

Il trasporto in massa del Rio Frejus Evento del 6 agosto 2004 (Bardonecchia)

4.3

4.3.1 Introduzione

Nell'ambito della valutazione dell'incertezza legata ai metodi di previsione, risulta particolarmente significativo lo studio dei processi torrentizi che caratterizzano i piccoli bacini montani. In tali contesti, infatti, l'estrema variabilità delle caratteristiche geologico-geomorfologiche e meteo-pluviometriche rende difficile, e talvolta impossibile, impiegare con successo modelli previsionali del tipo causa-effetto. L'evento di colata che ha interessato il bacino del Rio Frejus nel Comune di Bardonecchia (TO) il 6 agosto 2004 riassume in modo esemplificativo la situazione sopra accennata: a fronte di precipitazioni registrate di modesta entità si sono prodotti effetti dannosi che hanno destato particolare preoccupazione nella popolazione (**figura 4.3.1**).

In seguito ad una prima fase di analisi realizzata immediatamente dopo l'evento e finalizzata alla redazione del relativo rapporto (Arpa Piemonte, 2004b) si sono resi necessari ulteriori approfondimenti al fine di caratterizzare le condizioni predisponenti ed innescanti i processi torrentizi del Rio Frejus.

Nel presente lavoro sono sintetizzati i risultati di un approccio multidisciplinare che ha permesso di analizzare il ruolo svolto dai vari fattori nell'evoluzione dei processi di colata. Lo studio è stato caratterizzato da analisi pluviometrico-idrologiche e geologico-geomorfologiche, condotte in sinergia tra i tecnici del Centro regionale per le ricerche territoriali e geologiche e dell'Area delle attività regionali per l'indirizzo ed il coordinamento in materia di previsione e monitoraggio ambientale di Arpa Piemonte, utilizzando dati e metodologie derivanti anche dai seguenti progetti:

- Progetto nazionale CARG (Cartografia Geologica d'Italia alla scala 1:50.000);
- Progetto nazionale IFFI (*Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia*);
- Progetto europeo per la valutazione di pericolosità e rischio dei fenomeni naturali e predisposizione di piani comunali di Protezione Civile (Programma Interreg IIC);
- Progetto europeo *CatchRisk – Mitigazione dei rischi idrogeologici nei bacini alpini* (Programma Interreg IIIB – Spazio Alpino).

In conclusione vengono proposte una serie di considerazioni sulle condizioni generali di pericolosità del bacino ed alcuni spunti per eventuali sviluppi futuri nell'ambito della previsione dei processi trattati.

Figura 4.3.2
Il bacino del Rio Frejus



Figura 4.3.1
Ripresa da elicottero del Rio Frejus (deflusso verso sinistra della fotografia) in conoide a Bardonecchia, il giorno successivo l'evento di colata del 06/08/04. Sono evidenti le tracce della tracimazione della colata in destra idrografica (depositi grigio scuro sulla strada che costeggia il canale, v. anche figura 4.3.4) in prossimità del ponte di via Europa (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)

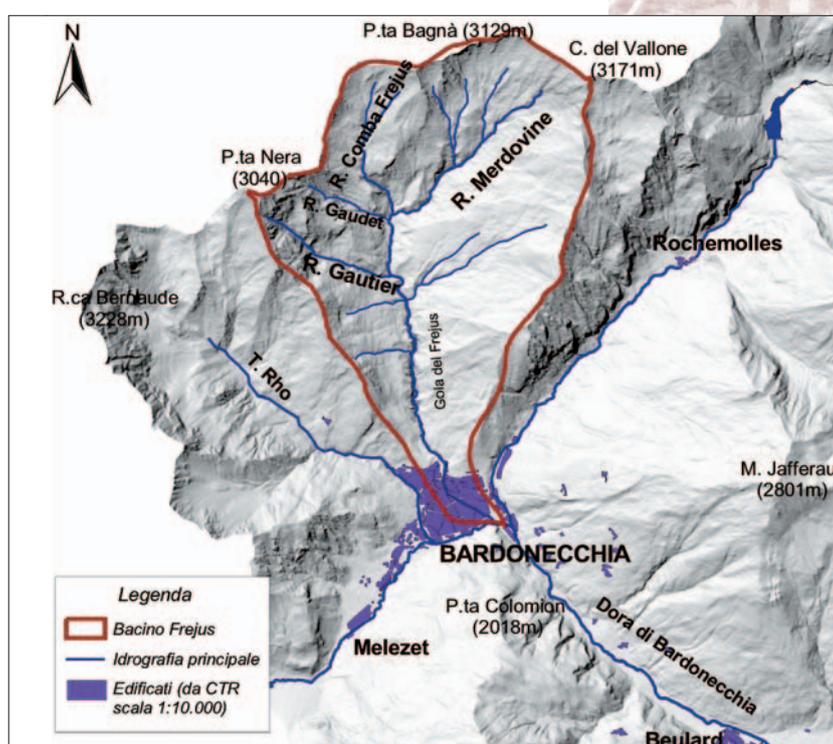


Figura 4.3.3

Ripresa verso monte del Rio Frejus dal ponte di via Europa (fase decrescente della colata del 6 agosto 2004) in cui sono ben evidenti le tracce della tracimazione (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)

**Figura 4.3.4**

Sponda destra del Rio Frejus, immediatamente a monte del ponte di via Europa. Depositi limoso-sabbiosi di colore grigio scuro, abbandonati dalla colata nel punto di tracimazione (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)



4.3.2

Il fenomeno di trasporto in massa del Rio Frejus del 6 agosto 2004

Il Rio Frejus, tributario di sinistra della Dora di Valle Stretta (comune di Bardonecchia), è stato interessato tra le 20:00 e le 20:30 UTC circa di venerdì 6 agosto 2004 da un processo di colata di fango e detriti che, innescatosi principalmente nella zona di testata dei bacini del Rio Merdovine e del Rio Comba Gautier, ha raggiunto l'abitato di Bardonecchia (**figura 4.3.2**).

Il passaggio della colata nell'area abitata ha provocato lievi danni alla viabilità ed alle opere, costituendo fonte di preoccupazione per la popolazione che, in considerazione del periodo turistico, era particolarmente numerosa. La colata ha colmato in alcuni tratti la sezione libera del canale, le cui sponde ed il fondo sono completamen-

Figura 4.3.5

Ripresa verso valle del Rio Frejus nel tratto mediano del conoide, durante la fase decrescente della piena. Si notino le tracce di color grigio scuro, legate a spruzzi di fango prodotti dal moto turbolento della colata che hanno superato la sponda destra e raggiunto l'adiacente via Einaudi (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)



te artificiali, tracimando in più punti lungo la sponda destra, soprattutto nel settore distale (**figura 4.3.3**).

Le tracimazioni più importanti si sono verificate in prossimità dei ponti di via Europa e di via Torino con conseguente deposizione di alcune decine di metri cubi di materiale detritico, di granulometria prevalentemente limoso-sabbiosa e di colore grigio scuro, nelle aree immediatamente adiacenti il canale (**figura 4.3.4**). In prossimità del ponte di via Medail, invece, la colata ha minacciato di tracimare in sponda sinistra, in corrispondenza del condominio Le Pleiadi.

Depositi dello stesso tipo di quelli sopra descritti, ma in quantità decisamente inferiori, sono stati osservati esternamente al canale lungo tutto il tratto in conoide: tali depositi sono stati prodotti da “spruzzate” legate al moto turbolento della colata che in alcuni casi hanno superato di circa 2 m il pelo libero della massa fluente (**figura 4.3.5**). La colata ha inoltre sormontato il ponte di via Torino, interrompendone l’agibilità per più di un’ora. Al termine dell’evento, tale attraversamento risultava praticamente occluso dai depositi ghiaiosi grossolani (clasti di circa 10-20 cm – **figura 4.3.6**) con matrice limoso-sabbiosa di colore grigio e anche l’attraversamento a monte (via Europa) risultava avere una luce assai ridotta a causa dei depositi presenti. Ulteriori danni localizzati sono stati riscontrati lungo il canale nel settore apicale del conoide, rappresentati dall’asportazione di alcuni blocchi delle scogliere di difesa spondale e dalla sottoescavazione della base della briglia immediatamente a monte dell’apice.

In generale, in tutti i corsi d’acqua interessati dall’evento, il passaggio della colata ha lasciato sulle sponde tracce evidenti costituite essenzialmente da uno strato di limo sabbioso grigio, di spessore variabile, osservabile in più punti anche lungo l’alveo della Dora di Bardonecchia a valle dell’abitato. A monte di Bardonecchia, invece, la propagazione della colata ha prodotto localizzate erosioni delle sponde e modesti accumuli detritici, soprattutto in corrispondenza delle piazze di deposito artificiali create a monte delle briglie; localmente sono stati osservati, lungo le sponde e fuori alveo, lembi allungati di depositi prevalentemente ghiaiosi, talvolta ricoperti con matrice limoso-sabbiosa.

