

Una nuova metodologia per la valutazione della suscettibilità valanghiva: come migliorare la Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (C.L.P.V.) utilizzando informazioni contenute nel Catasto Valanghe

A new methodology to evaluate land susceptibility to snow avalanches: how to improve the Location Map of Probable Snow Avalanches (L.M. P.S.A.) from the Snow Avalanches Inventory Data

GHINOI A. (*)

RIASSUNTO - Negli ultimi decenni, la necessità di disporre di nuove strutture e servizi funzionali allo sviluppo del turismo invernale ha determinato una coabitazione sempre più stretta tra l'uomo e le valanghe nei territori alpini. Questa è la ragione per cui le comunità locali stanno cercando metodologie appropriate per l'individuazione di aree particolarmente suscettibili al distacco di valanghe, elemento conoscitivo di grande importanza per la costruzione dei loro piani territoriali.

Il metodo tradizionalmente impiegato, e tuttora ampiamente utilizzato, per questo scopo è la Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (C.L.P.V.) in cui i possibili tracciati di valanga vengono delineati tramite interpretazione di fotografie aeree e il rilevamento di campagna, durante la stagione estiva, coadiuvato dalla presenza di un testimone oculare di eventi valanghivi passati. Sebbene sia uno strumento prezioso in zone ove non vi sia alcun archivio di eventi passati, il suo grado di soggettività, il suo difficile aggiornamento e i suoi costi di produzione hanno spinto la ricerca a sviluppare nuovi metodi, più oggettivi e, allo stesso tempo, più economici.

Il metodo qui proposto (denominato "STARTER") viene paragonato alla C.L.P.V. in un'area di studio comune. Il metodo è basato su algoritmi di analisi statistica multivariata, funziona su supporto GIS e il suo prodotto è una carta dove ad ogni porzione dell'area analizzata

viene assegnato un valore di suscettibilità valanghiva sulla base delle relazioni spaziali esistenti tra le aree di distacco delle valanghe del passato e combinazioni di fattori causa (indipendenti dalla variabile temporale).

Il confronto tra la carta di suscettibilità prodotta con STARTER e la C.L.P.V. per la stessa area di studio (l'Alta Val Badia, Dolomiti) ha dimostrato come STARTER riesca ad identificare le potenziali aree di distacco delle valanghe in maniera più precisa e raffinata rispetto alla C.L.P.V., riducendo al contempo i tempi di lavoro e i costi di produzione. I costi possono essere ulteriormente ridotti anche nelle successive fasi di aggiornamento, pubblicando ad esempio le carte di suscettibilità tramite tecnologia web-GIS. La maggior precisione nell'identificare le potenziali zone di distacco può costituire un vantaggio anche per eventuali analisi di dinamica valanghiva: ne viene riportato un esempio applicativo sperimentato nel comune di Sölden (Tirolo, Austria).

PAROLE CHIAVE: valanghe, suscettibilità, GIS, metodi statistici, STARTER.

ABSTRACT - Since the last four decades, the demand for new structures and facilities to increase winter tourism capacity has enormously speeded up, thus forcing a closer cohabitation between man and snow avalanches in

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Largo S. Eufemia, 19 - 41100 Modena

Alpine areas. This is the reason why local communities have started seeking appropriate methods to identify areas more susceptible than others to snow avalanche occurrence for their urban development plans.

The most popular method developed, and still widely used, is the Location Map of Probable Snow Avalanches (L.M.P.S.A.) (also called "Avalanche Paths Map") where avalanche tracks are traced after interpretation of aerial summer photographs, direct field survey during summer time and interviews of local snow-avalanche eye-witnesses. Although the method is precious in areas with no avalanche record, its high degree of subjectivity, its difficult updating and its costs of production have led to search for a better method, more objective and at the same time more economic.

The method proposed here (named "STARTER") is presented in comparison with the Avalanche Paths Map (APM). Based on multivariate statistical analysis of spatial data, taking advantage of GIS technology, its output is a map where each portion of the study area receives a value of susceptibility to avalanching, depending on the statistical relationship between release areas of past snow avalanches and combinations of time-independent causal factors of snow-avalanche occurrence.

The comparison of the STARTER's output with the APM of the same study area (Alta Val Badia, Italian Dolomites) has shown a finer identification capability of probable release areas and, at the same time, a sensible reduction of survey time and production costs. Costs can be further reduced to the minimum for constant updating of the susceptibility map which could be published taking advantage of web-GIS technology. The fine resolution of the susceptibility pattern could also be an advantage for planning avalanche-dynamic calculations at the scale of an Alpine municipality: an example is given for the prototype test in Tyrol (Austria) and for an ongoing operative application in the Dolomites.

KEYWORDS: snow-avalanches, susceptibility, GIS, statistical methods, STARTER.

1. - INTRODUZIONE: LA C.L.P.V.

La Carta della Localizzazione Probabile delle Valanghe venne ideata dall'Istituto Geografico Francese negli anni settanta per fornire uno strumento utile alla pianificazione territoriale in aree particolarmente soggette a fenomeni valanghivi. Un progetto recentemente finanziato dalla Comunità Europea (BURNET & MARTI, 1998) ha evidenziato come tale carta sia ancora uno strumento ampiamente utilizzato in Europa: Francia, Italia, Spagna e Islanda, sebbene con alcune differenze, utilizzano la carta nei progetti di pianificazione territoriale e di gestione del rischio. In Italia le C.L.P.V. sono state elaborate per quasi tutte le zone a rischio valanghe, principalmente nell'arco alpino, ma anche per alcune porzioni dell'Appennino.

Le fasi di elaborazione della C.L.P.V. sono due. Nella prima fase, l'interpretazione di fo-

tografie aeree permette di delineare in maniera approssimativa il contorno dei possibili tracciati di valanga. Il giudizio di tale interpretazione si basa su caratteristiche quali l'inclinazione del pendio, segni lasciati dalle valanghe nella vegetazione (alberi abbattuti, decorticazioni, presenza di fasce di alberi giovani all'interno di un bosco maturo), presenza di concavità (canaloni, contropendenze) capaci di raccogliere grandi quantitativi di neve ecc. La seconda fase è complementare alla prima: il rilevatore, aiutato dall'interpretazione delle fotografie aeree, cerca di definire con precisione i limiti tracciati, raccogliendo chiari segni di attività valanghiva e dati storici sugli eventuali eventi passati. Il lavoro di campagna si svolge durante la stagione estiva ed è sempre accompagnato dalla presenza di un testimone (locale) capace di ricostruire la frequenza dei fenomeni valanghivi passati e di localizzarli. Il prodotto finale è una carta alla scala 1:25.000 dove, con due diversi colori, vengono rappresentati i tracciati di valanga dedotti dall'interpretazione delle fotografie aeree e quelli riconosciuti dal rilevamento di campagna (più, qualora siano disponibili, i tracciati di valanga contenuti nell'eventuale Catasto Valanghe). Le aree a diversa colorazione possono sovrapporsi parzialmente o totalmente. Inoltre, vengono evidenziate anche zone che, pur non mostrando chiari segni di attività valanghiva, si ritiene posseggano caratteristiche morfologiche predisponenti l'attività valanghiva.

