempergher G., Cantiani M.G., Ciolli M., Bezzi M., Canals J., 2004. Tree rings as tools to reconstruct past debris flow. presented at 10° Congress INTERPRAEVENT, Riva del Garda, Italy, 25-27 May 2004.

Moos C., Dorren L.K.A., Stoffel M. 2017. Quantifying the effect of forests on frequency and intensity of rockfalls. *Nat Haz Earth Syst Sci* 17 (2) pp. 291-304.

- Neteler M., Bowman H., Landa M., Metz M., 2012. GRASS GIS: a multi-purpose open source GIS. *Environ Model Softw* 31, pp.124-130.
- Pop O.T., Gavrilă I-G., Roșian G., Meseșan F., Decaulne A., Holobacă I.H., Anghel T., 2016. A century-long snow avalanche chronology reconstructed from tree-rings in Parâng Mountains (Southern Carpathians, Romania) *Quatern Int* 415, pp. 230-240.
- Procter E., Bollschweiler M., Stoffel M., Neumann M., 2011. A regional reconstruction of debris-flow activity in the Northern Calcareous Alps, Austria. *Geomorphology* 132(1-2), pp. 41-50.
- Quantum GIS Development Team, 2017. Quantum GIS Geographic Information System. <http://www.qgis.org> (31 Maggio 2017)
- Rammer W., Brauner M., Dorren L.K.A., Berger F., Lexer M.J., 2010. Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10, pp. 699-711.
- Rayback S.A., 1998. A dendrogeomorphological analysis of snow avalanches in the Colorado Front Range, USA. *Phys Geogr.* 6, pp. 502-515.
- Santilli M., Pelfini M., 2002. Dendrogeomorphology and dating of debris flows in the Valle del Gallo Central Alps, Italy. *Dendrochronologia* 20(3) pp. 269-284.
- Santilli M., Pelfini M., Citterio M., Turri S., 2005. Landscape history in the subalpine karst region of Moncodeno (Lombardy prealps, Northern Italy). *Dendrochronologia*, 23, pp. 19-27.
- Schöne B.R., Schweingruber F.H., 2001. Dendrochronological studies of natural reforestation of the Alps exemplified on an Inner-alpine dry Valley (Ramosch, Lower Engadine, Switzerland) *Botanica Helvetica*, 111(2), pp. 151-168.
- Schweingruber F.H., 1988. *Tree rings, Basics and Applications of Dendrochronology*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Holland.
- Schweingruber F.H., Eckstein D., Serre-Bachet F., Bräker O.U., 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8, pp. 9-38.
- Scotton P., Genevois R., Moro F., Zorzi L., Girardi G., Praticelli N., 2011. The debris-flows monitoring system of acquabona torrent (Cortina d'Ampezzo, Belluno, Italy) *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings*, pp. 595-603.
- Shroder J.F., 1980. Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4, pp. 161-188.
- Stoffel M., Bollschweiler M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research - An overview. *Nat Haz Earth Syst Sci*, 8(2), pp. 187-202.
- Tattoni C., Ciolli M., Ferretti F., 2011. The fate of priority areas for conservation in protected areas: a fine-scale Markov chain approach. *Environmental Management*, 47(2), pp. 263-278.
- Tattoni C., Ianni E., Geneletti D., Zatelli P., Ciolli M., 2017. Landscape changes, traditional ecological knowledge and future scenarios in the Alps: A holistic ecological approach. *Science of the Total Environment*, 579, pp. 27-36.
- Takahashi T., Ashida K., Swai K., 1981. Delineation of debris flow hazard areas. Erosion and sediment transport in Pacific rim steeplands. *International Association of Hydrological Scientist Publication* 132, pp. 589-603
- TSAP by RINNTech e.K. <http://www.rinntech.de/index-52147.html> (30 Maggio 2017)
- Tumajer J., Treml V., 2015. Reconstruction ability of dendrochronology in dating avalanche events in the Giant Mountains, Czech Republic. *Dendrochronologia*, 34, pp. 1-9.
- Voiculescu M., Onaca A., 2014. Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using dendrogeomorphological approach in Bucegi Mountains Romanian Carpathians. *Cold Reg Sci Technol*, 104-105, pp. 63-75.
- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L.K.A., Gerber W., Jaboyedoff M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection - a review. *Nat Haz Earth Syst Sci* 11, 2617-2651.
- Winchester V., Gärtner H., Bezzi M., 2007. Dendrogeomorphological applications, *Geomorphological Variations* pp. 183-203
- Zolezzi G., Besio G., Bezzi M., Chesini A., Costi M., Dalla Valle L., De Leo F., Dotto A., Ferronato N., Gallerani G., Gobbi S., Guirrieri D., Maier A., Pedon F., Spada D., Tosi T., Vella E., Beqiri E., Caka A., Cekrezi B., Fufaj F., Gjini B., Haxhi N., Kraja X., Omeri A., Shyti M., Zhidro M., Floqi T., Lami I., 2016. Erosione costiera e gestione fluviale in un paese emergente: baia di Lalzi, Albania. *Atti XXXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, pp. 1215-1218, Bologna, 15-16 Settembre. ISBN - 9788898010400
- Biagi L., Carcano L., De Agostino M., 2012. DTM cross validation and merging: problems and solutions for a case study within the HELI-DEM project. *Proceedings of International Conference ISPRS, Melbourne, 25 August-1 September 2012*
- Smith, J., 1987a. Close range photogrammetry for analyzing distressed trees. *Photogrammetria*, 42(1), pp. 47-56.