Alla testata del bacino del Rio Frejus sono state osservate numerose attivazioni di colate detritiche (**figura 4.3.7**), presumibilmente collegate all’evento del 6 agosto 2004, le più importanti delle quali sono state rilevate lungo le aste del Rio Merdovine e del Rio Comba Gautier. In particolare, dalle osservazioni dei depositi è emerso che il contributo proveniente da quest’ultimo ha fornito un decisivo incremento al trasporto solido lungo il Rio Frejus. La natura dei depositi della colata in prossimità della confluenza tra Rio Comba Gautier e Rio



Figura 4.3.6
Ripresa del 10 agosto 2004 a valle del ponte di via Torino sul Rio Frejus. Sono osservabili le ostruzioni delle luci dell’attraversamento da parte dei depositi della colata del 6 agosto 2004 e le tracce del passaggio della colata al di sopra dell’opera



Figura 4.3.7
Colate detritiche attivate in corrispondenza di alcuni canali alla testata del bacino del Rio Frejus



Figura 4.3.8
Ripresa verso monte della confluenza tra il Rio Comba Gautier (a sinistra) e il Rio Frejus (a destra), dove è possibile confrontare le differenti caratteristiche dei depositi nei due corsi d’acqua

Frejus (**figura 4.3.8**) è risultata sostanzialmente differente nelle due aste: nell’alveo del Rio Comba Gautier sono stati osservati abbondanti ghiaie eterogenee ed alcuni blocchi di dimensioni maggiori (raramente oltre un metro cubo) con matrice prevalentemente sabbiosa di colore nero e di aspetto scaglioso; i depositi presenti nell’alveo del Rio Frejus presentano una maggiore quantità di blocchi di dimensioni oltre un metro cubo, immersi in una matrice limoso-sabbiosa di colore grigio.

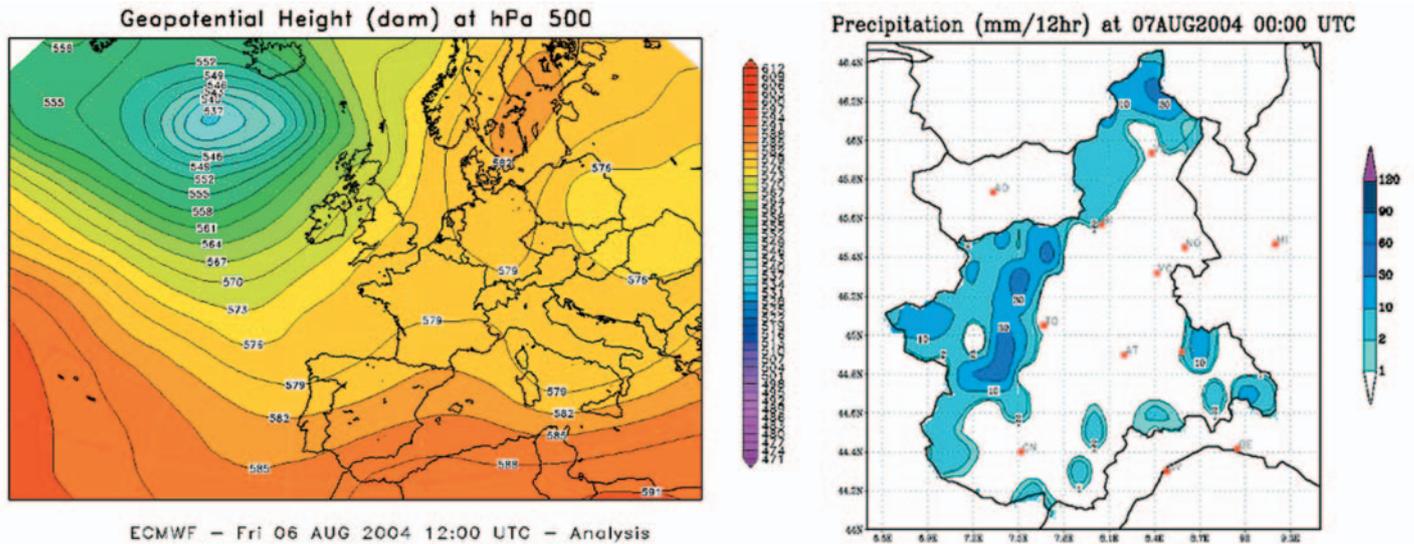


Figura 4.3.9
Analisi dell'altezza di geopotenziale a 500 hPa delle ore 12:00 UTC del 6 agosto; mappa delle precipitazioni cumulate sulle 12 ore, dalle 12:00 UTC del 6 alle 00:00 UTC del 7 agosto

4.3.3 Analisi pluviometrica

Inquadramento meteorologico dell'evento pluviometrico del 6 agosto 2004

Dal 25 luglio al 1 agosto 2004 un promontorio anticiclonico di origine africana ha interessato il bacino centro-occidentale del Mediterraneo determinando condizioni di tempo stabile e soleggiato sul Piemonte con alti valori dello zero termico e delle temperature. La configurazione meteorologica ha iniziato a cambiare dal 2 agosto. Un primo afflusso di aria fredda in quota e l'apporto di umidità hanno determinato nel pomeriggio lo sviluppo di fenomeni temporaleschi, localmente di forte intensità sul Piemonte occidentale. Il giorno 3 agosto persisteva il flusso moderatamente umido da ovest-sud-ovest sul Piemonte e si assisteva al nuovo sviluppo di temporali nelle ore pomeridiane, con maggiori estensione areale ed intensità rispetto al giorno precedente. Un mutamento più radicale avveniva il giorno successivo con le correnti che si disponevano dai quadranti meridionali convogliando umidità dal mare e con un afflusso di aria fredda instabile in quota. Nella seconda parte della giornata del 4 e nella mattinata del 5 i fenomeni temporaleschi hanno interessato sostanzialmente tutta la regione, rag-

giungendo picchi localmente molto forti. Il giorno 5 il nucleo della depressione si spostava verso l'Italia centrale e nella serata si attenuavano le condizioni di instabilità sul Piemonte. Nella mattinata del 6 agosto si assisteva ad una rimonta dell'anticiclone africano verso la Francia (figura 4.3.9) con un conseguente temporaneo miglioramento delle condizioni atmosferiche sul Piemonte.

L'atmosfera si manteneva comunque relativamente umida: entrambi i radiosondaggi osservati a Milano Linate ed a Cuneo Levaldigi alle ore 12:00 UTC (quelli disponibili più prossimi all'area in esame) denotavano un'umidità relativa prossima al 75% per uno strato di circa 5'000 m al di sopra della superficie terrestre. Il rasserenamento diurno enfatizzava le condizioni favorevoli alla convezione tipiche del periodo estivo. In presenza di tale situazione termodinamica, nel tardo pomeriggio un nuovo afflusso di aria fredda in quota causava lo sviluppo di temporali sulle zone montane e pedemontane di tutta la regione. Le registrazioni rilevate dai pluviometri della rete pluviometrica di Arpa Piemonte, indicavano il raggiungimento di valori di picco localmente forti sul Toce e molto forti nelle valli di Lanzo; in Val Susa i valori rilevati sono stati al più moderati.

Figura 4.3.10
I letogrammi registrati dalle stazioni Camini Frejus e Prerichard per il periodo 1-7 agosto 2004

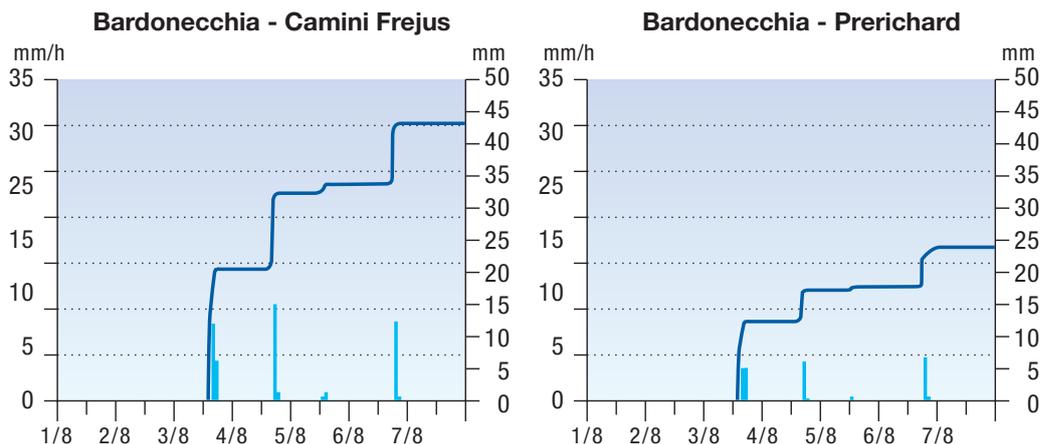


TABELLA 4.3.1 MASSIME ALTEZZE DI PRECIPITAZIONE PER DIFFERENTI DURATE REGISTRATE NEI GIORNI 3 E 6 AGOSTO 2004

Stazione	Massima altezza di pioggia [mm]									
	3 agosto 2004					6 agosto 2004				
	10 min.	30 min.	1 ora	3 ore	6 ore	10 min.	30 min.	1 ora	3 ore	6 ore
Camini Frejus	5.8	10.8	14.0	20.8	20.8	3.6	7.2	8.8	9.4	9.4
Prerichard	2.8	5.0	6.2	12.4	12.4	2.2	4.4	4.8	5.4	6.2

L'evento temporalesco del 6 agosto 2004 si è inserito all'interno della situazione meteorologica che ha caratterizzato il passaggio dalle condizioni di tempo stabile ed anticiclonico dell'ultima settimana di luglio 2004 al tempo instabile, perturbato e con frequenti episodi di precipitazione a carattere temporalesco della prima metà del mese di agosto 2004. Il fattore rilevante dell'evento è stato l'afflusso di aria fredda instabile in quota (circa 1.5 °C a 500 hPa, valore apparentemente basso ma in linea con quelli riscontrati in eventi analoghi) che ha causato la saturazione e la condensazione della colonna di aria umida esistente fino a 5'000 m, con lo sviluppo di temporali la cui intensità è stata enfatizzata dalla convezione presente.