Solitamente, la C.L.P.V. non viene aggiornata frequentemente, a causa degli alti costi di produzione determinati principalmente dalla fase di rilevamento di campagna (compenso dei rilevatori, spese di viaggio, spese di equipaggiamento e strumentazione ecc.) e dalla stampa.

In territori dove non sia stata fatta memoria degli eventi valanghivi passati, la C.L.P.V. rappresenta l'unico strumento disponibile per poter operare scelte di carattere pianificatorio, sebbene contenga alcuni elementi di criticità che devono essere evidenziati. Il primo è rappresentato dall'alto livello di soggettività: nelle linee guida per l'elaborazione della carta (AUTORI VARI, 1993), i tracciati di valanga vengono identificati e, quindi, disegnati esclusivamente in base all'esperienza del rilevatore; anche l'apporto del testimone è ampiamente soggettivo. La tecnologia GIS ha certamente contribuito ad accrescere la precisione nell'identificare alcune caratteristiche: gli esperti possono individuare in modo più agevole potenziali aree valanghive classificando in modo automatico l'inclinazione del pendio, l'orientazione del pendio, la sua

morfologia ecc. Nonostante ciò, le classificazioni si basano su dati raccolti in letteratura, ma provenienti spesso da situazioni ambientali molto differenti e quindi non sono sempre applicabili ovunque e per ogni tipo di valanga. Inoltre, l'indagine di campagna viene effettuata durante la stagione estiva: ciò è utile per identificare i segni lasciati sulla vegetazione dalla passata attività valanghiva, altrimenti invisibili sotto il manto nevoso. Una seconda indagine di campagna dovrebbe essere effettuata nella stagione invernale per avere una seppur generale panoramica dello scenario valanghivo effettivo. In ultimo, la C.L.P.V. fotografa un'istantanea della situazione valanghiva che, invece, è destinata a mutare nel corso degli anni.

Al di là del rilevamento di campagna durante la stagione invernale, la C.L.P.V. può essere migliorata utilizzando tecniche d'analisi più oggettive, capaci di valutare la suscettibilità valanghiva anche dove l'esperienza del rilevatore e la memoria storica del testimone non sono in grado di fornire risposte. Per esempio in zone al di sopra del limite del bosco o remote, ma anche all'interno dei tracciati di valanga esistenti andrebbero valutate quali porzioni siano più suscettibili rispetto ad altre. Un altro miglioramento potrebbe essere l'aggiornamento continuo della carta con nuovi tracciati di valanga: in questo caso sarebbe opportuno, per ovvi motivi economici, che la C.L.P.V. fosse già in formato digitale e pubblicabile *on-line*. In fine, un ulteriore affinamento potrebbe derivare dall'inserimento del fattore meteorologico: si potrebbero costruire diverse C.L.P.V. che evidenzino quei tracciati percorsi da valanghe che si originano in seguito a determinate condizioni meteorologiche.

L'ultimo affinamento va forse oltre gli scopi di una C.L.P.V., avvicinandosi ad una carta della pericolosità valanghiva, ma è comunque un'opzione di sviluppo da considerare almeno in via sperimentale.

In questo articolo verranno descritti i miglioramenti che possono essere apportati alla C.L.P.V. usando tecniche di analisi di dati georeferenziati ben collaudate, senza ripercorrere le basi matematiche del calcolo poiché già pubblicate in molti lavori scientifici precedenti. Verranno mostrati i risultati dell'applicazione di STARTER in Alta Val Badia (Dolomiti) e paragonati a C.L.P.V. della stessa zona. In fine, verranno fatte alcune valutazioni sul confine esistente tra C.L.P.V. e Carta della Pericolosità Valanghiva da cui è possibile trarre alcune interessanti prospettive di ricerca.

2. - COME MIGLIORARE LA C.L.P.V.

L'utilizzo di tecnologia GIS nella pianificazione territoriale urbana è largamente consolidato. *Software* GIS è ampiamente disponibile (a volte anche a basso costo) per amministrazioni pubbliche e la cultura GIS sta velocemente invadendo il quotidiano con servizi quali navigatori GPS, portali web-GIS ecc., funzionanti anche su PDA e su telefoni cellulari. Parallelamente, tecniche per gestire e analizzare dati georeferenziati attraggono l'attenzione di un numero sempre crescente di professionisti pianificatori e di scienziati del mondo accademico. Le prime applicazioni di tali tecniche vennero sviluppate dal momento in cui divennero disponibili immagini telerilevate e si scelse il *pixel* quale miglior rappresentazione di dati continui (ma anche discreti) e miglior soluzione per operare sovrapposizioni di carte (BURROUGH, 1986). Le pericolosità naturali e l'esplorazione mineraria sono stati da subito i due settori di ricerca che hanno maggiormente incoraggiato l'utilizzo del GIS e di metodi di analisi di dati georeferenziati.

Con riferimento alle pericolosità naturali, le ricerche riguardanti l'analisi della suscettibilità da frana hanno certamente portato il contributo maggiore in questo senso, partendo ancora dalle prime definizioni e applicazioni di suscettibilità (BRABB *et alii*, 1972; BRABB, 1984; 1987; BRABB *et alii*, 1989; CARRARA *et alii*, 1977; 1978; VAN WESTEN, 1993). Altre applicazioni seguirono, grazie alle maggiori capacità di calcolo e velocità dei nuovi personal computer, privilegiando l'analisi di più variabili contemporaneamente (CARRARA, 1983, 1988; BERNKNOPF *et alii*, 1988; CHUNG & FABBRI, 1993; 1999; 2001; CHUNG & LECLERK, 1994; CHUNG *et alii*, 1995; CLERICI *et alii*, 2002; REMONDO *et alii*, 2003).

Per quanto riguarda l'esplorazione mineraria si possono citare i seguenti articoli: CHUNG & AGTERBERG, 1980; BONHAM-CARTER *et alii*, 1988, 1989; BONHAM-CARTER & AGTERBERG, 1990; CHUNG & KEATING, 2002.

Poiché l'accoppiata tra GIS e tecniche di analisi di dati georeferenziati ha fornito, fino ad oggi, risultati relativamente oggettivi (anche se non privi di imperfezioni dovute alla scelta dei dati e alla loro risoluzione spaziale), se ne dovrebbe sempre più incoraggiare l'utilizzo, anche per lo studio di altre pericolosità naturali tra cui le valanghe.

Si consideri il senso generale della definizione di suscettibilità (modificato da BRABB, 1984): "la possibilità che un certo fenomeno naturale

avvenga in futuro, in una certa zona, calcolata in base alla correlazione esistente tra alcuni dei principali fattori causa di quel fenomeno (come l'inclinazione del pendio) e la distribuzione spaziale di eventi passati". Com'è facile notare, tale definizione contiene il classico principio di LYELL dell'attualismo secondo il quale, da sempre, non vi sono state cause diverse da quelle che agiscono attualmente. I modelli di suscettibilità, pertanto, possono funzionare soltanto se si hanno a disposizione eventi passati di un certo fenomeno e i fattori che hanno favorito e che sempre favoriranno il verificarsi di tale fenomeno. La metodologia operativa alla base dei modelli di suscettibilità è quindi la seguente: il modello statistico è costruito in una porzione predefinita dell'area di studio, dove la distribuzione spaziale del fenomeno è ben conosciuta; il risultato viene quindi estrapolato all'intera area di studio, assumendo che i fattori che favoriscono il fenomeno siano i medesimi in tutta l'area di studio (TURNER & SCHUSTER, 1996).

