

C. BARONI (*), G. BRUSCHI (**), A. CRISCUOLO (***), A. RIBOLINI (*)

IL RISCHIO GEOMORFOLOGICO INDOTTO DALL'ATTIVITÀ ESTRATTIVA NEI BACINI MARMIFERI APUANI (ALPI APUANE, TOSCANA)

Riassunto - Nei bacini marmiferi apuani l'evoluzione delle tecniche estrattive e di recupero degli scarti di lavorazione ha determinato l'insorgere di nuovi scenari di rischio geomorfologico. In questo lavoro vengono illustrati recenti eventi di frane di materiale litoide e di trasporti in massa lungo le discariche di detrito (*ravaneti*), valutando l'influenza diretta dall'attività estrattiva nell'innescare dei fenomeni di dissesto.

Le cave a cielo aperto vengono lavorate per sbalzi successivi del piazzale di lavorazione, con la formazione di versanti residui in materiali fortemente fratturati spesso alti più di 100 m. Negli ultimi anni su questi versanti si sono verificati diversi eventi franosi, alcuni con volumi coinvolti superiori ai 30.000 m³. Le cause scatenanti sono state l'intensità oraria delle precipitazioni (in un caso 60 mm in 1 ora) e le piogge antecedenti (in un caso 80 mm nelle 34 ore precedenti). L'analisi della cinematica delle frane principali ha evidenziato che si tratta di cedimenti strutturali di elevati fronti rocciosi, con fenomeni misti di rottura al piede, scivolamento su giunti e ribaltamento di colonne superficiali.

Relativamente agli accumuli di detrito (*ravaneti*), il susseguirsi nel tempo di diverse tecniche estrattive ha determinato la sovrapposizione di due strati a diversa granulometria e permeabilità. Lo strato profondo, blocchi pluri-decimetrici e con scarsa matrice, corrisponde al *ravaneto* tipico del periodo di passaggio fra il XIX ed il XX secolo. Il *ravaneto* superficiale attivo, con blocchi decimetrici e abbondante matrice fine, è la conseguenza dell'introduzione del taglio a filo diamantato (anni '70). Ulteriore materiale fine è introdotto dalle operazioni di grigliatura dei clasti recuperati per la produzione di CaCO₃.

Sui *ravaneti* negli ultimi anni si sono verificati numerosi trasporti in massa del tipo *debris flows*. Lo studio delle registrazioni pluviometriche ha evidenziato una soglia estremamente bassa per l'attivazione dei *debris flows*, con eventi scatenati da 60 mm di pioggia in 5 ore con intensità massima di soli 14 mm in un'ora. La mobilitazione avviene tramite un'iniziale frana superficiale (*soil slip*) che, per un processo di progressiva fluidificazione, si trasforma in un *debris flow*. L'aumento di frequenza dei *debris flows* negli ultimi anni può essere ricondotto all'introduzione di materiale fine nei *ravaneti*, che favorisce il processo di saturazione del corpo detritico.

Nei bacini marmiferi apuani, la formazione di versanti residui sub-verticali fortemente fratturati e la concentrazione di frazioni fini nei *ravaneti*, indotta dalle nuove tecniche di segazione e di recupero degli scarti, determinano situazioni di rischio per il personale ed hanno causato ingenti danni economici alle industrie estrattive.

Parole chiave - Rischio geomorfologico, *debris flows*, Carrara, Alpi Apuane.

Abstract - *Geomorphological hazard induced by quarry activity in the Carrara Marble Basin (Apuane Alps, Tuscany).* The new quarrying techniques and the reject stone recovery system induce new geomorphological hazard scenarios in the Carrara Marble Basin. This work analyses the recent landslides and *debris flows* occurred in the Marble Basins, stressing their relationships with the quarrying activity.

In the open space quarries, the progressive lowering of the working base level determines the formation of steep and high (more than 100 m) slopes carved in densely fractured rocks. In correspondence of these cliffs, several landslides occurred in the last years, in some cases mobilizing more than 30,000 m³ of rock. The triggering causes were the rainfall hourly intensity (even 60 mm/1h) and the antecedent rainfalls (up to 80 mm in the 34 antecedent hours). The main landslides kinematic analysis highlighted that they are a structural collapse of high rocky bench, with rupture phenomena at the base, differential slides and local toppling.

As regard the quarry dump deposits (locally called *ravaneti*), the temporal evolution of quarrying techniques determined the overlapping along the slopes of two layers with different granulometric and permeability characteristics. The deepest layer, with multi-decimetres blocks and scarce fine matrix, corresponds to the typical *ravaneto* of the 19th-20th centuries crossing period. The active surface *ravaneto*, with decimetres blocks and abundant fine matrix, is the consequence of the new diamond wire cutting methods, introduced in the '70s. Nowadays, fine material is added to the *ravaneti* also by the reject stones sieving, in order to produce CaCO₃.

In the last years, several *debris flows* affected the *ravaneti*. The rainfall recording analysis shows a relative low threshold for *debris flows* triggering, with events occurred with 60 mm/5 h of rainfall and with a maximum intensity of only 14 mm/1 h. The mobilization occurs by means of initial soil slip that, with a progressive fluidification, becomes a *debris flow*. The increased frequency of the events in the last years can be referred to fine material added to the *ravaneti* that forced the saturation processes.

In the Carrara Marble Basins, the highest geomorphological hazards for the workers and the infrastructures are represented by the abandoned sub-vertical and densely fractured slopes, and the increased concentration of fine fractions in the *ravaneti*, induced by the new quarrying techniques and the reject stone recovery.

Key words - Geomorphological hazard, *debris flows*, Carrara Marble Basin, Apuane Alps.

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa e CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, via S.Maria 53, Pisa.

(**) Comune di Carrara, Settore Ambiente, Piazza II Giugno, Carrara.

(***) Comune di Carrara, Settore Marmo, via Plebiscito, Carrara.

Pubblicazione n° 2522 del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del C.N.R., U.O. 13 (Pisa) (Resp. P.R. Federici).