Il vento era disposto a tutte le quote dai quadranti settentrionali e si è mantenuto su valori prevalentemente deboli. L'identificazione della direzione del vento è stata utile per determinare la traiettoria delle celle temporalesche; in particolare quella responsabile delle precipitazioni in Val Susa si era originata in Francia.

Analisi pluviometrica dell'evento del 6 agosto 2004

L'analisi pluviometrica si è basata sull'elaborazione di piogge orarie e sub-orarie registrate nel corso dell'evento e di piogge cumulate su più giorni precedenti l'innesco del fenomeno. Si sono evidenziate in corso d'evento piogge di durata inferiore all'ora, di intensità moderata e precipitazioni discontinue nell'arco di alcuni giorni precedenti l'evento, caratterizzate da valori deboli o moderati. I dati pluviometrici utilizzati sono stati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio Regionale Automatica di Arpa Piemonte installate nella zona: Camini Frejus (Bardonecchia) sita in prossimità della testata del Rio Frejus e Prerichard (Bardonecchia) sita in prossimità della confluenza della Dora di Valle Stretta con la Dora di Bardonecchia.

Essendosi innescato il fenomeno in testata del Rio Frejus, in prossimità dello spartiacque coincidente con il confine italo-francese, si sono ricercati i dati registrati dalle stazioni pluviometriche della rete di monitoraggio di *Météo France* per integrare ed estendere le osservazioni della rete piemontese relative all'evento. La stazione di Frejus-Modane (1'228 m slm) in Savoie (situata a circa 6 km a NW dalla testata del Rio Frejus) è l'unica installata in posizione significativa rispetto alla zona in esame (**figura 4.3.11**).

Nella **figura 4.3.10** si riportano gli ietogrammi registrati dalle stazioni Camini Frejus e Prerichard per il periodo 1-7 agosto 2004; i valori di pioggia cumulata misurati alle due stazioni risultano essere rispettivamente 43.8 mm e 23.8 mm, di cui 9.4 mm e 6.2 mm caduti il giorno 6 agosto. In concomitanza con l'innesco del fenomeno sono stati misurati 8.8 mm a Camini Frejus (17:30-18:20 UTC) e 4.6 mm a Prerichard (17:30-18:10 UTC), mentre i valori di precipitazione oraria misurati a Frejus-Modane presentano un massimo pari a 1.2 mm registrato dalle 18:00 alle 19:00 UTC del 6 agosto, contribuendo al totale giornaliero di 1.4 mm. La stazione risulta quindi non essere stata interessata dal medesimo rovescio registrato da Camini Frejus e da Prerichard.

Nella **tabella 4.3.1** si riportano le massime altezze di precipitazione, calcolate su finestra mobile, per le differenti durate (10 e 30 minuti, 1, 3, 6 ore) registrate i giorni 3 e 6 agosto 2004; si evidenzia come le maggiori altezze di pioggia per l'intervallo di tempo considerato siano relative al giorno 3 agosto.

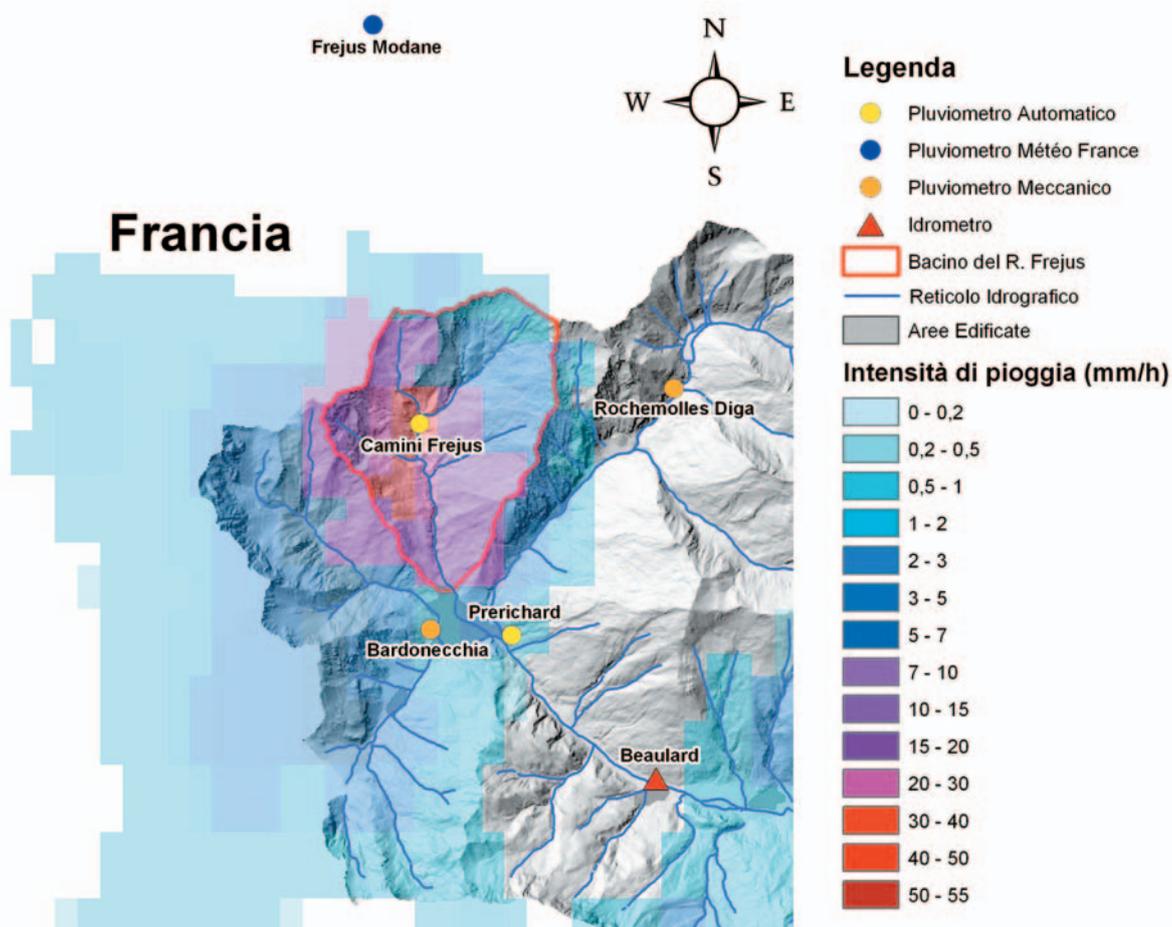
Il sistema di Allertamento Idrogeologico ed Idrraulico regionale, utilizza in fase di previsione valori di soglia definiti per ciascuna delle 11 aree di allertamento, per durate da 6 a 24 ore, ed in fase di monitoraggio valori di soglia relative a tutte le stazioni pluviometriche appartenenti alla Rete di monitoraggio, per durate da 1 a 24 ore; i valori sono differenti in funzione dello stato idrologico ovvero del grado di saturazione dei suoli (secco, umido). Per entrambi i casi le soglie si riferiscono ai livelli di criticità moderata (2) ed elevata (3).

Nella **tabella 4.3.2** sono indicati i valori delle soglie pluviometriche espressi in millimetri, per uno stato idrologico che è risultato essere secco, relative alle stazioni di Camini Frejus e dell'area Alta Dora Riparia-Po, all'interno della quale ricade il bacino in esame.

TABELLA 4.3.2 SOGLIE PLUVIOMETRICHE UTILIZZATE PER IL MONITORAGGIO E PER LA PREVISIONE

			Livello di criticità	Soglia [mm di precipitazione]		
				1 ora	3 ore	6 ore
Area di allertamento	Alta Dora Riparia Po	Soglie verificate in fase di previsione	2	-	-	47.8
			3	-	-	65.6
Stazione	Camini Frejus	Soglie verificate in fase di monitoraggio	2	14	23	31.0
			3	20	30	40.0

Figura 4.3.11
 Mappa di intensità
 di pioggia osservata
 alle 17:30 UTC
 (6 agosto 2004)
 dal radar Meteorologico
 di Bric della Croce
 e stazioni pluviometriche
 ed idrografiche utilizzate
 per il bacino del Rio Frejus
 con chiusura all'apice
 del conoide



Dal confronto di queste con i massimi di precipitazione registrati, si evidenzia per il giorno 3 agosto il raggiungimento della soglia corrispondente al livello di criticità 2 e durata 1 ora per la stazione di Camini Frejus.

Come noto, gli eventi pluviometrici caratterizzati da precipitazioni brevi ed intense sono in genere estremamente localizzati, per cui risulta importante una valutazione combinata dei dati registrati da reti meteo-pluviometriche e sistemi radar-meteorologici. Tale approccio rende in linea di massima più precisa la valutazione degli eventi pluviometrici su ambiti territoriali caratterizzati da buona visibilità radar, sia per quanto riguarda l'individuazione dei fenomeni che la stima della loro intensità, mentre in ambiti montani, come quello trattato, le immagini radar possono essere utilizzate prevalentemente per la valutazione della distribuzione spaziale dei campi di precipitazione. In occasione dell'evento del 6 agosto, il radar del Bric della Croce, situato sulla collina torinese, ha individuato la cella temporalesca che si è formata sulla zona interessata, evidenziando il nucleo di maggior intensità localizzato proprio alla testata del bacino del Rio Frejus ed in corrispondenza del pluviometro di Camini Frejus (figura 4.3.11).