Alcuni modelli prevedono anche una verifica quantitativa del risultato che permette di eseguire analisi di sensitività tra tutti i possibili risultati derivanti dalla scelta di combinazioni differenti di fattori causa: questo è senza dubbio fondamentale quando si ha a che fare con fattori causa il cui contributo nel favorire un certo fenomeno non è chiaro.

Per quanto riguarda la suscettibilità valanghiva, gli eventi del passato vengono solitamente registrati nel Catasto Valanghe che, in Italia, è strumento ampiamente utilizzato in gran parte dell'arco alpino e in alcune zone dell'Appennino.

Il Catasto, continuamente aggiornato ad ogni stagione, contiene i tracciati di valanga cartografati a breve distanza temporale dagli eventi. I tracciati segnalati sono generalmente quelli interessati da valanghe che hanno coinvolto strutture o infrastrutture. Di essi ne viene specificata l'estensione, le zone di distacco e di accumulo e tutta una serie di importanti caratteristiche morfologiche, nonché le condizioni meteorologiche che hanno preparato e scatenato l'evento valanghivo. Il Catasto non individua, invece, le zone potenzialmente suscettibili.

I fattori che maggiormente influiscono sulla suscettibilità valanghiva sono rappresentati in carte geomorfologiche e in carte della vegetazione, largamente disponibili presso le pubbliche istituzioni (spesso già in formato digitale) o facilmente derivabili da altre carte di base.

3. - STARTER: LA METODOLOGIA PROPOSTA

La prima applicazione di un modello statistico alla valutazione della suscettibilità valanghiva ha preso il nome di STARTER (dall'acronimo *Snow-avalanche Trigger-Area Location Finder*) (GHINOI *et alii*, 2002a; 2002b; 2003; GHINOI & CHUNG, 2002) ed ha utilizzato come area di studio il territorio di Sölden (Tirolo, Austria). Il modello statistico è stato sviluppato da CHUNG *et alii* (1997) per l'analisi di dati georeferenziati. Il modello è stato frequentemente applicato a studi di suscettibilità/pericolosità da frana e a studi finalizzati alla ricerca di depositi minerari, secondo le linee teoriche sviluppate da CHUNG & FABBRI (1993), successivamente ampliate e presentate in altre pubblicazioni (CHUNG & FABBRI, 1999; 2001; CHUNG & KEATING, 2002; CHUNG & LECLERC, 1994; CHUNG *et alii*, 1995; 2002a; 2002b). Il modello è tutt'ora in sviluppo.

STARTER è stato applicato, in una versione leggermente migliorata, anche in Alta Val Badia (Dolomiti) (GHINOI, 2004; GHINOI & CHUNG, 2005). I risultati di questa seconda applicazione sono stati richiesti dalla Provincia Autonoma di Bolzano per l'elaborazione della nuova Carta Geologica d'Italia (foglio sperimentale n. 28 "La Marmolada" sulla pericolosità geologica; coordinatore scientifico: Prof. Mario Panizza).

In entrambe le applicazioni, sono stati utilizzati fattori causa presenti in carte esistenti o derivati da carte di base. Poiché l'essenza di un'analisi di suscettibilità altro non è che la valutazione di come il terreno possa favorire o meno il verificarsi di un certo fenomeno, i fattori causa scelti sono quelli topografici, geomorfologici e vegetazionali (relativamente indipendenti rispetto alla variabile temporale).

Per le valanghe si possono individuare i seguenti fattori causa: 1) l'inclinazione del pendio, 2) l'orientazione del pendio, 3) la quota, 4) la rugosità del terreno, 5) la forma del terreno e 6) la distanza dalle creste montuose. Quelli menzionati non sono gli unici fattori che possono influenzare la suscettibilità valanghiva, ma sono certamente i più importanti (MAGGIONI & GRUBER, 2003; MAGGIONI *et alii*, 2002; McCLUNG & SCHAEERER, 1993; McCLUNG & TWEEDY, 1993; McCLUNG, 2001) e, allo stesso tempo, quelli più facilmente acquisibili, derivabili e rappresentabili in ambiente GIS. Per una descrizione più approfondita delle modalità di rappresentazione di tali fattori si rimanda il lettore alla pubblicazione di GHINOI & CHUNG (2005). La

stessa pubblicazione può essere utile per comprendere le basi teoriche alla base del modello e della sua verifica. In questo contesto si può riassumere quanto segue.

I valori di suscettibilità si ottengono calcolando, per ogni *pixel* dell'area di studio, la probabilità che il *pixel* ha di ricadere all'interno di un'area di distacco di valanga, data una certa combinazione di classi di fattori causa. L'assunzione è che ogni fattore causa sia indipendente dagli altri. Sebbene in natura niente possa considerarsi completamente indipendente, i fattori utilizzati in questo studio possono essere ragionevolmente considerati indipendenti gli uni dagli altri. Per ogni combinazione di fattori causa viene creata una carta di suscettibilità. La verifica avviene sovrapponendo la carta di suscettibilità ad aree di distacco che non sono state utilizzate nel calcolo: se almeno il 50% della loro superficie viene ad essere ricoperto da *pixel* con i più alti valori di suscettibilità, allora ciò viene utilizzato come prova di bontà della carta. La bontà della carta viene quindi quantificata e visualizzata utilizzando appropriati grafici come quello mostrato in figura 1. Ogni carta di suscettibilità avrà quindi il suo grafico di verifica. Il confronto tra tutti i grafici di verifica consentirà di condurre un'analisi di sensitività che eleggerà la migliore carta di suscettibilità fra tutte le possibili.

In questo articolo ci si soffermerà principalmente sulla presentazione dei risultati verificati e sul loro confronto con l'esistente C.L.P.V. dell'Alta Val Badia.

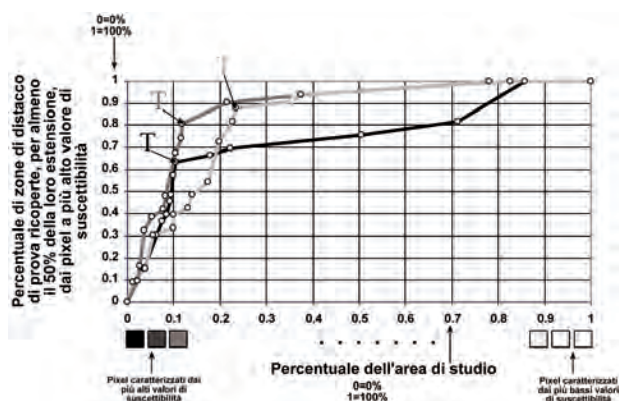


Fig. 1 - Esempio di grafico di verifica. Le tre curve rappresentano la verifica di tre combinazioni immaginarie di fattori causa. Sull'asse delle x, i pixel di tutta l'area di studio sono ordinati in ordine decrescente di suscettibilità da 0 a 1. La percentuale di zone di distacco di verifica localizzate dal(i) pattern di suscettibilità è rappresentata sull'asse delle y.
 - Example of validation plot. The three curves represent the validation of three combinations of fictitious causal factors. In the x axis the pixels of the whole study area are ordered from 0 to 1 according to decreasing susceptibility. The percentage of test-release zones localized by the susceptibility pattern(s) is reported on the y axis.

4. - RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DI STARTER NELL'ALTA VAL BADIA E CONFRONTO CON LA C.L.P.V.

La miglior carta di suscettibilità prodotta con STARTER in Alta Val Badia, in seguito a verifica e analisi di sensitività, è risultata essere quella data dalla combinazione dei seguenti fattori causa: 1) inclinazione del pendio, 2) orientazione del pendio, 3) quota, 4) forma del terreno (concavità/convessità), 5) distanza dalle creste montuose e 6) rugosità del terreno. Una parte della carta di suscettibilità si può vedere in figura 2 e, parallelamente, il suo grafico di verifica viene presentato in figura 3. Sette zone

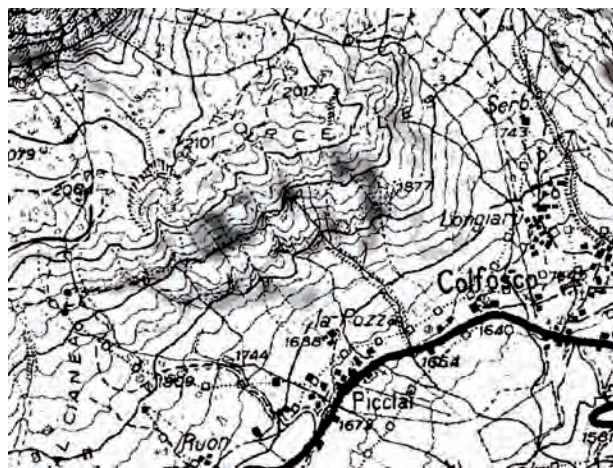


Fig. 2 - Porzione della carta di suscettibilità dell'Alta Val Badia prodotta da STARTER. I cluster a scala di grigi rappresentano le aree caratterizzate dai più alti valori di suscettibilità.

- Portion of the snow-avalanche susceptibility map of Alta Val Badia produced by STARTER. The greyish clusters represent the areas with the highest susceptibility values.

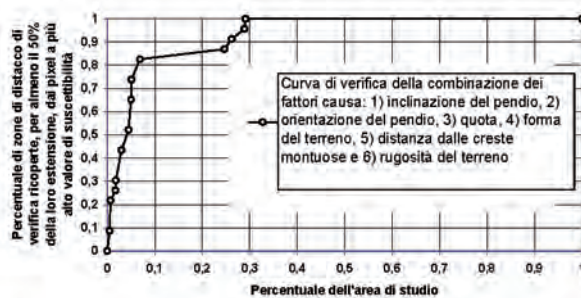


Fig. 3 - Curva di verifica della migliore carta di suscettibilità ottenuta da STARTER per l'Alta Val Badia. La combinazione di fattori causa che ha prodotto tale carta è la seguente: 1) inclinazione del pendio, 2) orientazione del pendio, 3) quota, 4) forma del terreno, 5) distanza dalle creste montuose; 6) rugosità del terreno.

- Validation graph of the best susceptibility map generated by STARTER in Alta Val Badia. The generating causal factors of this map are: 1) slope angle; 2) slope aspect; 3) elevation a.s.l.; 4) surface morphology; 5) distance from mountain crests; surface roughness.

di distacco sono state utilizzate per il calcolo di suscettibilità; sette zone di distacco sono state utilizzate per la verifica. Il grafico mostra come circa l'80% delle zone di distacco utilizzate per la verifica sia stato ricoperto (per almeno il 50% della loro estensione) dai *pixel* col più alto valore di suscettibilità. Ciò significa che l'intera carta di suscettibilità (di cui la figura 2 mostra una piccola porzione) è potenzialmente capace di dare il medesimo risultato anche per le valanghe che avverranno in futuro: in altre parole, è verosimile che le zone di distacco di valanghe future coincidano totalmente (o in parte) con i *cluster* formati da *pixel* in livelli di grigio che danno forma al *pattern* di suscettibilità.

Se si sovrappone la figura 2 con il Catasto Valanghe (fig. 4) della stessa porzione d'area di



Fig. 4 - Porzione del Catasto Valanghe dell'Alta Val Badia. In bianco, con contorno nero, sono stati evidenziati i tracciati di valanga cartografati.

- Portion of the Alta Val Badia Snow Avalanche Register. In white, outlined in black, are the snow avalanche paths.



Fig. 5 - Il *pattern* di suscettibilità di figura 2 sovrapposto ai tracciati di valanga del Catasto.

- The susceptibility pattern of figure 2 overposed on the avalanche paths of the Snow Avalanche Register.

studi), si può visualizzare un interessante confronto (fig. 5). I *cluster* in scala di grigio sembrano avere una buona relazione spaziale con le aree di distacco dei tracciati di valanga del Catasto. Esaminando la fig. 5, le zone di distacco dei due tracciati di valanga sulla sinistra sono completamente ricoperte da *pixel* grigi. Quelle del terzo e quarto tracciato da sinistra mostrano una copertura parziale, mentre quella del quinto è completamente libera da *pixel* grigi. Con la consapevolezza che il Catasto viene compilato in maniera abbastanza approssimativa, una sottile incongruenza come quella riscontrata intorno al quinto tracciato può essere trascurabile. Inoltre, esaminando sempre il quinto tracciato, sembra che la sua zona di distacco (così come disegnata sul Catasto) abbia una collocazione topografica apparentemente meno suscettibile a ospitare fenomeni valanghivi rispetto a quella della adiacente zona ricoperta da *pixel* grigi. La seconda zona si trova in una concavità, mentre la prima si trova su di un pendio convesso e relativamente più inclinato.

Un altro punto d'interesse è rappresentato dalla distribuzione dei *pixel* grigi al di fuori dei tracciati di valanga cartografati dal Catasto. Ciò dimostra come STARTER individui come altamente suscettibili anche zone apparentemente esenti da potenziale pericolosità (stando sempre a quanto riportato nel Catasto).

Tali zone potrebbero aver dato origine a valanghe d'intensità minore rispetto a quelle cartografate; oppure l'intensità potrebbe essere stata simile, ma il loro tracciato lontano da elementi vulnerabili. In entrambi i casi i tracciati non avrebbero rappresentato interesse ai fini catastali. L'elemento interessante, comunque, è che quei *cluster* grigi potrebbero avere un grado di suscettibilità effettivamente alto, pertanto dovrebbero essere sottoposti a controllo o, almeno, considerati in pianificazioni territoriali future (qualora, ad esempio, vi sia in progetto di costruire nuovi impianti sciistici, strade ecc.).