INTRODUZIONE

I bacini marmiferi di Carrara rappresentano uno dei luoghi di maggior interesse per studiare le problematiche ambientali connesse all'attività estrattiva in quanto costituiscono una delle zone più intensamente escavate del mondo (7 cave/km²). Il giacimento marmifero di Carrara è diviso morfologicamente in bacini estrattivi (Fig. 1), che corrispondono a quattro valloni del versante tirrenico dei Monti Borla (1.469 m s.l.m.) e Monte Sagro (1.749 m s.l.m.). Da est verso ovest, questi bacini vengono convenzionalmente denominati Bacino di Colonnata, Miseglia, Torano e Pulcinacchia (Fig. 1).

Attualmente a Carrara risultano attive oltre 90 cave, delle quali 78 sono lavorate a cielo aperto e le rimanenti in sotterraneo, con una produzione di materiale commerciale che ha raggiunto nel 2000 1.100.000 tonnellate, su un totale di 3.500.000 tonnellate di materiale escavato.

Negli ultimi 10 anni si è assistito ad un progressivo incremento della produzione da attribuirsi in larga parte allo sviluppo di nuovi macchinari che consentono di raggiungere elevate velocità di taglio, quali le tagliatrici a filo diamantato e a catena, e di movimentare ingenti volumi di materiale. Le modificazioni nelle tecniche estrattive hanno prodotto condizioni geologico-ambientali che favoriscono l'insorgere di nuovi scenari

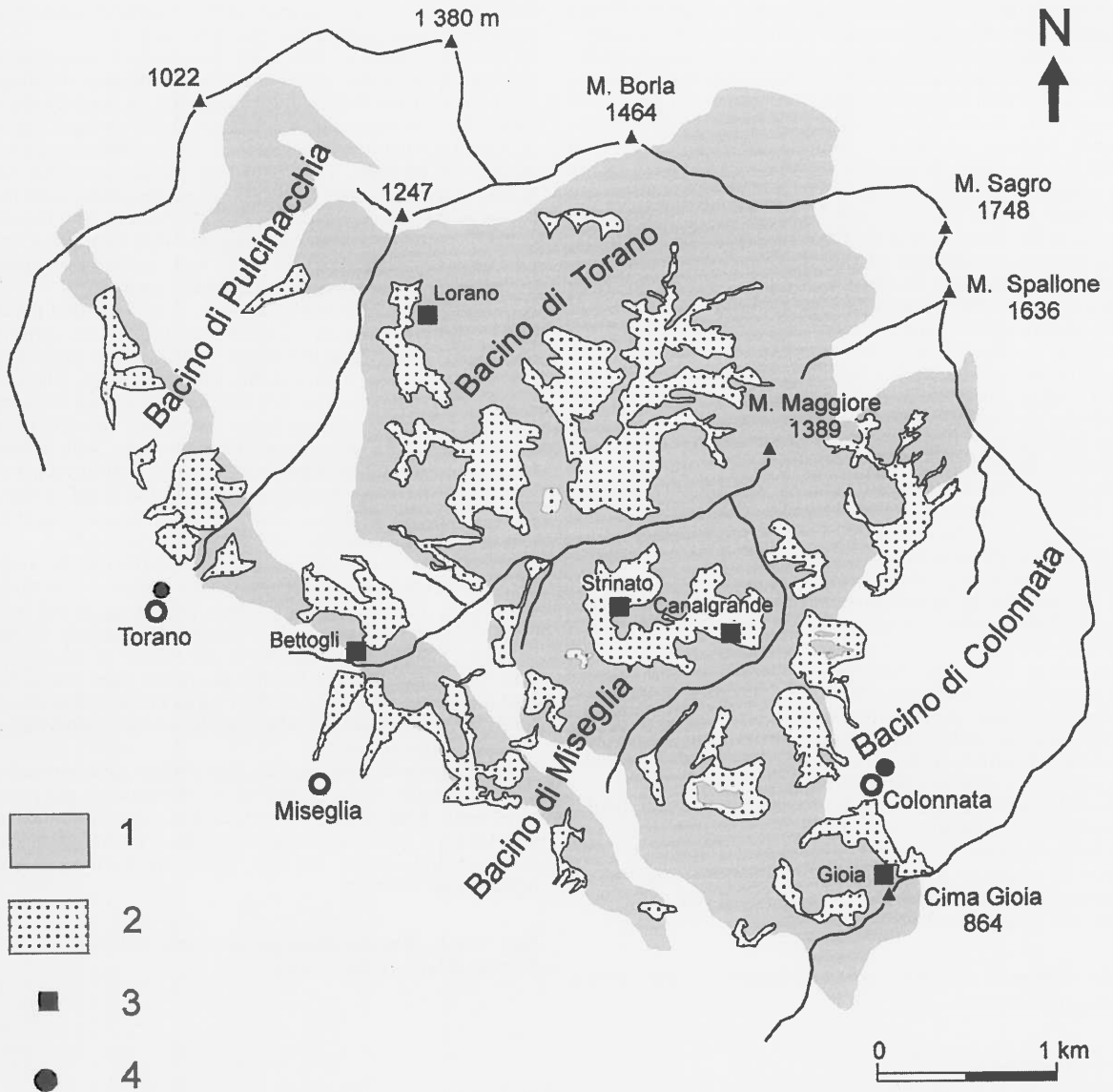


Fig. 1 - Inquadramento geografico e geologico dei bacini marmiferi Apuani. 1) Affioramento marmifero; 2) Principale ravaneto; 3) Frana citata; 4) Stazione meteorologica.

di rischio geomorfologico, sostanzialmente suddivisi in due principali tipologie: i) frane di materiale litoide (marmo) dai versanti che incombono sui piazzali di cava; ii) trasporti in massa dalle discariche di detrito. Gli eventi di dissesto occorsi negli ultimi anni rendono il rischio geomorfologico nei bacini marmiferi apuani un problema rilevante ed estremamente attuale, se si considerano il numero degli addetti all'escavazione (circa 800) ed il perimetro della zona coinvolta dall'attività estrattiva, che interessa, in parte, alcuni centri abitati.

Lo scopo di questo lavoro è quello di illustrare i recenti eventi geomorfologici avvenuti nei bacini marmiferi, analizzandone fattori e cause naturali, e di valutare l'influenza diretta dall'attività antropica nell'insorgere dei fenomeni di dissesto.

Relativamente ai trasporti in massa, il lavoro si basa sui risultati di un precedente studio (Baroni *et al.*, 2000), con l'aggiunta di nuovi dati relativi agli eventi più recenti.

CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E CLIMATICHE

Le Alpi Apuane, situate nella Toscana nord-occidentale, costituiscono un massiccio di forma ellissoidale con asse maggiore parallelo alla costa, separato dal mare (Mar Ligure) dalla pianura costiera della Versilia. Il bacino della Garfagnana a NE e il bacino della Lunigiana a NW separano il massiccio dalla dorsale principale dell'Appennino settentrionale. Le quote maggiori si raggiungono nella parte centro-orientale del massiccio con il Monte Pisanino (1946 m s.l.m.) e il Monte Tambura (1890 m s.l.m.).

Dal punto di vista geologico le Alpi Apuane sono una finestra tettonica nella catena a falde dell'Appennino settentrionale. Esse costituiscono uno dei migliori esempi dalla diretta sovrapposizione di unità con evoluzione tettonica alto-crostante su un complesso metamorfico deformato a livello medio-crostante (Carmignani *et al.*, 1993). In ordine geometrico ascendente e dal centro verso l'esterno del massiccio si riconoscono le seguenti unità strutturali: 1) Complesso Metamorfico Apuano (Paleozoico-Oligocene superiore), in cui è presente la formazione dei marmi, deformato e metamorfosato in facies scisti verdi a partire dall'Oligocene superiore, 2) la successione sedimentaria della Falda Toscana (Trias-Oligocene) interessata da metamorfismo anchizonale (Cerrina Ferroni *et al.*, 1983), 3) le Unità Liguri costituite da frammenti di basamento oceanico e dalle relative coperture sedimentarie (nella zona apuana comprendono termini dal Cretaceo all'Eocene).

La tettonica collisionale Oligocenica ha sviluppato grandi pieghe isoclinali, che determinano la geometria e la distribuzione degli affioramenti marmiferi, alla quale è seguita una fase distensiva nel Miocene (Carmignani *et al.*, 1980; Carmignani & Kligfield, 1990). L'orizzonte produttivo del celebre marmo di Carrara (calcarei metamorfosati in facies scisti verdi) è datato al Lias inferiore e più precisamente all'Hettangiano. Nella zona di Carrara pieghe con asse in

direzione NNW-SSE portano il marmo ad affiorare per grandi estensioni (Fig. 1).

La particolare posizione delle Alpi Apuane parallele alla costa tirrenica e l'effetto orografico causato dall'alta energia del rilievo (in meno di 10 km di quota si raggiungono quasi 2000 m s.l.m.) favoriscono il rapido raffreddamento delle masse d'aria umida di origine atlantica o mediterranea. Le precipitazioni registrate immediatamente a est dello spartiacque principale delle Alpi Apuane mostrano, per il periodo 1956-1985, valori medi superiori a 3000 mm/anno con massimi superiori a 4000 mm/anno (Rapetti & Vittorini, 1991). Il regime delle piogge è di tipo submediterraneo, con un massimo principale in autunno, uno secondario in inverno ed un minimo in estate. La media dei giorni piovosi annui è compresa tra 95 e 105 con intensità media superiore a 15 mm/giorni di pioggia (Rapetti & Vittorini, 1994).

FATTORI PREDISPOSTI L'INSTABILITÀ LEGATI ALL'ATTIVITÀ DI ESCAVAZIONE

Nei Bacini Marmiferi Apuani, le cave a cielo aperto vengono lavorate per sbassi successivi del piazzale, determinando un progressivo abbassamento della quota della zona di lavorazione; i versanti residui, spesso verticali, incombono sulle zone di lavorazione. Queste pareti verticali, dette *tecchie*, che in molti casi superano i 100 m di altezza, si trovano in corrispondenza dei confini delle aree in disponibilità, dove la qualità del materiale non è commerciabile, o in corrispondenza di zone fortemente fratturate, dove la resa del materiale non è economicamente vantaggiosa (Fig. 2). La presenza di fasce litoidi intensamente fratturate, dette localmente *finimenti*, diminuisce drasticamente la stabilità delle *tecchie*.

Recenti studi condotti da Enti pubblici interessati alle attività estrattive evidenziano che almeno 35 cave presentano *tecchie* da mettere in sicurezza tramite operazioni di bonifica e gradonatura del versante; 22 cave risultano al momento parzialmente inibite dagli organi di Polizia Mineraria. Il Ministero delle Attività Produttive (D.M. 15 ottobre 2001) ha recentemente previsto un finanziamento per opere di bonifica e risistemazione dei fronti di escavazione.

Come conseguenza di un'estrazione intensa e prolungata nel tempo, i Bacini Marmiferi Apuani sono caratterizzati da enormi volumi di detrito di scarto dell'estrazione (*ravaneti*) che vengono riversati lungo i versanti e che costituiscono ormai un elemento tipico del paesaggio (D'Amato Avanzi & Verani, 1998). I fattori predisponenti l'instabilità dei *ravaneti* derivano dal susseguirsi di differenti tecniche estrattive che nel tempo hanno determinato la sovrapposizione di strati a differente composizione granulometrica e permeabilità. Gli strati più profondi e più antichi sono costituiti da blocchi grossolani con scarsa matrice perlopiù sabbiosa seguiti da livelli a pezzatura uniforme (*testa d'uomo*) tipici del periodo a cavallo tra l'800 ed il '900, mentre gli strati più superficiali, attualmente in fase di accrescimento, risultano invece costituiti oltre che da blocchi



Fig. 2 - Fronte di escavazione (*tecchia*) abbandonato. Visibile la fascia di intensa fratturazione (*finimento*) ed il piazzale di lavorazione sottostante.

e massi di dimensioni eterogenee anche da una grande quantità di materiale fine (limi) che diminuisce la permeabilità dell'accumulo. Questo strato superficiale (circa 2 m) dei *ravaneti* attivi risulta costruito dagli scarti derivanti dall'intenso utilizzo del filo diamantato introdotto per la prima volta negli anni '70. Durante i tagli con il filo diamantato si produce una notevole quantità di *marmettola* (polvere di marmo con la granulometria dei limi) che, recentemente, viene sommata alle terre derivanti da operazioni di grigliatura dei clasti recuperati per la produzione di CaCO_3 . Queste operazioni ed in special modo la grigliatura degli scarti di lavorazione hanno determinato un notevole incremento della frazione fine dei *ravaneti*, diminuendo drasticamente la soglia di saturazione determinando diffuse situazioni di dissesto in atto o potenziale. I *ravaneti* antichi si osservano generalmente in sezione al di sotto di quelli attivi, ma anche in superficie laddove la coltivazione non è proceduta nel tempo. Nella Figura 3 sono illustrate le differenze tessiturali rilevate sulla superficie di *ravaneti* attivi e antichi, questi ultimi ancora osservabili dove le coltivazioni sono state abbandonate da circa 20 anni. I dati esposti mettono in evidenza come nella tessitura superficiale (> 1 cm) dei *ravaneti* antichi prevalgano classi granulometriche maggiori (8-10 cm, > 14 cm) rispetto a quanto misurato nei