Analisi del regime pluviometrico caratteristico dell'area in studio

L'analisi è stata svolta utilizzando i dati di pioggia registrati dalle stazioni meccaniche di Bardonecchia e Rochemolles Diga (figura 4.3.11) dell'ex Ufficio Idrografico del Po, in grado di fornire una serie storica di dati sufficientemente lunga, dal 1913 al 1986. Si è svolto un confronto tra i dati osservati nel periodo in esame ed i massimi valori registrati dalle stazioni storiche (tabella 4.3.3), successivamente, ricorrendo ai metodi di regionalizzazione statistica degli estremi idrologici, si è calcolato il tempo di ritorno caratteristico delle precipitazioni di interesse. Le serie storiche utilizzate nel presente studio costituiscono un campione significativo per le durate da 1 a 6 ore (circa 40 valori), mentre per la durata di 10 minuti si dispone di un numero di dati non sufficiente per le elaborazioni statistiche.

Confrontando i dati di massima altezza di pioggia per le differenti durate con i dati storici, si nota che per la durata di 10 minuti il valore massimo (5.8 mm) del pluviometro di Camini Frejus registrato il giorno 3 agosto, è il terzo più alto dopo gli 8 mm del giugno 1952 e i 7.4 mm del luglio 1964, men-

TABELLA 4.3.3 MASSIMI STORICI DI PIOGGIA PER DURATE 10 MINUTI, 1, 3, 6 ORE. PERIODO 1913 - 1986

Stazione	10 min		1 ora		3 ore		6 ore	
	mm	data	mm	data	mm	data	mm	data
Rochemolles diga	8.0	12/6/1952	29	05/9/1942	43	05/8/1985	53	26/9/1947
Bardonecchia	8.2	14/8/1971	23	10/7/1970	35	25/9/1946	57	25/9/1946

TABELLA 4.3.4 TEMPI DI RITORNO CALCOLATI UTILIZZANDO DIFFERENTI METODI PER LA STAZIONE DI CAMINI FREJUS RELATIVI ALLE PRECIPITAZIONI DEL 3 E 6 AGOSTO 2004 PER LE DURATE 1, 3, 6 ORE

Metodi statistici	Tempi di ritorno [anni]					
	3 agosto 2004			6 agosto 2004		
	1 h	3 h	6 h	1 h	3 h	6 h
Gumbel (QR)	3	2	<2	<2	<2	<2
Log-normale (QR)	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Gumbel (IS)	2	2	<2	<2	<2	<2
Log-normale (IS)	3	2	<2	<2	<2	<2
VAPI	3	2	<2	<2	<2	<2
Atlante delle Piogge Intese	5	4	2	<2	<2	<2
RAP	8	3	<2	<2	<2	<2

tre per le durate maggiori i valori sono stati più volte superati negli ultimi anni.

Le massime altezze di precipitazione registrate il giorno 6 agosto per le durate considerate, risultano essere sempre inferiori ai dati storici. Sono quindi stati calcolati i valori dei tempi di ritorno (il numero medio di anni in cui la precipitazione di una certa durata e intensità è raggiunta o superata almeno una volta) per le massime precipitazioni registrate tra l'1 ed il 7 agosto 2004 per durate di 1, 3, 6 ore con diversi metodi. In questo caso non è possibile valutare il tempo di ritorno della precipitazione relativa alla brevissima durata di 10 minuti in quanto non sono disponibili serie storiche sufficientemente lunghe. Il calcolo è stato svolto con i metodi VAPI GNDCl (De Michele & Rosso, 1999), *Atlante delle Piogge Intense* (CIMA, 2001) e RAP *Rainfall Analysis Package* (Burlando *et al.*, 1997) e con le distribuzioni di probabilità Gumbel e Log-normale utilizzando l'invarianza di scala (IS) e i quantili regolarizzati (QR). Il dettaglio dei valori dei tempi di ritorno per la stazione di Camini Frejus è riportato nella **tabella 4.3.4**.

Per la pioggia registrata da entrambe le stazioni il giorno 6 agosto i tempi di ritorno calcolati risultano sempre inferiori a 2 anni per tutte le aggregazioni; medesimi risultati sono stati ottenuti per la pioggia registrata il 3 agosto dalla stazione di Perichard, mentre per Camini Frejus i tempi di ritorno risultano leggermente superiori a 2 anni per l'aggregazione di 1 ora. In particolare VAPI, *Atlante delle Piogge Intense* e RAP forniscono tempi di ritorno più alti: rispettivamente 3, 5 e 8 anni per la pioggia di 1 ora. La causa di ciò è da ricercare nel modello di distribuzione probabilistica che sta alla base del modello adottato, nel numero di stazioni utilizzate e nella loro distribuzione sul territorio. Il Progetto VAPI ha un database di dati appartenenti a 366 stazioni di misura (270 nel bacino padano e 96 in Liguria) con almeno 20 anni di osservazione e numerosità media di 34. L'Atlante dispone dei dati registrati da tutte le stazioni ricadenti in Piemonte e in aggiunta quelle del Canton Ticino e le stazioni francesi poste a nord del massiccio del Pelvoux per un totale di 537; tali stazioni rico-

prono l'area considerata con una densità di circa 10⁻² per km². I risultati forniti dal confronto tra i dati di precipitazione osservati e i massimi storici concordano comunque con i tempi di ritorno ottenuti tramite l'inferenza statistica.

L'integrazione dei dati acquisiti nelle stazioni pluviometriche della rete regionale piemontese con quelli della rete di *Météo France* e dei dati radar, conferma che l'evento meteorologico occorso in occasione del fenomeno di colata lungo il Rio Frejus del 6 agosto 2004 è stato caratterizzato da una cella temporalesca di dimensioni ridotte e di non rilevante intensità, che ha generato sullo spartiacque precipitazioni con carattere di rovescio.

Per quanto riguarda invece l'analisi statistica svolta tramite regionalizzazione, essa porta ad attribuire un ruolo predisponente alle precipitazioni che hanno caratterizzato i giorni precedenti l'innescio. Infatti i tempi di ritorno ottenuti, compresi tra 3 e 8 anni, evidenziano la criticità delle precipitazioni registrate il giorno 3 agosto per la durata di 1 ora, mentre le precipitazioni del giorno 6 agosto, ovvero quando si sono verificati gli effetti al suolo, hanno tempi di ritorno inferiori a 2 anni, quindi una ricorrenza maggiore.

Analisi pluviometrica storica dei fenomeni che hanno interessato l'area in passato

Dal Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte (SIGeo) sono state estratte le informazioni relative ai processi e ai danni indotti dal Rio Frejus nel Comune di Bardonecchia. In tale archivio è disponibile la documentazione di eventi che hanno interessato il bacino in esame a partire dal 1934; sono stati quindi considerati i dati di pioggia giornaliera conservati nell'archivio dell'ex Ufficio Idrografico del Po, registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio ad esso afferente relativamente ai giorni in cui si sono verificati gli eventi indicati nel SIGeo. In particolare nell'area in esame sono presenti le stazioni di Bardonecchia (quota 1'275 m s.l.m., in prossimità dell'abitato) e di Rochemolles Diga (quota 1'926 m s.l.m., nel limitrofo bacino del Torrente Rochemolles). Per gli eventi posteriori al 1990 si hanno a disposizione i dati acquisiti dalla Rete Automa-

TABELLA 4.3.5 ANALISI PLUVIOMETRICA DEGLI EVENTI STORICI

Processi e danni indotti nel Comune di Bardonecchia dal Rio Frejus			Stazione pluviometrica di riferimento	Pioggia [mm]			
Data	Effetti	Danni		1 g	7 gg	15 gg	30 gg
03/08/1934	Erosione di sponda	Opere di attraversamento danneggiate, opere idrauliche distrutte, tronco stradale danneggiato	Bardonecchia	16.0	37.8	53.6	56.7
26-28/05/1951	Erosione di sponda Erosione di fondo Allagamenti	Opere di attraversamento danneggiate, opere idrauliche danneggiate, coltivi distrutti, tronco stradale distrutto, opere di attraversamento, edifici minacciati	Bardonecchia	50.0	51.0	80.0	125.2
21/06/1954	Trasporto solido Disalveamento Allagamento - Erosione	Edifici danneggiati, opere idrauliche danneggiate, opere di attraversamento distrutte	Bardonecchia	11.0	18.4	39.4	52.8
21/08/1954	Alluvionamento	Edifici minacciati	Bardonecchia	23.0	65.0	89.0	89.6
07-09/06/1955	Erosione di sponda Allagamento Alluvionamento	Edifici minacciati, tronco stradale distrutto	Bardonecchia	52.6	92.8	100.8	139.8
18-19/10/1966	—	Edifici minacciati	Bardonecchia	9.2	54.0	100.2	119.0
02-04/11/1968	Erosione di sponda Trasporto solido Allagamento Alluvionamento	Edifici minacciati, opere idrauliche danneggiate, coltivi minacciati	Bardonecchia	19.4	50.0	56.0	86.4
07/08/1997	Trasporto solido Ostruzione parziale dell'alveo	Opere di attraversamento minacciate	Camini Frejus	12.2	43.2	44.0	72.8
21/06/2002	Trasporto solido	—	Camini Frejus	0.0	3.6	17.4	148.6
06/08/2004	Trasporto solido Ostruzione dell'alveo	Opere di attraversamento minacciate	Camini Frejus	9.4	43.6	43.6	67.2

tica Regionale di Monitoraggio Meteo-idrologico di Arpa Piemonte (stazioni di Camini Frejus, 1'740 m slm e Prerichard, 1'353 m slm). Si riporta in **tabella 4.3.5** uno schema riassuntivo degli eventi documentati per i quali è stato possibile associare le quantità di pioggia misurate il giorno del dissesto e nei giorni precedenti. Nella tabella non sono stati inseriti gli eventi verificatisi nell'immediato dopoguerra (12/06/1947, 04-05/09/1948, 02/05/1949) per i quali non sono disponibili dati di pioggia acquisiti dalla Rete dell'ex Ufficio Idrografico, gli eventi per i quali nel SIGeo non è indicato il giorno di innesco (10/1977) e ovviamente tutti gli eventi dei quali non si dispone di documentazione sufficiente per affrontarne un'analisi pluviometrica correttamente riferita.