Se poi si confronta la carta di suscettibilità con la C.L.P.V. (fig. 6), il quadro risultante è quello mostrato in figura 7. I *cluster* grigi che ricadono al di fuori dei tracciati di valanga, appartengono invece ad aree stimate come potenzialmente suscettibili dal rilevatore della C.L.P.V. Ciò supporta il risultato ottenuto da STARTER e conduce ad un'altra considerazione. Quello che più colpisce è che i *cluster* grigi sono quasi totalmente compresi all'interno dei poligoni della C.L.P.V., senza però strettamente coincidere con essi. Ciò dimostra come

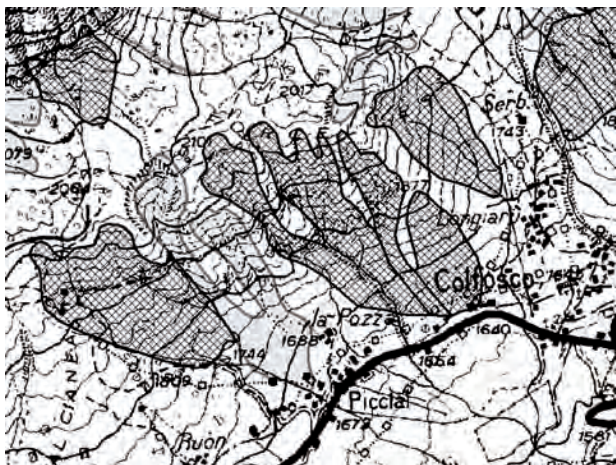


Fig. 6 - C.L.P.V. della stessa area di figure 2, 4 e 5. I tracciati di valanga cartografati durante il rilevamento sul terreno sono rappresentati da uno sfondo grigio-chiaro e da un bordo grigio-scuro; le aree considerate potenzialmente suscettibili dal rilevatore sono rappresentate con il reticolo grigio.

- *Avalanche Path Map (APM) of the same area of figures 2, 4 and 5. The avalanche paths mapped after field survey are light grey with a grey outline; cross hatching outlined in black marks the area considered as potentially susceptible after field survey.*

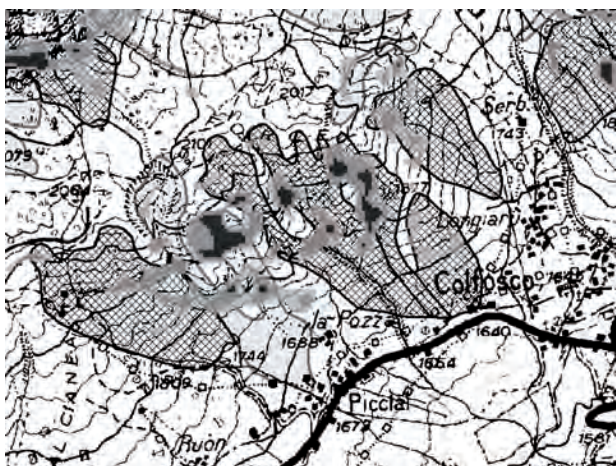


Fig. 7 - Pattern di suscettibilità sovrapposto alla C.L.P.V. di figura 6.
- *Susceptibility pattern overlapped on top of the APM of figure 6.*

STARTER identifichi come altamente suscettibili le stesse zone stimate tali dal rilevatore, ma con una risoluzione maggiore. Il quadro che fornisce il rilevatore appare molto più generico di quello fornito da STARTER. Questo non significa che le zone potenzialmente suscettibili mostrate dalla C.L.P.V. siano errate; invece, questo indica come STARTER riesca ad individuare porzioni dei poligoni della C.L.P.V. e ad assegnare loro differenti gradi di suscettibilità. In questo senso il risultato di Stater mostra una maggiore risoluzione del *pattern* di suscettibilità. In termini applicativi si potrebbe tradurre il significato di quanto appena espresso dicendo che Sarter permette una più rapida e precisa

identificazione di zone in cui posizionare protezioni attive o verso cui direzionare cariche esplosive per la prevenzione del rischio (nel caso, per esempio, si verificano forti precipitazioni nevose).

Un'altra considerazione proviene dall'osservazione dei *cluster* di colore grigio scuro. Essi rappresentano i pixel col valore più alto di suscettibilità. La loro estensione è ragionevolmente comparabile a quella delle zone di distacco identificate dal catasto. Prendendo con la dovuta cautela tale osservazione, quei *pixel* potrebbero essere considerati come zone di distacco da utilizzare come input in calcoli di dinamica valanghiva. La cautela deriva dal fatto che, prima d'impostare qualsiasi calcolo dinamico, occorre comunque verificare, con un dettagliato rilevamento sul terreno, le caratteristiche geomorfologiche delle aree coperte da quei *pixel*, al fine di ridurre al minimo possibili errori di stima del modello. In ogni caso, il conoscere in anticipo dove focalizzare il rilevamento di dettaglio può ridurre in maniera consistente tempi e, quindi, costi.

Recentemente, la Provincia Autonoma di Bolzano ha finanziato un progetto (ancora in corso) per la creazione di una carta sperimentale della pericolosità geologica (Carta della Pericolosità Geologica, foglio n. 28 "La Marmolada": responsabile scientifico Prof. Mario Panizza) all'interno della nuova Carta Geologica d'Italia (Progetto CARG). In questo progetto, il risultato di STARTER viene utilizzato come uno dei possibili input per il calcolo della dinamica valanghiva che utilizza, tra gli altri, un modello bi-dimensionale (Elba) basato sulle classiche equazioni di Völlmy (VOLK & KLEEMAYR, 1999).

Il prototipo dell'applicazione congiunta di STARTER ed Elba è stato collaudato nel comune di Sölden (Tirolo, Austria) ed ha costituito parte di una tesi di dottorato presso l'Università di Vienna (GHINOI, 2002). Sebbene l'estensione delle zone di distacco identificate da STARTER sovrastimasse quella delle zone di distacco reali, l'esperimento ha aperto nuove prospettive. Come si può vedere in figura 8, i poligoni blu sono le zone di distacco identificate da STARTER. I poligoni sono stati utilizzati da Elba come uno degli input nel calcolo della dinamica valanghiva. È stato possibile modellizzare diversi scenari di distanza d'esaurimento, utilizzando diverse combinazioni di altezze del manto nevoso coinvolto e di spessori di neve presa in carico durante la discesa della valanga (mantenendo però costanti i coefficienti

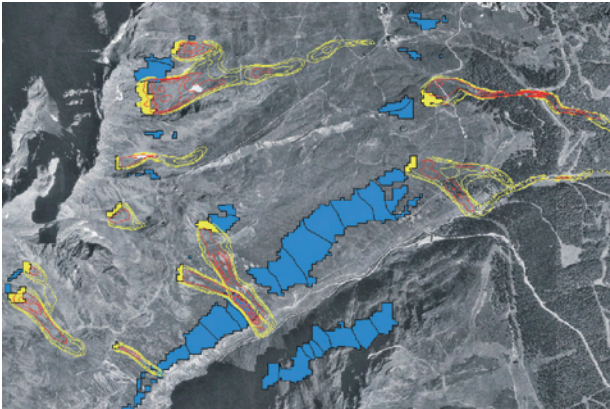


Fig. 8 - Prototipo di una carta della pericolosità valanghiva per l'area di studio di Sölden (Tirolo, Austria). I poligoni blu sono le zone di distacco identificate da STARTER; le linee gialle sono le isobare con valori inferiori a 10 kN/m²; le linee rosse sono le isobare con valori superiori a 10 kN/m². Scenario di pericolosità rappresentato: altezza del manto nevoso staccatosi = 1.50 m; spessore del manto nevoso coinvolto dalla valanga lungo il suo percorso = 10 cm (assunto come costante lungo tutto il tracciato di valanga).