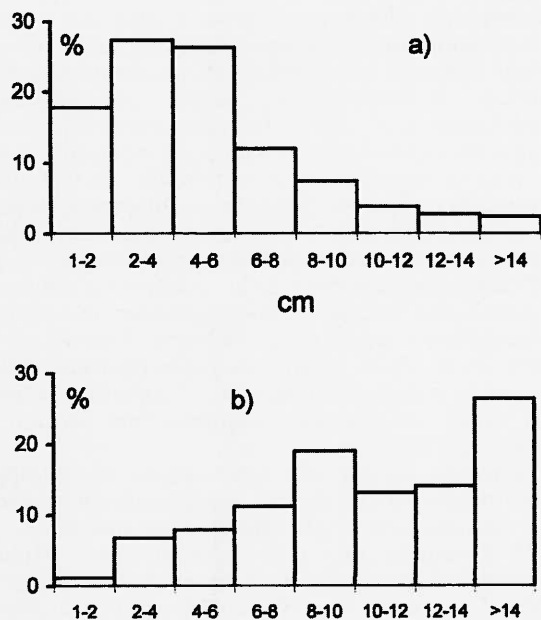


Fig. 3 - Tessitura superficiale (> 1 cm) di ravaneto attivo (a) e antico (b).

ravaneti, attivi (2-4 cm, 4-6 cm). Le osservazioni dirette hanno evidenziato come la matrice dei depositi (< 1cm) sia relativamente abbondante nei *ravaneti* attivi (dal 40% al 50 %) e sia composta da sabbia e silt in proporzioni circa uguali; i *ravaneti* antichi hanno un minore contenuto in matrice (al massimo fino al 30%) costituita prevalentemente da sabbia (68%).

ANALISI DEI DISSESTI

Frane di materiale litoide

Negli ultimi tre anni (dalla fine del 1997) si sono verificati nelle cave di Carrara più eventi franosi, tra i quali sono da segnalare per la dimensione dei volumi coinvolti la frana di Canalgrande (27.12.97) di 30.000 m³ (Fig. 4) e quella di Lorano (7.11.97) di 80.000 m³ (Fig. 5). Distacchi di masse rocciose di minori dimensioni ma non meno pericolosi sono poi quelli avvenuti nelle cave di Gioia (15.6.97), dello Strinato (6.11.00) e dei Betogli (28.4.98); quest'ultimo ha causato la morte di due operai. Tutte queste frane si sono staccate da pareti sub-verticali direttamente intaccate dalle lavorazioni o interessate dalle escavazione al piede che hanno

incrementato i dislivelli tra i piazzali di cava e il soprastante ciglio del versante.

Per meglio comprendere la cinematica delle frane avvenute è utile ricordare i tipici sistemi di fratturazione dei marmi apuani che sono denominati del *contro*, del *secondo* e del *verso* seguendo la tradizionale terminologia utilizzata in cava per individuare i tre piani delle bancate in lavorazione (Fig. 6). Queste famiglie di fratturazione, in genere ortogonali tra loro, hanno direzione appenninica (NW-SE) nel caso dei *contri*, direzione antiappenninica per i *secondi* e corrispondono ai piani di scistosità principale nel caso delle fratture del *verso* (mediamente N 150°, 45° SW).

L'analisi dei fenomeni franosi avvenuti nei bacini marmiferi ha evidenziato la possibilità del verificarsi di più cinematismi ed in particolare i) scivolamento bi-tridimensionale (formazione di cunei o prismi) determinato dall'intersezione dei sistemi di fratturazione presenti, ii) ribaltamento di masse sommitali per *toppling* o rottura di elementi laminari, iii) cedimento strutturale dell'ammasso roccioso intensamente fratturato con piani di distacco verticali e subcircolari (scalinata).

Le frane di Lorano e Canalgrande, le maggiori avvenute nell'ultimo decennio si sono verificate con meccanismi simili; entrambe costituiscono esempi di collasso di un elevato fronte roccioso subverticale con fenomeni misti di rottura al piede, scivolamento su giunti e ribaltamento di colonne superficiali. Il cedimento strutturale di ampie porzioni di versante è stato descritto attraverso prove sperimentali (Ladanyi & Archambault, 1972) che hanno evidenziato come per un ammasso roccioso attraversato da discontinuità ravvicinate si possono creare superfici di rottura che attraversano e contornano i giunti formando una scalinata. In questo caso il piano di rottura fra le discontinuità preesistenti avrà un'inclinazione di $45^\circ + \varphi/2$, con φ = angolo di attrito interno della roccia intatta.

Causa scatenante nel caso di Lorano è stata l'intensa precipitazione piovosa (120 mm in 6 ore con picco di 60 mm in una sola ora, e 80 mm già caduti nelle 34 ore precedenti), mentre per Canalgrande oltre alla pioggia possono esser state determinanti vibrazioni indotte dall'esterno.



Fig. 4 - La Frana di Canalgrande.



Fig. 5 - La Frana di Lorano.