Nonostante l'inevitabile incompletezza ed incertezza della documentazione disponibile relativa ai dissesti, si osserva che la zona, in particolare l'abitato di Bardonecchia, è stata interessata nell'arco di settant'anni da frequenti processi torrentizi lungo l'asta del Rio Frejus, sottolineando la predisposizione del bacino a questo tipo di fenomeni. La scarsa accuratezza nell'indicazione di data e ora in cui un fenomeno si è verificato influisce sulla determinazione delle altezze di pioggia ad esso correlabili. Le stazioni della Rete Automatica acquisiscono ogni dieci minuti le precipitazioni cadute e pertanto consentono di definire in maniera accurata i valori di pioggia precedenti l'innesco di

un fenomeno, purché sia nota ovviamente anche l'ora di innesco di quest'ultimo.

La cumulata di pioggia giornaliera registrata dalla Rete dell'ex Ufficio Idrografico è invece calcolata dalle 9:00 del mattino del giorno precedente alle 9:00 del mattino del giorno a cui è attribuita; non essendo inoltre noti gli orari di innesco dei fenomeni passati, risulta dunque talvolta problematico definire gli esatti valori di pioggia che li precedono. Considerando quindi i casi in cui le informazioni possono essere reputate affidabili, le quantità di pioggia, registrate nel corso degli eventi passati dalla stazione di Bardonecchia, risultano essere dello stesso ordine di grandezza di quelle misurate relativamente al 6 agosto 2004, in particolare in occasione di eventi caratterizzati da trasporto solido (21/06/1954, 02-04/11/1968, 07/08/1997). Si tenga inoltre presente che la stazione di Bardonecchia non è collocata in posizione ottimale, a differenza della stazione di Camini Frejus, ai fini dell'analisi di eventi pluviometrici che interessano il bacino del Rio Frejus.

Sulla serie storica dei dati pluviometrici della stazione di Bardonecchia, nei periodi compresi tra il 1914 e il 1941 e tra il 1951 e il 1986, si è calcolato il numero medio annuo di giorni piovosi, risultante pari a 86 e la Pioggia Media Annuo (PMA), pari a 744 mm. Distribuendo la PMA sul numero medio annuo di giorni piovosi, si ottengono circa

TABELLA 4.3.6 MASSIME ALTEZZE DI PRECIPITAZIONE PER DIFFERENTI DURATE REGISTRATE NEI GIORNI 6 E 7 AGOSTO 1997

Stazione	Massima altezza di pioggia [mm]									
	6 agosto 1997					7 agosto 1997				
	10 min	30 min	1 ora	3 ore	6 ore	10 min	30 min	1 ora	3 ore	6 ore
Camini Frejus	5.2	13.2	16.8	17.2	17.2	5.0	6.4	6.4	7.2	9.2

8.7 mm di pioggia media giornaliera: le cumulate giornaliere attribuite agli eventi descritti in tabella risultano tutte superiori a questo valore e generalmente non si discostano molto, ma hanno lo stesso ordine di grandezza; ciò evidenzia ulteriormente la non straordinarietà degli eventi pluviometrici che anche in passato hanno causato l'instaurarsi di processi torrentizi.

La cumulata giornaliera misurata a Camini Frejus il 6 agosto 2004 è superiore al valore medio. Per quanto riguarda i casi storici riportati in **tabella 4.3.5**, sono disponibili solamente i dati di cumulata giornaliera che, come già precisato, si riferiscono alla precipitazione caduta dalle 9:00 del giorno precedente, quindi i totali misurati dalle stazioni meccaniche non sono omogenei con quelli delle stazioni automatiche.

Particolarmente significativo è il confronto dell'evento del 7 agosto 1997 con quello in esame, considerata la vicinanza temporale, la manifestazione di effetti analoghi (trasporto solido, ostruzione dell'alveo), la coincidenza del periodo di innesco in riferimento all'anno solare e la disponibilità della medesima rete di riferimento per la registrazione dei dati pluviometrici. I valori registrati a Camini Frejus in occasione dei due eventi mostrano scarti inferiori allo 0.1% per le cumulate dei 7 e dei 15 giorni precedenti gli inneschi, quindi gli eventi pluviometrici associati ai due fenomeni di trasporto in massa sono del tutto confrontabili. Si sono analizzate quindi le piogge sub-giornaliere cadute nei giorni precedenti l'innesco del 7 agosto 1997, manifestatosi in corrispondenza dell'abitato di Bardonecchia intorno alle ore 14:45 UTC. Si riportano in **tabella 4.3.6** i valori massimi associati all'evento registrati dalla stazione di Camini Frejus, per sottolineare che, analogamente all'evento del 6 agosto 2004, le precipitazioni del giorno di innesco presentano valori inferiori a quelli registrati nei giorni immediatamente precedenti; anche in questo caso risulta infatti critico il valore della massima altezza di pioggia oraria misurato nei giorni precedenti a quello d'innesco (16.8 mm/1h il 06/08/1997, valore superiore ai 14 mm/1h della soglia – **tabella 4.3.2**).

Più recente ancora è il fenomeno verificatosi il 21 giugno 2002, per il quale i valori di pioggia indicati sono decisamente inferiori a quelli apprezzati negli altri casi e soprattutto si nota che nel giorno di innesco non sono state misurate precipitazioni dalla stazione di riferimento. Inoltre per riscontrare altezze di pioggia significative è necessario considerare il valore relativo ai 30 giorni precedenti.

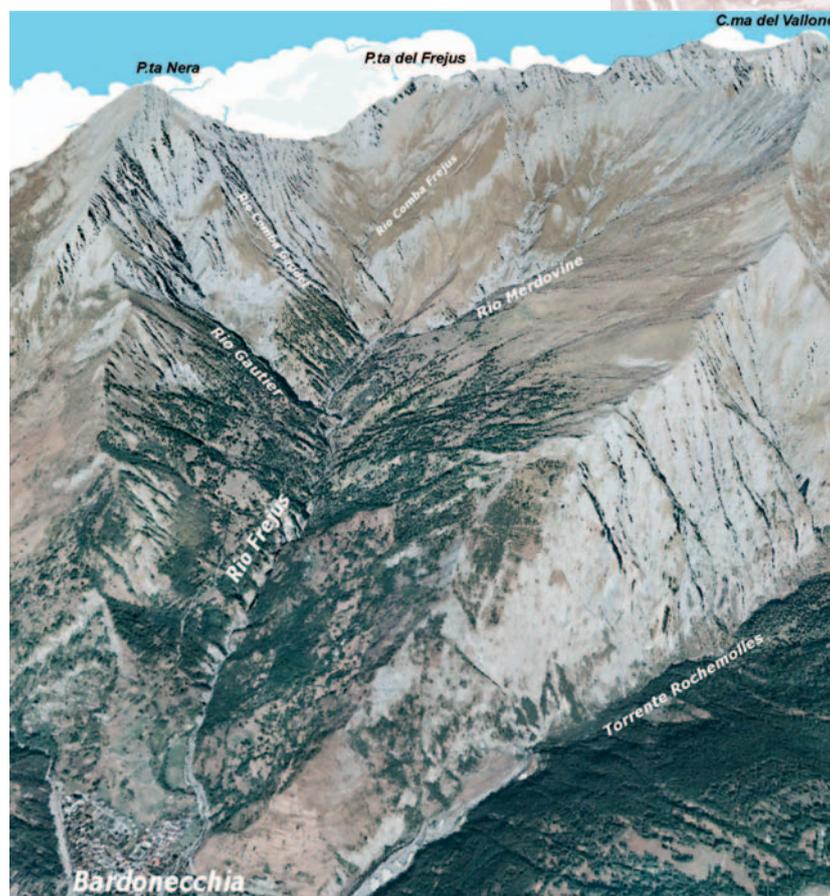
4.3.4

Inquadramento geologico-geomorfologico e caratterizzazione delle aree di innesco

Al fine di analizzare le varie componenti che caratterizzano i processi torrentizi è stato adottato un approccio multi-criteriale, tratto dai classici metodi di valutazione della pericolosità geomorfologica (Varnes & IAEG, 1984), che integra informazioni provenienti da rilevamenti di terreno, da informazioni d'archivio (SIGeo di Arpa Piemonte) e da elaborazioni in ambiente GIS (sulla base di un Modello Digitale del Terreno). L'obiettivo principale è l'individuazione del ruolo che l'assetto geologico-strutturale e geomorfologico hanno sulla propensione all'innesco dei processi di trasporto solido in massa e di verificare le condizioni di deflusso lungo le aste torrentizie.