- Prototype of Snow Avalanche Hazard Map for Sölden (Tyrol, Austria). In blue are the polygons of the release areas identified by STARTER; yellow lines are isolines with pressures below 10 kN/m²; red lines are isolines with pressures above 10 kN/m². Hazard scenario: 1.50 m detached snow-volume; 10 cm snow entrainment (taken as constant along the whole avalanche path).

di attrito statico e dinamico). Le massime distanze d'esaurimento, insieme alle isobare dovute allo spostamento della massa nevosa, sono mostrate in figura 8 per il seguente scenario: 1,5 m di spessore del manto nevoso distaccatosi e 10 cm di spessore del manto nevoso preso in carico durante la discesa della valanga. In giallo sono rappresentate le isobare minori di 10 kN/m²; in rosso sono rappresentate le isobare con pressioni maggiori di 10 kN/m². La soglia di 10 kN/m² è stabilita dalle linee guida austriache per discriminare tra aree dove non è possibile costruire nulla e aree dove è possibile costruire, ma utilizzando particolari accorgimenti e protezioni.

Il potenziale di questa applicazione, essendo Elba sviluppato in ambiente ArcGIS, è rappresentato dal calcolo simultaneo e automatico di distanze d'esaurimento per zone di distacco multiple e l'immediata visualizzazione georeferenziata, ottimizzando quindi il tempo di calcolo e permettendo il confronto tra diversi scenari.

I risultati dell'applicazione di STARTER ed Elba in Alta Val Badia saranno disponibili solamente l'anno prossimo, prefigurando comunque considerazioni pratiche degne di altre discussioni e confronti. Ipotizzando risultati positivi, la carta che si otterrà (oppure le carte che si otterranno in base ai possibili scenari considerati) mostrerà, oltre alle zone di distacco maggiormente suscettibili, anche potenzia-

li distanze d'esaurimento avvicinando, in un certo senso, il risultato ottenibile da una carta della pericolosità valanghiva. Mentre, infatti, la C.L.P.V. mostra soltanto le distanze di esaurimento massime raggiunte da eventi valanghivi del passato (ancora una volta mostrando, quindi, un'istantanea dello scenario valanghivo generale), la nuova carta, che si potrebbe chiamare di suscettibilità dinamica, può simulare diversi possibili scenari.

5. - DISCUSSIONE E PROSPETTIVE

L'applicazione di STARTER ha mostrato come, qualora siano disponibili un Catasto Valanghe e una database di carte di base rappresentanti i più importanti fattori causa della suscettibilità valanghiva, si possa raggiungere un risultato simile a quello di una C.L.P.V. I costi di produzione possono essere ridotti sostanzialmente poiché il rilevamento di campagna (principalmente) può essere ridotto al minimo, ad una sorta di controllo finale. I costi effettivi sono quelli di un comune personal computer, mentre STARTER ha un valore commerciale iniziale e, eventualmente, costi di *training*. Per istituzioni provinciali e regionali, che si confrontano quotidianamente con la prevenzione dei rischi naturali e con la pianificazione territoriale di area vasta, i costi iniziali possono essere velocemente ammortizzati dalla frequenza d'uso del *software*.

Capace di simulare la suscettibilità valanghiva su aree anche più vaste di quelle ricoperte da una comune C.L.P.V., (l'Alta Val Badia, per esempio, ha un'estensione di 230 km² ed è ricoperta da tre C.L.P.V.), STARTER può raggiungere risultati con una maggiore risoluzione spaziale rispetto a quelli caratteristici di una C.L.P.V. Dal momento che le C.L.P.V. contengono anche indicazioni sulla massima estensione delle zone d'esaurimento (decifrabili dall'analisi di caratteristiche geomorfologiche e vegetazionali), per ora STARTER può essere utilizzato come fonte d'informazione aggiuntiva per le C.L.P.V., migliorando la loro precisione individuando diversi livelli di suscettibilità.

In ogni caso, se la corrente applicazione di STARTER, congiunta al modello dinamico Elba, portasse a risultati positivi, si potrebbe addirittura arrivare a pensare di sostituire la C.L.P.V., andando nella direzione di carte della pericolosità a scenari multipli e, allo stesso tempo, riducendo i costi derivanti dal rilevamento.

La verifica, considerabile come il cuore del modello STARTER, è ciò che consente di passare da un'analisi sensibilmente soggettiva, come quella caratteristica di una C.L.P.V., ad un'analisi quasi totalmente oggettiva: solo attraverso un'analisi di sensitività oggettiva, effettuata attraverso il confronto di grafici di verifica, STARTER individua quali sono i fattori che favoriscono maggiormente la suscettibilità valanghiva.

Un'altra prospettiva, sempre per quanto riguarda l'utilizzo combinato di STARTER ed Elba, potrebbe derivare dall'introduzione, nel calcolo statistico, delle variabili meteorologica e del manto nevoso. Un primo tentativo d'introduzione della variabile meteorologica è stato effettuato da GHINOI & CHUNG (2005). In quel caso sono state create tre carte di suscettibilità e verificate utilizzando sottoinsiemi del database del Catasto Valanghe. La suddivisione è stata effettuata sulla base di tre differenti scenari meteorologici che hanno determinato il distacco di valanghe. I risultati hanno rivelato una sostanziale differenza nei *pattern* di suscettibilità, rinforzando, in tal modo, l'idea che sia possibile passare da un'istantanea di suscettibilità ad un'analisi di suscettibilità in continuo divenire.

Per realizzare tale idea, comunque, è opinione di chi scrive che sia necessario uno sguardo più approfondito alle relazioni esistenti tra l'evoluzione del manto nevoso, la meteorologia e la geomorfologia. Ciò può essere raggiunto attraverso la raccolta continua di dati sull'evoluzione del manto nevoso in aree che siano rappresentative sia di condizioni del manto nevoso normali che in aree potenzialmente suscettibili, almeno per due stagioni invernali consecutive. I dati dovrebbero essere quindi statisticamente confrontabili con dati meteorologici e geomorfologici dello stesso periodo. E' intenzione di chi scrive di sperimentare questa possibilità durante i prossimi due anni, estendendo il campo d'applicazione anche all'Appennino settentrionale.