In Figura 6 viene schematizzata la dinamica delle frane di Lorano e Canalgrande. In entrambi i casi l'ammasso roccioso era attraversato da numerosi giunti subverticali identificabili in due principali famiglie: le fratture del *contro* a direzione 130° N, e quelle del *secondo* a direzione 40° - 70° N. Alle spalle delle pareti franate erano inoltre presenti fasce di intensa fatturazione denominate *finimenti* (Fig. 6a). La verifica grafica di stabilità (test di Markland) di queste strutture non aveva evidenziato possibili cinematismi, data la geometria dei fronti in escavazione. Con l'approfondimento delle coltivazioni l'ammasso roccioso è stato però sottoposto a un nuovo stato tensionale corrispondente allo *stress-path* dovuto a compressione per scarico. In queste condizioni l'intensa precipitazione ha provocato nelle fratture più aperte la diminuzione della coesione, mentre nei finimenti, caratterizzati dall'intersecarsi di più fratture a diversa immersione e quindi dalla minor capacità drenante, una sovrappinta idraulica che ha innescato la rottura per trazione della base del prisma più esterno (Fig. 6a). Successivamente la porzione retrostante, priva di appoggio, è crollata per scivolamento di cunei lungo fratture al *contro* e al *secondo* (Fig. 6b). Nel caso di Lorano si sono avuti poi fenomeni di apertura e ribaltamento delle colonne più esterne (Fig. 6c), nonché il richiamo per scalzamento di soprastanti corpi detritici; il volume staccatosi su un dislivello di circa 160 metri ha colmato il cantiere sottostante riuscendo a defluire orizzontalmente per altri 200 metri. Gli *strappi* in roccia alla base dei due crolli hanno inclinazioni di circa 68° , corrispondenti quindi a quanto desumibile dalla formula $45^\circ + \phi/2$ di Ladanyi e Archambault (1972).

Trasporti in massa sulle discariche di detrito

Su *ravaneti* sono stati rilevati negli ultimi anni numerosi trasporti in massa di materiale detritico che, nel caso particolare, vengono identificati come colate di *debris flows* (Fig. 7). I *debris flows* sono definiti come rapidi movimenti di una miscela di detrito, acqua e aria che si muove come un fluido viscoso. Sebbene i *debris flows* possano originarsi in varie maniere, nelle Cave di Carrara predomina la mobilitazione per frana (Baroni *et al.*, 2000). A seguito della formazione di una superficie di rottura, in un regime quasistatico (cioè con una velocità di taglio abbastanza piccola e con granuli che si mantengono in contatto continuo), un corpo detritico non densamente impacchettato come quello dei *ravaneti* si contrae aumentando la P^{H_2O} nei pori e innescando un processo di liquefazione (Ellen & Flemming, 1987; Iverson *et al.*, 1997). Inoltre la trasformazione dell'energia di volume traslazionale in energia di fluttuazione granulare (*granular temperature*) aumenta la fluidità della massa in movimento (Iverson *et al.*, 1997). L'effetto simultaneo di questi due meccanismi (aumento P^{H_2O} e fluttuazione granulare) può essere indicato come responsabile della trasformazione di una frana superficiale in un *debris flows* in un breve lasso di tempo e di spazio. Le condizioni che devono essere verificate in questo modello di innesco e mobilitazione sono la formazione di una superficie di rottura, generalmente causata dall'aumento di peso del mate-

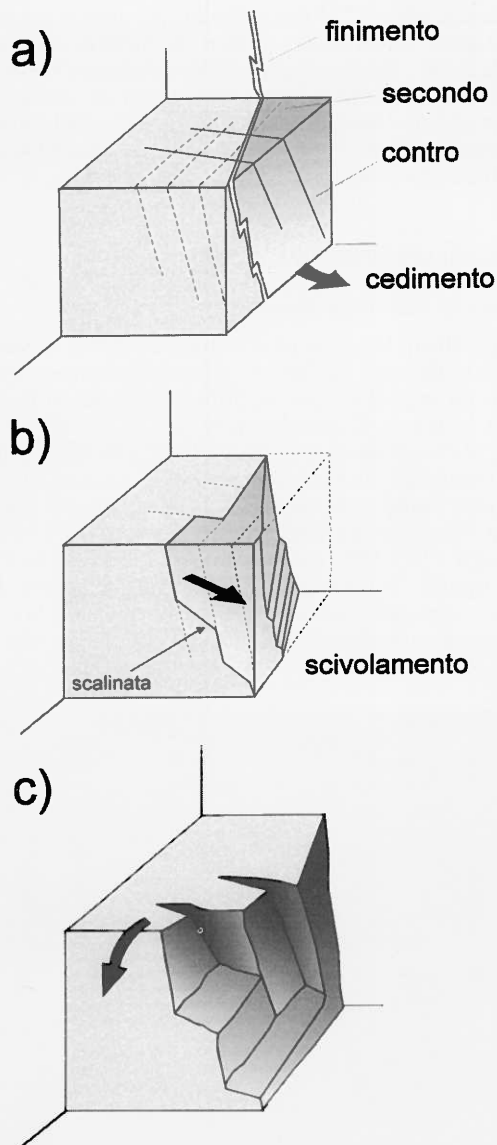


Fig. 6 - Evoluzione cinematica delle frane di Lorano e Canalgrande. a) rottura per trazione della base dei prismi esterni della bancata; b) scivolamento di cunei lungo le fratture al *contro* e al *secondo*; c) ribaltamento delle colonne più esterne.

riale saturo, e una dinamica di saturazione che porti la P^{H_2O} dei pori a superare lo stress normale verticale (peso unitario del suolo carico in acqua). Questo modello si applica bene ai *debris flows* che avvengono sui *ravaneti* apuani, come mostrato da recenti osservazioni geomorfologiche, supportate da caratterizzazioni geotecniche e sedimentologiche dei corpi detritici (Baroni *et al.*, 2000). Nei *ravaneti* studiati, l'assenza di falda acquifera e la presenza nella parte alta di uno strato a bassa permeabilità (*ravaneto* attivo) determina una saturazione del corpo detritico che procede dall'alto verso il basso.

Utilizzando i dati delle stazioni climatiche dell'A-



Fig. 7 - Lobo di accumulo di debris flow.

zienda Municipalizzata Igiene e Ambiente di Carrara (AMIA) è stato possibile ricostruire l'entità degli eventi pluviometrici che hanno innescato i *debris flows*.

Le registrazioni pluviometriche di seguito riportate (Fig. 8) sono relative ad eventi piovosi che hanno innescato *debris flows* che è stato possibile riconoscere sul terreno. Si sottolinea tuttavia che numerosi episodi di *debris flows* di minori dimensioni sono difficilmente associabili a dati pluviometrici in quanto vengono immediatamente rimossi dopo l'evento.