Di seguito vengono, pertanto, dapprima presentati i caratteri salienti geologici e geomorfologici del bacino del Rio Frejus e successivamente le analisi di dettaglio che hanno permesso di individuare e caratterizzare le principali aree di innesco dei fenomeni di colata.

Figura 4.3.12
Elaborazione tridimensionale del bacino del Rio Frejus



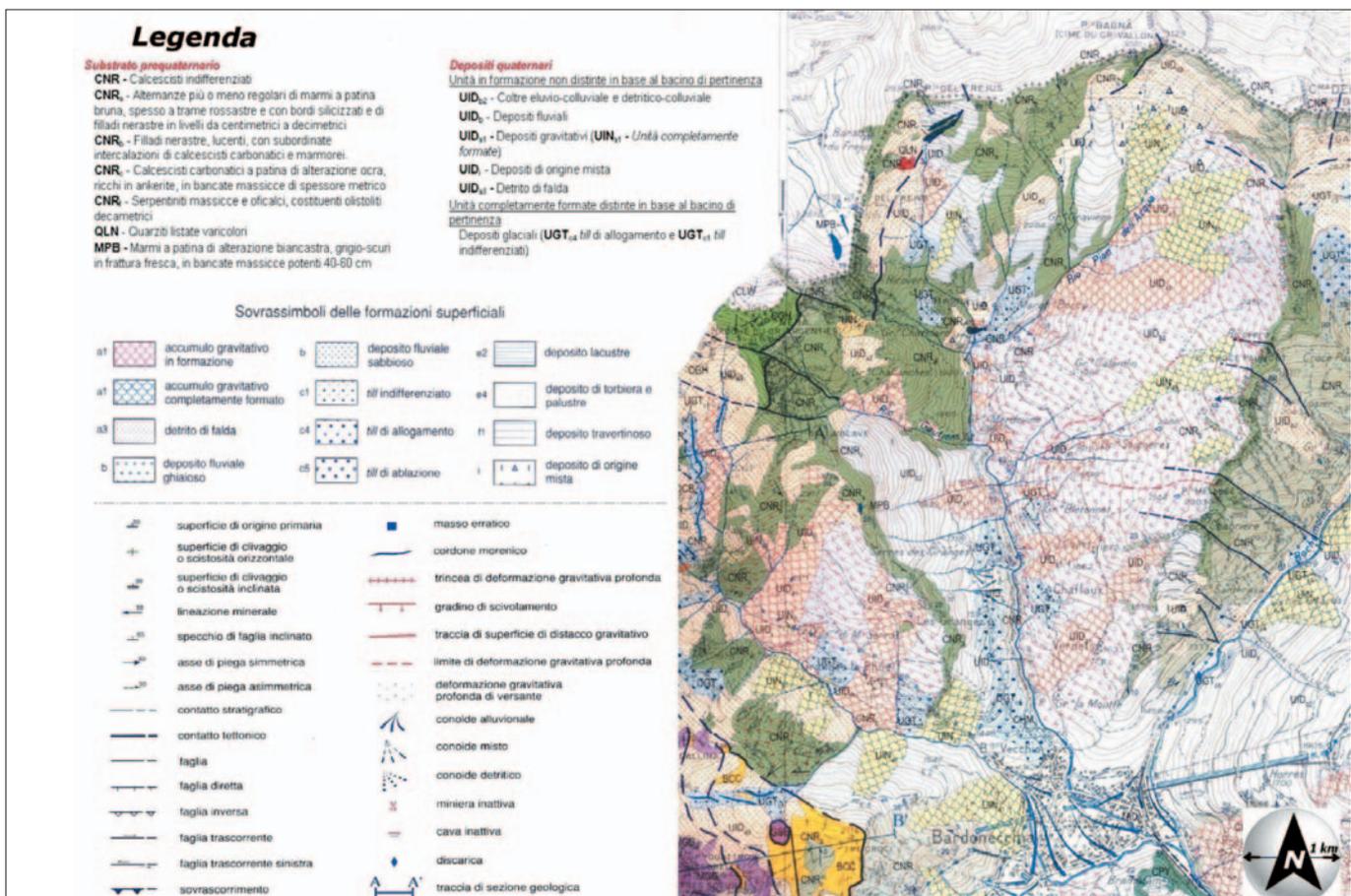
Il bacino del Rio Frejus, allungato in direzione N-S, ha una superficie di circa 22 km² ed è articolato in diversi sottobacini, i principali dei quali sono quelli del Rio Merdovine, del Rio Comba del Frejus, del Rio Comba Gaudet e del Rio Gautier (**figura 4.3.12**). Il bacino del Frejus confina ad est con quello del Torrente Rochemolles, ad ovest con il bacino del Torrente Rho e a nord con alcuni sottobacini francesi del Torrente Arc. Lungo lo spartiacque principale, che segna anche il confine italo-francese, sono ubicate le cime più elevate: la Cima del Vallone (3'171 m slm), la Punta Bagnà (3'129 m slm), la Punta Nera (3'041 m slm) e la Punta del Frejus (2'936 m slm).

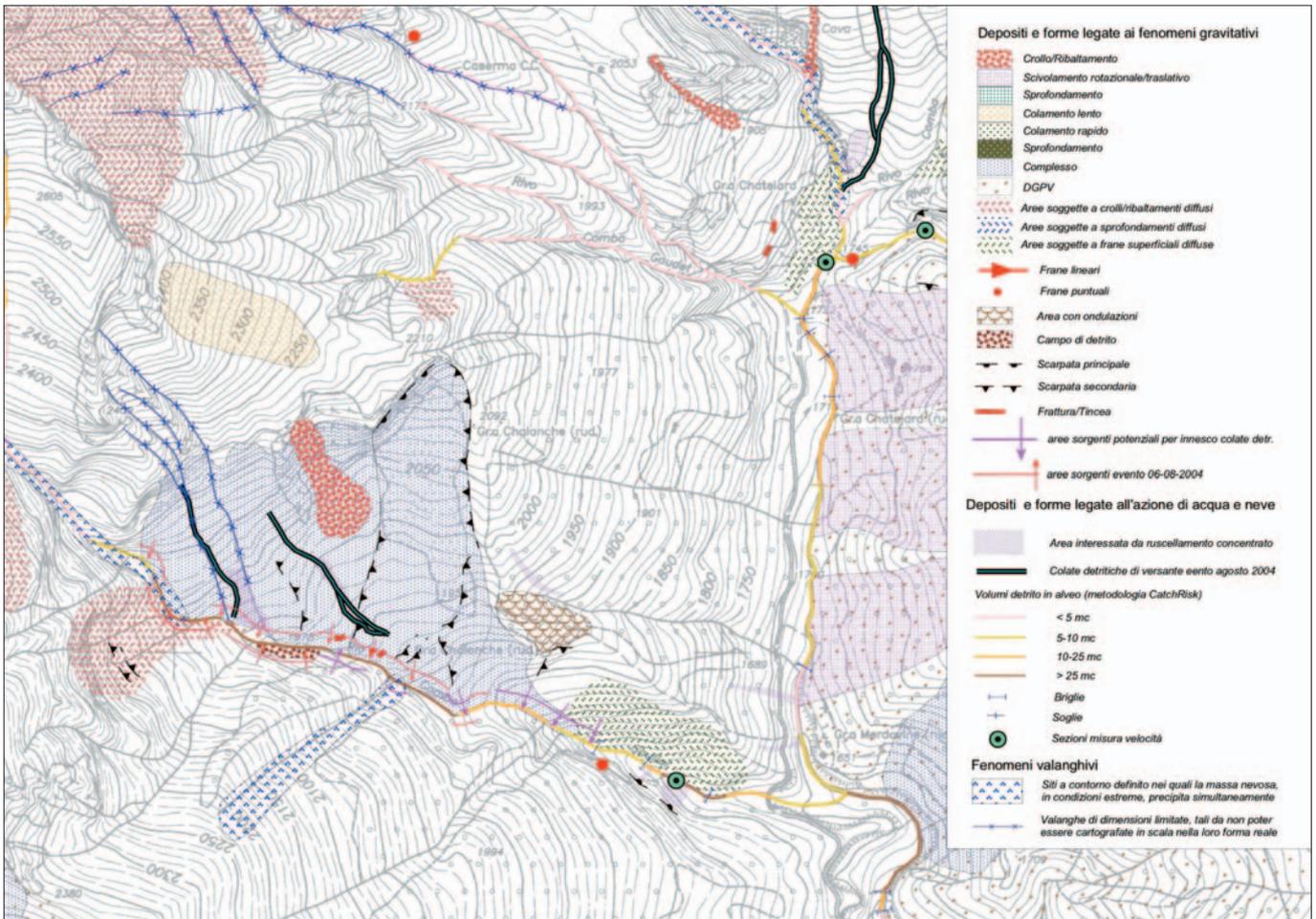
Il bacino oggetto del presente studio è caratterizzato da una morfologia piuttosto articolata e complessa connessa alla sovrapposizione di numerose fasi di modellamento legate a processi di origine diversa. In particolare, i depositi e le forme connesse al modellamento glaciale risultano assai scarse e per lo più completamente rimodellate ed oblitegate dall'azione dei corsi d'acqua e dei fenomeni gravitativi. Questi ultimi due processi risultano a loro volta collegati in quanto la generalizzata tendenza all'approfondimento dei corsi d'acqua è una delle cause principali della estesa instabilità dei versanti. L'importanza del modellamento da parte delle acque incanalate risulta particolarmente evidente nei settori di cresta, dove si possono osservare i caratteri di generale ampliamento del baci-

no del Rio Frejus a spese dei bacini adiacenti e nel tratto a monte di Bardonecchia, dove il Rio Frejus si approfondisce in una stretta gola con pareti verticali in roccia alte fino a 200 m. Al termine della gola e immediatamente a monte della confluenza con la Dora di Valle Stretta, si trova l'esteso conoide (coalescente con quello del Torrente Rho) su cui sorge Bardonecchia: in questo tratto il canale attivo del Rio Frejus risulta scarsamente inciso e completamente regimato da opere di difesa.