6. - CONCLUSIONI

La Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe, dalla sua invenzione da parte dei francesi negli anni '70, è divenuto lo strumento decisionale più utilizzato da pianificatori territoriali in zone soggette a fenomeni valanghivi nell'intero arco alpino e in alcuni settori dell'Appennino. La C.L.P.V. si basa sul ben consolidato metodo d'individuazione delle

potenziali pericolosità naturali: il rilevamento geomorfologico. I segni lasciati dalla passata attività valanghiva sui depositi superficiali e nella vegetazione vengono utilizzati per delineare potenziali tracciati di valanga e zone di distacco, usufruendo anche della testimonianza preziosa di un abitante locale che abbia una memoria storica degli eventi passati. Sebbene la C.L.P.V. rappresenti l'unico strumento per stimare la suscettibilità valanghiva di zone per cui non sia disponibile alcuna informazione sull'attività valanghiva passata, l'ampia distribuzione di Catasti Valanghe nell'arco alpino ha incoraggiato ad ottimizzarne l'informazione contenuta utilizzando consolidate tecnologie quali i GIS e metodi di analisi statistica multivariata. Lo scopo è quello di ridurre i costi di produzione e, allo stesso tempo, di migliorare l'efficienza dell'analisi di suscettibilità.

I metodi statistici ruotano intorno all'idea di fondo che in futuro, il verificarsi di un certo fenomeno naturale sia necessariamente condizionato dagli stessi fattori causa che lo hanno condizionato nel passato. Da qui ne consegue che la procedura di analisi richieda la conoscenza della distribuzione spaziale del fenomeno nel passato (in questo caso le zone di distacco delle valanghe) e di fattori causa indipendenti dalla variabile temporale. Dal momento che i fattori che influiscono sulla suscettibilità valanghiva sono facilmente accessibili (anche in formato digitale) o derivabili da altre carte di base (come il Modello Digitale delle Quote), e che gli eventi valanghivi del passato sono raccolti nei Catasti Valanghe, la possibilità di raggiungere gli obiettivi sopraccitati può essere realizzata.

Quello presentato in questo articolo è uno dei possibili metodi che analizzano statisticamente dati spaziali tra loro correlati, ma la sua applicazione al campo della suscettibilità valanghiva è in assoluto la prima. Il confronto tra il risultato di STARTER in Alta Val Badia e la C.L.P.V. della stessa zona ha evidenziato quanto segue: - il *pattern* di suscettibilità di STARTER segue la distribuzione spaziale delle aree potenzialmente suscettibili identificate dalla C.L.P.V., ma senza coincidere con essa; - il *pattern* di suscettibilità mostra una definizione maggiore poiché, all'interno delle aree potenzialmente suscettibili definite dalla C.L.P.V., evidenzia porzioni caratterizzate da diversi valori di suscettibilità; - la sua maggiore risoluzione può facilitare il modello dinamico Elba nel calcolo automatico delle distanze d'esaurimento per differenti scenari meteorologici.

logici; - il pattern di suscettibilità non si limita alle aree vicine ai tracciati di valanga esistenti, ma si estende all'intera area di studio (in questo caso 230 km²), in tal modo coprendo anche la porzione di territorio solitamente non considerata dal Catasto Valanghe.

Questi quattro risultati portano ragionevolmente a supporre che l'uso di STARTER, quando possibile, possa ridurre i costi di produzione delle carte di suscettibilità al minimo, evitando gran parte del rilevamento di campagna solitamente indispensabile sia per identificare le potenziali zone di distacco che per impostare i calcoli di dinamica valanghiva.

Anche i costi di aggiornamento possono essere ridotti: il verificarsi di nuove valanghe potrebbe infatti aumentare il numero di eventi utilizzabili nel calcolo statistico, permettendo di modificare, migliorandolo, il pattern di suscettibilità in, per così dire, tempo reale. Se, poi, la pubblicazione della carta di suscettibilità avvenisse attraverso un server web-GIS, allora i costi di stampa e di ristampa si azzererebbero. In questo modo, istituzioni pubbliche e private, regionali e provinciali, che necessitano di uno strumento per valutare la suscettibilità valanghiva e il rischio su area vasta potrebbero trarre vantaggio dall'uso di STARTER quale miglioramento delle attuali C.L.P.V. e carta della pericolosità valanghiva e, allo stesso tempo, ridurre i costi di produzione degli elaborati cartografici.

L'applicazione di STARTER è tutt'ora in implementazione per quanto concerne la creazione di carte della pericolosità valanghiva: solo nel momento in cui la sua applicazione congiunta con il modello Elba sarà collaudata e verificata in Alta Val Badia vi potranno essere più elementi per ipotizzare effetti pratici positivi in tal senso.

La frontiera successiva dell'applicazione di STARTER sarà l'analisi della variabilità spaziale delle condizioni del manto nevoso in relazione alle condizioni meteorologiche e geomorfologiche. Questo potrebbe rivelare interessanti relazioni tra le tre componenti dell'instabilità del manto nevoso: tali relazioni potrebbero essere utilizzate per analisi di suscettibilità con una maggiore risoluzione temporale, con una connotazione più vicina ad un'analisi di stabilità del manto nevoso. Poiché le condizioni del manto nevoso sono così mutevoli nello spazio, l'applicazione in questo senso di STARTER dovrebbe interessare aree ad estensione ben minore rispetto a quella considerata in questo studio, tenendo presente, fra l'altro, che si de-

vono necessariamente eseguire profili del manto nevoso in diversi punti (rappresentativi di diverse condizioni del manto nevoso) a breve distanza reciproca

Ringraziamenti

Questo articolo è stato scritto sulla base dei risultati ottenuti durante lo svolgimento del Progetto CARG (Nuova carta Geologica d'Italia, Carta della Pericolosità Geologica, foglio n. 28 "La Marmolada": responsabile scientifico Prof. Mario Panizza), finanziato dalla Provincia Autonoma di Bolzano.

BIBLIOGRAFIA

- AUTORI VARI (1993) - *Carta di localizzazione probabile delle valanghe: "Badia"*. Ufficio Idrografico - Servizio Prevenzione Valanghe, Alto Adige.
- BERNKNOFF R.L., CAMPBELL R.H., BROOKSHIRE D.S. & SHAPIRO C.D. (1988) - *A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation*. Bull. I.A.E.G., 25 (1): 39-56.
- BONHAM-CARTER G.F., AGTERBERG F.P. & WRIGHT D.F. (1988) - *Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia*. Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (11): 1585-1592.
- BONHAM-CARTER G.F. & AGTERBERG F.P. (1990) - *Application of a microcomputer-based geographic information system to mineral potential mapping*. In: T. HANLEY & D.F. MERRIAM (Eds.): "Microcomputers in Geology", pp. 49-74, Pergamon Press.
- BONHAM-CARTER G.F., AGTERBERG F.P. & WRIGHT D.F. (1989) - *Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential*. In: F.P. AGTERBERG & G.F. BONHAM-CARTER (Eds.): "Statistical applications in the Earth Sciences". Geological Survey of Canada, Paper 89 (9): 171-183.
- BRABB E.E. (1984) - *Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping*. Proc. Fourth International Symposium on Landslides. Canadian Geotechnical Society: pp. 307-324, Toronto, Canada.
- BRABB E.E. (1987) - *Analyzing and portraying geologic and cartographic information for landuse planning, emergency response and decision making in San Mateo County, California*. Proc. GIS '87. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Va., San Francisco, California: pp. 362-374.
- BRABB E.E., GUZZETTI F., MARK R. & SIMPSON R.W. (1989) - *The extent of landsliding in Northern New Mexico and similar semi-arid regions*. In: P.M. SADLER & D.M. MORTON (Eds.): "Landslides in a semi-arid environment". Inland Geological Society: pp. 163-173, University of California, Riverside.
- BRABB E.E., PAMPEYAN E.H. & BONILLA M.G. (1972) - *Landslide susceptibility in San Mateo County, California*. Misc. Field Studies Map MF360 (Scale 1:52,500). U.S. Geological Survey, Reston, Va.
- BURNET R. & MARTI G. (1998) - *Avalanche maps and data-*