I dati esposti (Fig. 8) evidenziano una soglia estremamente bassa per l'attivazione di *debris flows* di medie dimensioni nei bacini di Carrara. La soglia di attivazione più bassa tra quelle riportate è relativa all'evento del 24/10/99 in cui un lobo di medie dimensioni si è fermato nelle vicinanze del paese di Miseglia (Fig. 8c). In occasione di quest'evento sono piovuti circa 60 mm in 5 ore con un massimo di soli 14 mm dalle 19 alle 20. Altri eventi sono caratterizzati da una maggiore intensità di pioggia in ristretti intervalli temporali, come avvenuto il 01/05/97 ed il 6/11/97. Durante l'evento del maggio 1997 (massima intensità = 33 mm/h) (Fig. 8b) si sono mobilizzate varie colate di medie dimensioni e un debris flow ha bloccato la strada di fondovalle nelle vicinanze del paese di Colonnata.

La zona di innesco dei *debris flows* che si sviluppano sui *ravaneti* è posta generalmente al bordo di superfici suborizzontali, corrispondenti a tagli stradali e piazzali di lavorazione (Fig. 9). Morfologicamente queste zone sono caratterizzate da una scarpata metrica-plurimettrica semicircolare, accompagnata da una fascia di fratture di trazione. Il movimento generalmente inizia con uno scivolamento planare e successivamente la massa in movimento perde velocemente coesione trasformandosi in *debris flow* (Fig. 10). Alla base della scarpata

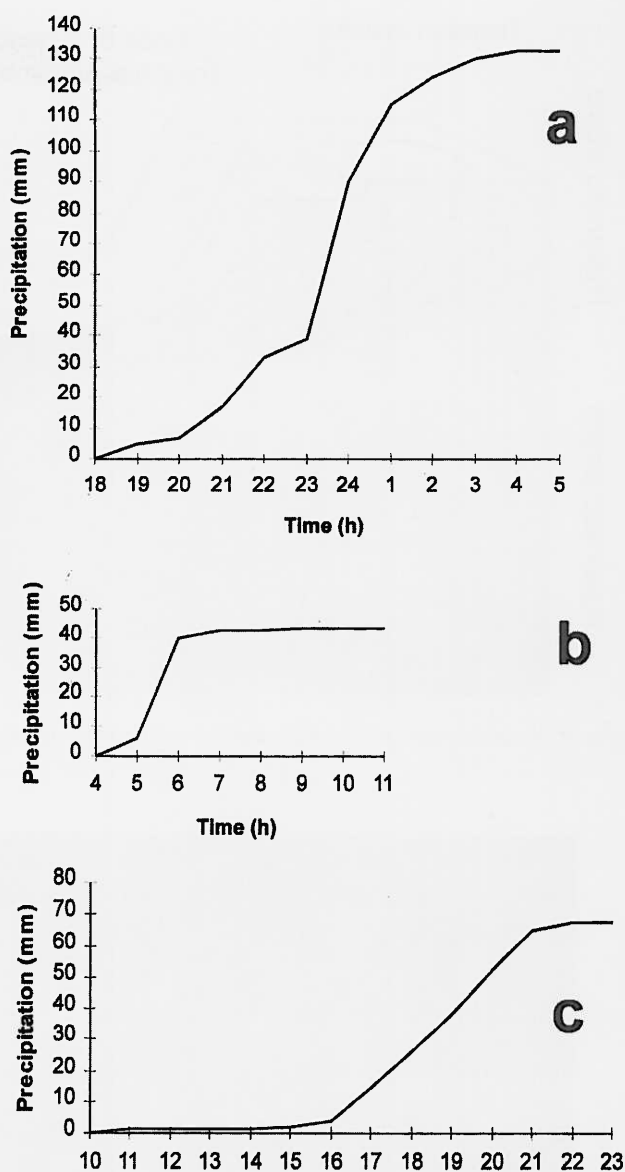


Fig. 8 - Registrazioni pluviometriche relative agli eventi di *debris flows* studiati. a) 06-07.11.97, Stazione meteorologica di Colonnata; b) 01.05.97, Stazione meteorologica di Colonnata; c) 24.10.99, Stazione meteorologica di Torano.

infatti si genera un canale a V, che corrisponde all'inizio della traccia di flusso. Nei bacini marmiferi apuani sono state osservate numerose scarpate, alcune visibilmente relitte, altre che sono in progressivo arretramento e allargamento e che alimentano frequenti *debris flows* con una serie di mobilitazioni retrogressive. Risulta molto interessante il fatto che questi processi di innesco si sviluppano quasi esclusivamente sugli strati superficiali dei *ravaneti* attivi e che si registrano solo pochi casi isolati nei *ravaneti* antichi (Fig. 10). Per quanto riguarda i lobi deposizionali sono state osservate varie forme, da appiattite e semicircolari a rignonfie ed allungate, con volumi di materiali compre-