I litotipi che caratterizzano il substrato prequaternario nel bacino del Rio Frejus (**figura 4.3.13**) appartengono principalmente all'Unità Tettonostratigrafica del Lago Nero (Servizio Geologico d'Italia, 2002; Polino *et al.*, 2002), costituita in questo areale da calcescisti più o meno carbonatici, localmente ricchi di alternanze filladiche. Sono decisamente subordinati gli affioramenti di serpentiniti massicce ed oficalci (cava abbandonata del Rio Comba del Frejus) e di quarziti (in prossimità della Punta del Frejus). I principali elementi strutturali del substrato evidenziati dalla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Servizio Geologico d'Italia, 2002), sono rappresentati da contatti tettonici a debole inclinazione (piani di sovrascorrimento) e da faglie subverticali. Queste ultime hanno direzione NW-SE e sono particolarmente evidenti nel vallone di Rochemolles, mentre lungo il versante sinistro del bacino del Frejus la loro continuità è presunta; faglie con la stessa direzione ma di estensione minore

Figura 4.3.13
Stralcio della Carta
Geologica d'Italia,
Foglio 153
Bardonecchia,
scala 1:50.000
(Servizio Geologico
d'Italia, 2002)





sono indicate anche negli alti settori dei bacini dei rii Gautier e Comba Gaudet. Gli ammassi rocciosi presentano pessime caratteristiche geomeccaniche in quanto interessati da una intensa deformazione fragile, che si manifesta attraverso una serie di discontinuità presente a tutte le scale. In modo particolare, le alternanze a filladi risultano estremamente degradate, con ammassi rocciosi che possono essere classificati da molto *fratturati ad allentati*. Laddove le condizioni strutturali e di pendenza dei versanti risultano predisponenti per l'instabilità gravitativa, tali ammassi assumono un grado di allentamento via via crescente fino alla completa disarticolazione.

Esiste, inoltre, una forte convergenza fra le forme e le strutture causate dalla tettonica gravitativa e le manifestazioni geodinamiche di stile fragile. Ciò risulta particolarmente evidente lungo il versante sinistro della Valle del Frejus, dove estesi fenomeni di deformazione gravitativa profonda dimostrano una stretta connessione geometrica con i principali sistemi di deformazione recente del substrato, sviluppandosi soprattutto in corrispondenza delle principali zone di taglio (Polino *et al.*, 2002). Come precedentemente accennato, sono state effettuate analisi di dettaglio che hanno interessato in modo particolare le zone di innesco della colata del 6 agosto 2004 e le testate dei bacini; sono state inoltre attentamente valutate le caratteristiche dell'asta del Rio Frejus al fine di quantificare

i volumi di detrito presenti in alveo (in grado di alimentare il trasporto solido delle colate) e le condizioni di efficacia ed efficienza delle opere di difesa. Per quanto riguarda l'analisi geomorfologica in conoide e la relativa valutazione di pericolosità si è fatto riferimento a quanto realizzato nel Programma Interreg IIC, *Progetto raccolta e organizzazione di dati territoriali; valutazione di pericolosità e rischio dei fenomeni naturali e predisposizione di piani comunali di Protezione Civile* (Regione Piemonte, 2001), i cui prodotti sono stati riallineati secondo standard regionali nel successivo Progetto *CatchRisk* (AA.VV., 2005a; 2005b).

I risultati di questo approfondimento hanno contribuito alla realizzazione della *Carta geomorfologica di sintesi* e sono stati integrati con le elaborazioni in ambiente GIS finalizzate alla caratterizzazione delle aree di innesco. Tale carta (**figura 4.3.14**) riporta alcune informazioni utili per la definizione delle condizioni di pericolosità del bacino ed è stata realizzata sulla base sia di informazioni già presenti nel SIGeo di Arpa Piemonte, sia di nuovi dati relativi ai sopralluoghi condotti post-evento. I principali elementi riportati nella carta suddetta, suddivisi in gruppi omogenei, sono i seguenti:

- *depositi e forme legate ai fenomeni gravitativi*. Tali informazioni derivano dall'aggiornamento del Progetto nazionale IFFI (*Inventario dei Feno-*

Figura 4.3.14
Stralcio della Carta geomorfologica di sintesi del bacino del Rio Frejus



Figura 4.3.15
Settori di cresta del bacini del Rio Merdovine. Sono visibili gli accumuli detritici alla base delle pareti di calcescisti filladici nei quali sono impostate profonde incisioni torrentizie



Figura 4.3.16
A monte del conoide di Bardonecchia, il Rio Frejus attraversa una profonda gola in roccia con pareti verticali talvolta superiori a 50-70 m di altezza. Tale tratto, lungo circa 1.5 km, presenta una inclinazione media inferiore ai 6° ed in alcuni punti la larghezza della sezione è inferiore a 2 m. Questa morfologia genera una sorta di imbuto naturale con "effetto filtro" che condiziona l'evoluzione dei processi torrentizi (potenziale formazione di ostruzioni temporanee e rilasci improvvisi di ingenti volumi di acqua e detrito)



meni Franosi in Italia; Arpa Piemonte, 2004a), in cui sono stati distinti in particolare la tipologia di movimento e lo stato di attività dei fenomeni gravitativi ed alcuni elementi morfologici significativi (scarpate, trincee, ecc.). Dall'analisi di questi dati risulta in frana il 58% del territorio del bacino del Rio Frejus, di cui il 35% con fenomeni attivi. I sopralluoghi hanno evidenziato che le aree sorgenti delle colate si trovano principalmente in corrispondenza dei settori di versante interessati da estesi fenomeni gravitativi, in cui si riscontrano movimenti in atto che interessano depositi eterometrici caotici, la cui componente ghiaioso-sabbiosa risulta prevalente;

- *localizzazione probabile delle valanghe.* Sono riportate le aree nelle quali si incanalano le masse nevose durante i processi di valanga, derivanti dalla cartografia realizzata da Arpa Piemonte per il territorio comunale di Bardonecchia. È stato deciso l'inserimento di tali informazioni in ragione dell'importanza che le masse nevose, presenti nei canaloni fino in estate avanzata, possono avere nell'evoluzione dei fenomeni di colata detritica;
- *aree detritiche instabili in prossimità delle aste torrentizie.* Sono state indicate le principali aree sorgenti che hanno fornito un contributo solido durante l'evento dell'agosto 2004 ed i settori di copertura instabili ed in equilibrio precario, in grado di alimentare futuri fenomeni di colata;
- *depositi e forme legate all'azione delle acque di ruscellamento.* Lungo i versanti e le incisioni secondarie sono riportate le aree a ruscellamento concentrato e quelle dove si sono verificate, nell'agosto 2004, colate detritiche minori;

- *stima del volume dei depositi presenti in alveo.* È stata effettuata la stima del volume dei depositi presenti in alveo e potenzialmente mobilizzabili durante eventi di piena, secondo il criterio definito nel Progetto *CathRisk* (per la descrizione del metodo si veda il § 2.5.2). Tale volume di detrito, quantificato in sezioni rappresentative dei vari tratti d'alveo considerando un tratto longitudinale unitario, esprime la *magnitudo unitaria*, classificata per esigenze di sintesi nelle seguenti classi: < 5 m³, 5-10 m³, 10-25 m³, > 25 m³. L'analisi della variazione di tale parametro lungo l'asta torrentizia consente di visualizzare con immediatezza le zone preferenziali di accumulo di materiale detritico e di stimare il volume totale potenzialmente rimobilizzabile.

Descrizione delle aree sorgenti

In tutto il bacino del Rio Frejus sono state osservate estese coperture detritiche da cui possono avere origine fenomeni di colata. In particolare, i settori di cresta compresi tra i bacini del Rio Merdovine ed il Rio Gautier presentano imponenti accumuli detritici di origine mista alla base di pareti rocciose ad elevato grado di fratturazione ed alterazione. Tali accumuli risultano profondamente incisi da numerosi corsi d'acqua e rappresentano importanti sorgenti di materiale facilmente erodibile (**figura 4.3.15**).

Lungo i versanti meno acclivi sono presenti coperture detritico-eluvio-colluviali di potenza modesta (in genere < 2 m) nelle quali si evidenziano estesi fenomeni sia gravitativi sia erosivi (ruscellamento diffuso). I fenomeni gravitativi comprendono meccanismi di colamento lento e di scivolamento; in questi ultimi la superficie di scivolamento è impostata prevalentemente in corrispondenza del contatto copertura/substrato.