- bases in Europe*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, European Commission Programme Energy, Environmental and Sustainable Development, Project SAME: Snow Avalanche Mapping and Warning Systems in Europe (Contract ENV4-CT96-0258), SAME Report, EUR 19069.
- BURROUGH, P.A. (1986) - *Principles of geographical information systems for land resource assessment*. Clarendon Press, Oxford, U.K.
- CARRARA A. (1983) - *Multivariate models for landslide hazard evaluation*. *Math. Geol.*, **15** (3): 403-427.
- CARRARA A. (1988) - *Landslide hazard mapping by statistical methods: a "black box" approach*. Proc. Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries: pp. 205-224, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Perugia, Italy.
- CARRARA A., PUGLIESE C.E. & MERENDA L. (1977) - *Computer based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena*. *Z. Geomorph.*, N.F., **21** (2): 187-222.
- CHUNG C.F. & AGTERBERG F.P. (1980) - *Regression models estimating mineral resources from geological map data*. *Math. Geol.*, **12** (5): 473-488.
- CHUNG C.F. & FABBRI A.G. (1993) - *The representation of geoscience information for data integration*. *Non-renewable Resources*, **2**(2): 122-139.
- CHUNG C.F. & FABBRI A.G. (1999) - *Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **65**(12): 1389-1399.
- CHUNG C.F. & FABBRI A.G. (2001) - *Prediction models for landslide hazard zonation using a fuzzy set approach*. In: M. MARCHETTI & V. RIVAS (Eds.): "Geomorphology and environmental impact assessment": pp. 31-47, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- CHUNG C.F. & KEATING P.B. (2002) - *Mineral potential evaluation based on airborne geophysical data*. *Exploration Geophysics*, **33**: 28-34.
- CHUNG C.F. & LECLERC Y. (1994) - *A quantitative technique for zoning landslide hazard*. International Association for Mathematical Geology Annual Conference, October 3-5, 1994, Mont Tremblant, Quebec: pp. 87-93.
- CHUNG C.F., BOBROWSKY P.T. & GUTHRIE R. (2002a) - *Quantitative prediction model for landslide hazard mapping: Tsiitika and Schmidt Creek Watersheds, Northern Vancouver Island, British Columbia, Canada*. In: P.T. BOBROWSKY (Ed.): "Geoenvironmental mapping, methods, theory and practice": pp. 697-716, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- CHUNG C.F., FABBRI A.G. & VAN WESTEN C.J. (1995) - *Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation*. In: A. CARRARA & F. GUZZETTI (Eds.): "Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards": 107-133, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- CHUNG C.F., KOJIMA H. & FABBRI A.G. (Eds.) (2002b) - *Stability analysis of prediction models for landslide hazard mapping*. *Applied Geomorphology: theory and practice*: pp. 3-19, John Wiley & Sons, Chichester.
- CHUNG C.F., AN P., ZAHANG A. & GARSON D. (1997) - *Spatial Data Integration Software (SDI)*. Geological Survey of Canada, Ottawa.
- CLERICI A., PEREGO S., TELLINI C. & VESCOVI P. (2002) - *A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method*. *Geomorphology*, **48**: 349-364.
- GHINOI A. (2002) - *A spatial prediction model for localising potential snow avalanche release areas: S.T.A.R.T.E.R. (Snow avalanche trigger areas location finder), the prototype study of Sölden (Tyrol, Austria)*. Ph.D. Thesis, University of Vienna, Vienna, Austria.
- GHINOI A. (2004) - *STARTER: un metodo per la valutazione della suscettibilità valanghiva*. *Neve e Valanghe*, **51**: 12-25.
- GHINOI, A. & CHUNG, C.F. (2002) - *A new methodology for snow avalanche hazard mapping: the case study of Sölden, Tyrol, Austria*. In: D. DELAHAYE, F. LEVOY & O. MAQUAIRE (Eds.): "Geomorphology: from expert opinion to modelling": pp. 253-261, CERG Editions, Strasbourg.
- GHINOI, A. & CHUNG, C.F. (2005) - *STARTER: a statistical GIS-based model for the prediction of snow avalanche susceptibility using terrain features - application to Alta Val Badia, Italian Dolomites*. In: L. BORGATTI & M. SOLDATI (Eds.): "Geomorphological hazard and human impact in mountain environments". *Geomorphology* **66**: 305-325.
- GHINOI A., CHUNG C.F., BAUER B. & FABBRI A.G. (2002a) - *A topography based statistical model for localising potential snow avalanche release areas at the scale of an alpine valley*. *Z. Gletsch. Glaziol.*, **38** (1): 77-94.
- GHINOI A., CHUNG C.F., FABBRI A.G. & BAUER B. (2002b) - *Proposal of a statistical methodology for localising potential snow avalanche release areas in the skiing area of Sölden (Tyrol, Austria)*. In: R. BOTTARIN & U. TAPPEINER (Eds.): "Interdisciplinary mountain research": pp. 100-111, Blackwell Science.
- MAGGIONI M. & GRUBER U. (2003) - *The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency*. *Cold Regions Science and Technology*, **37**: 407-419.
- MAGGIONI M., GRUBER U. & STOFFEL A. (2002) - *Definition and characterisation of potential avalanche release areas*. ESRI International User Conference, July 9-13, 2001, San Diego, U.S.A.: pp. 115-126.
- MCCLUNG D.M. (2001) - *Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging*. *Ann. Glaciology*, **32**: 223-229.
- MCCLUNG D.M. & SCHAEERER P. (1993) - *The avalanche handbook*, pp. 272, The Mountaineers.
- MCCLUNG D.M. & TWEEDY J. (1993) - *Characteristics of avalanching: Kootenay Pass, British Columbia, Canada*. *J. Glaciology*, **39** (132): 316-322.
- REMONDO J., GONZALEZ A., DIAZ DE TERAN J.R., CENDRERO A., FABBRI A.G. & CHUNG C.F. (2003) - *Validation of landslide susceptibility maps: examples and applications from a case study in Northern Spain*. *Natural Hazards*, **30**: 437-449.
- TURNER A.K. & SCHUSTER R.L. (Eds.) - *Landslides investigation and mitigation*. Special Report 247, Transportation Research Board, National research Council. National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- VAN WESTEN, C.J. (1993) - *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation*. ITC Publication 15, Enschede, Netherlands.
- VOLK G. & KLEEMAYR K (1999) - *ELBA - Ein GIS-gekoppeltes Lawinensimulationsmodell, Anwendungen und Perspektiven*. *Öst. Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, **2-3**: 84-92.