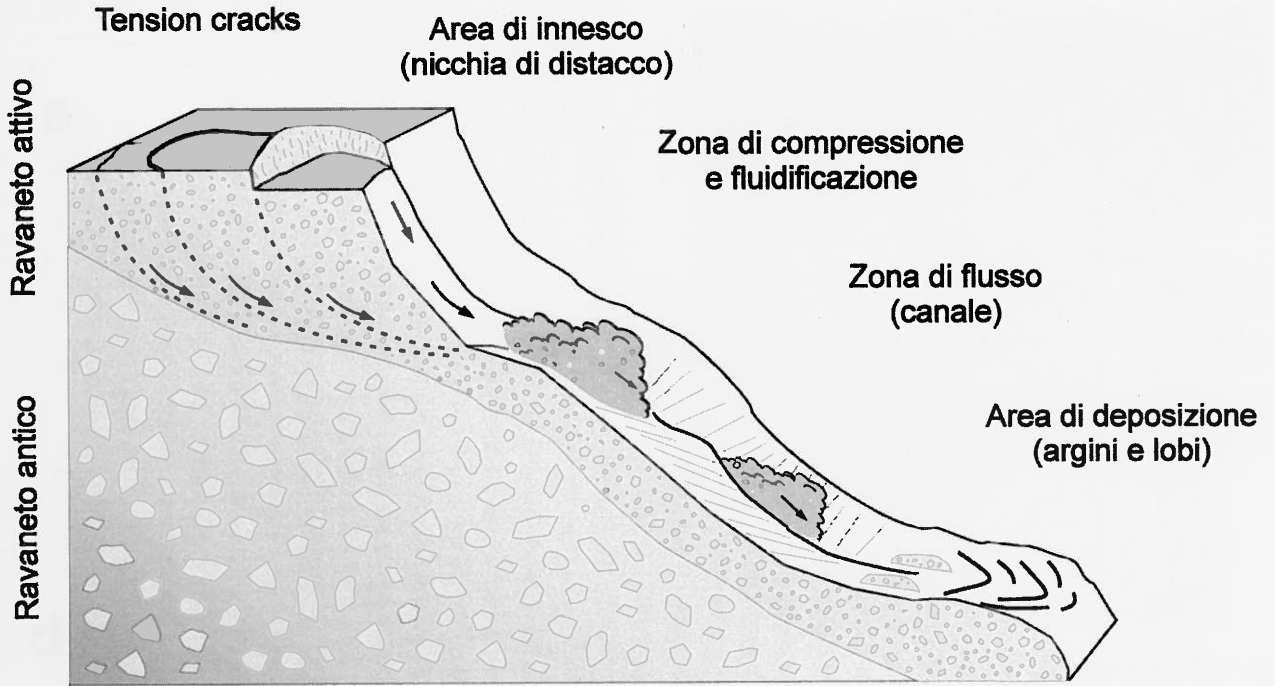


Fig. 9 - Rappresentazione schematica degli eventi di *debris flows* nei bacini marmiferi di Carrara.

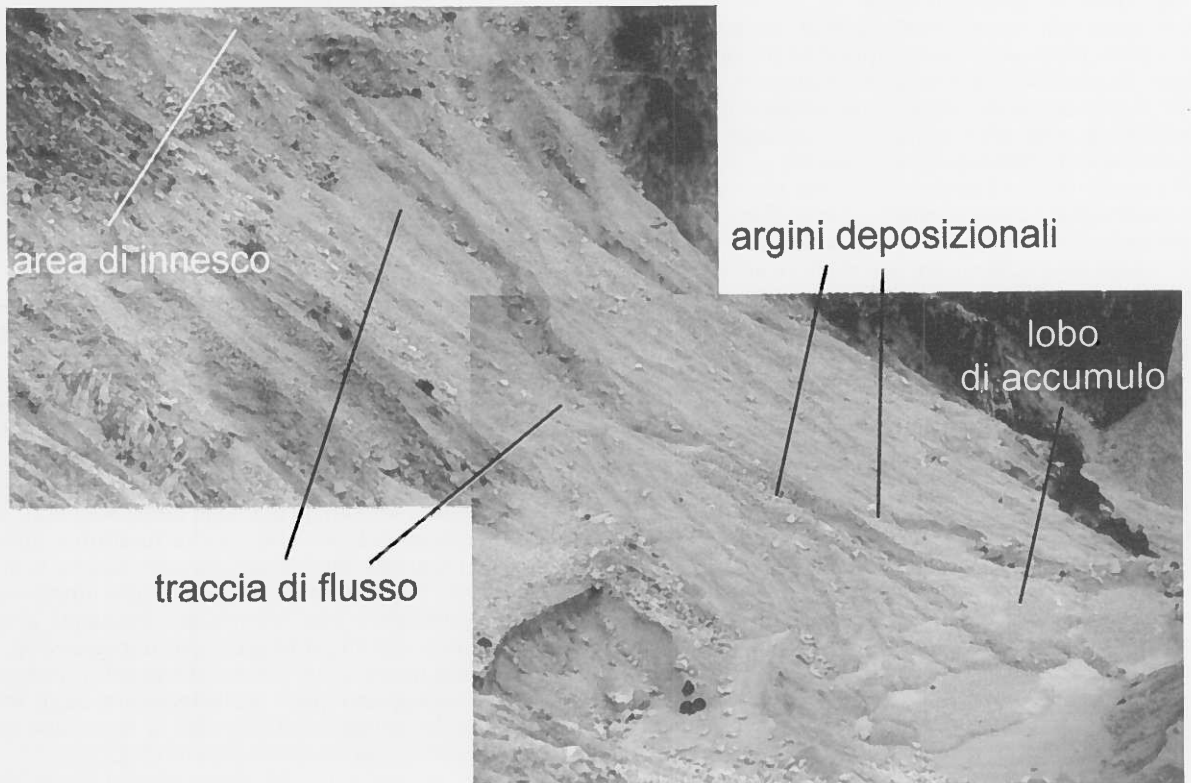


Fig. 10 - Innesco, zona di flusso e di accumulo di *debris flows* su ravaneto attivo.

si fra i 15 m³ e i 100 m³. Da un punto di vista sedimentologico i depositi sono spesso a supporto di matrice e solo nei lobi più rigonfi e voluminosi a supporto clastico. Il *fabric* di molti depositi è ben sviluppato con orientazione dei clasti che mostra delle chiare relazioni con la direzione delle linee di flusso principali e secondarie delle fase finale del movimento (Baroni *et al.*, 2000).

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Alla luce dei dati esposti risulta evidente come l'intensa attività estrattiva abbia determinato numerose situazioni di dissesto in atto e potenziale, comportando elevati livelli di rischio per le persone addette alle operazioni di escavazione e procurando ingenti danni economici alle industrie estrattive.

Nei bacini marmiferi apuani, il principale fattore predisponente le frane analizzate è determinato dallo sfruttamento intensivo dei giacimenti marmiferi che ha comportato la formazione di versanti residui sub verticali fortemente fratturati, rappresentanti situazioni di rischio per il personale di cava e per l'impianto di escavazione.

Per determinare la stabilità delle tecchie esistono vari metodi tra i quali è utile ricordare: il metodo statistico-probabilistico di Hoek & Bray (1981), il criterio di resistenza a rottura di Hoek & Brown (1980), la classificazione RMR di Beniawski (1989). Tuttavia, questi metodi possono essere poco attendibili in presenza di alcune variabili difficilmente determinabili, come ad esempio l'apertura di una nuovo giunto determinata dalle mutate condizioni dell'ammasso roccioso. Questa possibilità si verifica in presenza di tecchie molto alte, come accaduto nel caso della frana di Gioia e segnalato nelle cave di "Rosa del Portogallo" (Dinis De Gama, 1989).

Nel contesto estrattivo apuano, ancora poco si conosce sulle reali condizioni strutturali dell'ammasso roccioso interessato dalle lavorazioni e sul suo stato tensionale, (con s_1 verticale, pari al peso della colonna soprastante, ma con valori solo ipotetici per σ_2 e σ_3). Applicando il criterio di Coulomb e considerando lo sforzo orizzontale annullato ($\sigma_2 = 0$), si può individuare l'altezza limite ($h = 2\cos\phi/Y(1-\sin\phi)$) tale da non innescare i pericolosi fenomeni di fratturazione alla base delle tecchie. Considerando i valori medi del marmo di Carrara (resistenza a compressione uniassiale 130 MPa, modulo elastico tangente 7.500 MPa) si calcola che con altezze di parete di 35-43 m il fattore di sicurezza F risulta pari ad 1 e che, con tecchie di 20-33 m $F = 1.3$. Risulta quindi auspicabile, per non andare incontro a problemi di stabilità, spezzare i fronti con una opportuna gradonatura che modelli il versante residuo ad esempio con inclinazione media di 70-75° (possibile rapporto fra alzate e pedate di 4 a 1).

Relativamente ai fenomeni di *debris flows*, in circa il 90% dei casi riscontrati si è trattato di colate di medie dimensioni (circa 100 m³ di materiale), ma in alcuni casi, limitatamente al Bacino di Colonnata e di Torano sono state riconosciute colate che hanno coinvolto 300-

400 m³ di detrito danneggiando ripetutamente le strade di fondovalle.

I dati pluviometrici mettono in evidenza una soglia estremamente bassa per l'attivazione di *debris flows* nei bacini di Carrara, situazioni come quelle commentate in Figura 8 sono ricorrenti nell'area in esame e nella vicina Versilia (Rapetti & Rapetti, 1997; D'Amato Avanzi, 1999).

Negli ultimi anni un numero crescente di *ravaneti* ha raggiunto condizioni di stabilità critica, anche in situazioni di precipitazioni non estreme. È possibile ritenere che l'aumento delle frequenza con cui i *debris flows* avvengono nei bacini marmiferi di Carrara possa essere attribuita all'alta concentrazione di frazioni fini (introdotte dalle nuove tecniche di segazione e soprattutto di recupero degli scarti) che favorisce la saturazione del detrito.

Considerando la frequenza degli eventi e la relativa antropizzazione delle aree contigue alle zone estrattive, possiamo considerare i *debris flows* come un fenomeno rischioso non solo per gli addetti lavori ma anche per le infrastrutture di fondovalle ed alcune zone abitate nell'area estrattiva.

Le problematiche riscontrate nell'area estrattiva di Carrara non devono essere considerate come legate ad un caso particolare ma evidenziano un diffuso problema di rischio in quanto, situazioni come quelle analizzate, sono potenzialmente presenti in molte aree estrattive.

BIBLIOGRAFIA

- Baroni C., Bruschi G. & Ribolini A., 2000. Human-induced hazardous debris flows in Carrara Marble Basins (Tuscany, Italy). *Earth Surf. Proc. Land.*, 25: 93-103.
- Beniawski Z.T., 1989. *Engineering rock mass classification*. John Wiley & Sons, New York.
- Carmignani L., Giglia G. & Kligfield R., 1980. Nuovi dati sulla zona di taglio ensialica delle Alpi Apuane. *Mem. Soc. Geol. It.*, 21: 93-100.
- Carmignani L. & Kligfield R., 1990. The transition from compression to extension in mountain belts: evidence from the Northern Apennines Core Complex. *Tectonics*, 9: 1275-1303.
- Carmignani L., Fantozzi P.L., Giglia G. & Meccheri M., 1993. Pieghe associate alla distensione duttile del Complesso Metamorfo Apuano. *Mem. Soc. Geol. It.*, 49: 99-124.
- Cerrina Ferroni A., Plesi G., Leoni L. & Martinelli P., 1983. Contributo alla conoscenza dei processi metamorfici di grado molto basso (anchimetamorfismo) a carico della Falda Toscana nell'area di ricoprimento apuano. *Boll. Soc. Geol. It.*, 102: 269-280.
- D'Amato Avanzi G., 1999. Landslides triggered by the intense rainstorm of June 19, 1996 in southern Apuan Alps (Tuscany, Italy). *Trans. Japan. Geomorph. Union*, 20-3: 203-218.
- D'Amato Avanzi G. & Verani M., 1998. Le valenze ambientali ed economiche dei ravaneti delle Alpi Apuane (Toscana, Italia). *Mem. Soc. Geol. It.*, 53: 489-501.
- Dinis de Gama, 1989. Analysis of marble fractures induced by stress concentrations at quarries, *Atti Congr. Int. Geoingegneria*, Torino, 1989: 805-810.
- Ellen S.D. & Fleming R.W., 1987. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay Region, California. In: Costa J.E. & Wieczorek, G.F. (Ed.). *Debris flows/Avalanches: Processes, Recognition, and Mitigation*. *Rev. Eng. Geol.*, VII, Geol. Soc. Am., Boulder, 31-40.
- Hoek E. & Brown E. T., 1980. *Underground excavations in rock*, Inst. Min. Metall. London.

- Hoek E. & Bray J.W., 1981. Rock slope engineering, 3rd edition, IMM, London, pp.1-358.
- Iverson R. M., Reid M. E. & Lahusen R. G., 1997. Debris-flow mobilization from landslides. *Ann. Rev. Earth Planet. Sciences*, 25, 85-138.
- Ladany B. & Archambault G., 1972. Evaluation de la résistance au cisaillement d'un massif rocheux fragment, 24th Int. Geological Congress, Montreal, pp.249-260.
- Rapetti C. & Rapetti F., 1997. L'evento pluviometrico eccezionale del 19 Giugno 1996 in Alta Versilia (Toscana) nel quadro delle precipitazioni delle Alpi Apuane. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, 103: 143-159.
- Rapetti F. & Vittorini S., 1991. Studio di serie pluviometriche secolari in Toscana. In: Pinna M. (Ed). *Le variazioni recenti del clima (1800-1990) e le prospettive per il XXI secolo*. *Mem. Soc. Geogr. It.*, 46: 457-478.
- Rapetti F. & Vittorini S. 1994. Le precipitazioni in Toscana: osservazioni sui casi estremi, *Riv. Geogr. It.*, 101: 47-76.