Anche all'interno degli alvei del reticolo idrografico sono diffusamente presenti ingenti quantitativi di detriti eterometrici incoerenti provenienti dai versanti o già in alveo a causa del fatto che il corso d'acqua incide accumuli detritici. Nell'alveo principale del Rio Frejus sono stati rilevati elevati valori di volumi unitari di materiale rimobilizzabile (classi da 10-25 m³ a > 25 m³ per metro lineare) a partire dalle principali confluenze fino all'imbocco della gola in roccia, a monte di Bardonecchia (**figura 4.3.16**). I volumi totali medi ricavati con il "metodo *CatchRisk*" lungo le aste del Rio Merdovine e del Rio Gautier sono rispettivamente di 80·10³ m³ e 48·10³ m³.

Particolare attenzione è stata rivolta proprio alla caratterizzazione di questi due bacini interessati in modo significativo dall'evento dell'agosto 2004 e di seguito descritti nel dettaglio.

Rio Gautier (per l'ubicazione dei punti descritti si veda la **figura 4.3.17**)

- *Punto 0.* Tratto con inclinazioni superiori a 35° nel quale sono state individuate, nel corso dei sopralluoghi effettuati alla fine di agosto 2004,

coospicue masse nivali prevalentemente ricoperte da detriti (figura 4.3.18). La quantità di detrito osservata sopra i residui nevosi rappresenta un indice di ricarica stagionale del detrito in alveo. La rottura o lo scioglimento in modo repentino dei ponti di neve può essere causa di rilasci improvvisi di acqua e detrito in grado di innescare fenomeni di colata.

- **Punto 1.** Tratto d'alveo con inclinazioni di 22°-25° circa ed in cui è presente un'elevata quantità di materiale detritico incoerente (> 25 m³ per metro lineare). La sponda destra presenta pendenze da molto elevate a sub-verticali ed è incisa in detrito di falda debolmente incoerente, caotico ed eterometrico. La falda detritica presenta generalizzati indizi di instabilità (scarpate e rigonfiamenti) ed alcuni impluvi generati dal ruscellamento concentrato.
- **Punto 2.** Tratto caratterizzato dalla presenza sul versante sinistro di un esteso movimento gravitativo complesso ed attivo. In questo tratto, le sponde sono alte 8-10 m e sono costituite da detrito eterometrico (con matrice sabbioso-ghiaiosa prevalente), incoerente o debolmente cementato. Le condizioni di instabilità delle sponde e l'elevata quantità di materiale (in alveo e sulle sponde) svolgono un ruolo sostanziale nella formazione e/o alimentazione delle colate detritiche (figura 4.3.19).
- **Punto 3.** Tratto inciso al piede dell'esteso fenomeno gravitativo descritto al punto 2, caratterizzato da forte inclinazione (> 30°) e da accentuata erosione della sponda in detrito. L'analisi della carta dell'area del drenaggio, realizzata secondo il metodo di Tarboton (1997, 2002), evidenzia che in questo tratto vi sono zone preferenziali di deflusso e ristagni d'acqua che indicano la predisposizione alla saturazione delle coltri superficiali (figura 4.3.20).
- **Punto 4.** Confluenza con il Rio Frejus caratterizzata dalla prevalenza di processi deposizionali a causa della brusca riduzione della pendenza. Le tracce delle massime altezze raggiunte dalla colata dell'agosto 2004, misurate nel canale principale immediatamente dopo l'evento, raggiungono in questo settore 4-5 m da fondo alveo; i depositi che costituiscono i lobi laterali, esterni al canale principale, hanno uno spessore poco superiore al metro (figura 4.3.8).

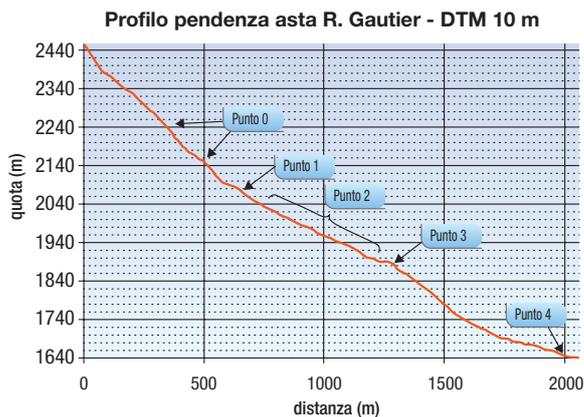


Figura 4.3.17
 Profilo longitudinale dell'asta principale del Rio Gautier. I punti da 0 a 3 evidenziano le principali aree sorgenti dell'evento dell'agosto 2004. Il punto 4 indica la confluenza con il Rio Frejus



Figura 4.3.18
 Ponti di neve ricoperti da materiale detritico osservati a quota 2'250 m circa nell'alveo del Rio Gautier alla fine di agosto 2004



Figura 4.3.19
 Ripresa verso valle dell'asta principale del Rio Gautier a quota 1'940 m circa. Sono osservabili le caratteristiche geometriche e sedimentologiche delle sponde in cui si evidenziano alcune recenti erosioni (in primo piano su entrambe le sponde)

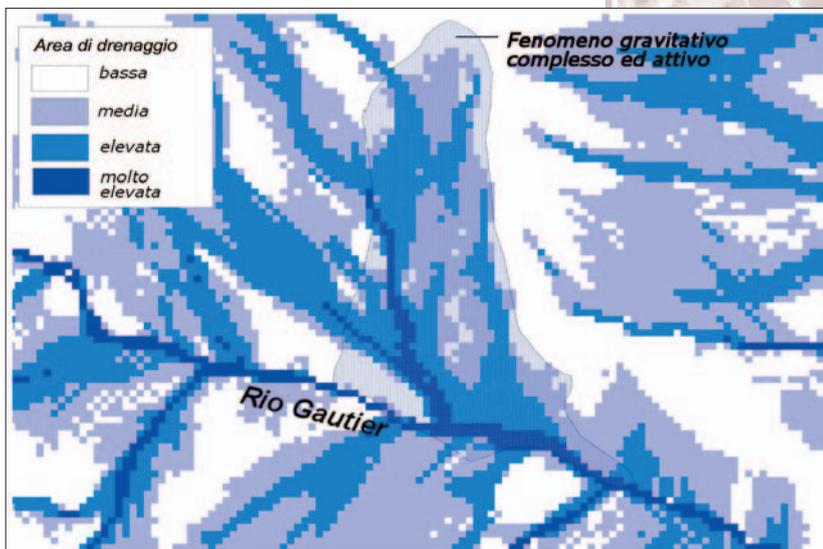
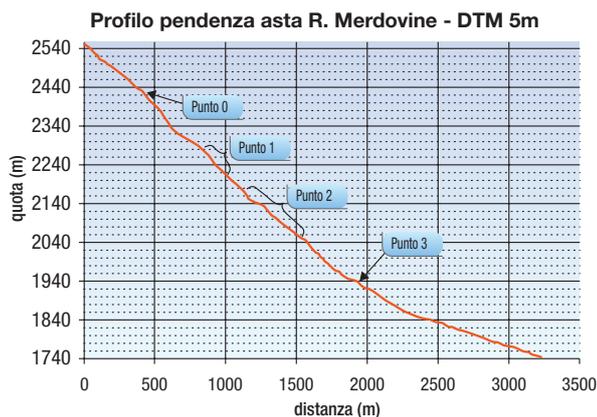


Figura 4.3.20

Stralcio della carta delle aree di drenaggio relativo al tratto del versante sinistro del Rio Gautier interessato da un esteso fenomeno gravitativo.

La carta deriva da elaborazioni in ambiente GIS in cui l'area di studio è suddivisa in celle di 10 m di lato, ad ognuna delle quali è assegnato un valore corrispondente al numero di celle il cui deflusso converge sulla cella considerata (Tarboton, 1997; 2002). Ad elevati valori di numero di celle (area da elevata a molto elevata) corrisponde un deflusso superficiale intenso e concentrato. In corrispondenza dell'instabilità del versante si evidenzia un intenso deflusso superficiale che, in relazione alle caratteristiche e condizioni di stabilità del materiale presente, ha un importante ruolo predisponente nell'innescare dei fenomeni di colata

Figura 4.3.21
 Profilo longitudinale
 dell'asta principale
 del Rio Merdovine.
 I punti da 0 a 3
 evidenziano le principali
 aree sorgenti
 dell'evento
 dell'agosto 2004



Rio Merdovine (per l'ubicazione dei punti descritti si veda la **figura 4.3.21**)

- **Punto 0.** Rottura di pendenza in corrispondenza della quale l'alveo diventa molto acclive ($> 30^\circ$) ed è inciso in *diamicton* con grado di addensamento da basso a nullo (**figura 4.3.22**); in alveo sono stati stimati oltre 25 m^3 per metro lineare di depositi immediatamente rimobilizzabili. A valle di questa rottura di pendenza, l'alveo presenta spiccate differenze tra le due sponde: la sponda sinistra delimita un settore particolarmente evoluto di un'estesa *Deformazione Gravitativa Profonda di Versante* (DGPV) ed è costituita prevalentemente da depositi di frana in equilibrio precario (**figura 4.3.23**); la sponda destra è costituita da affioramenti di calcescisti più o meno carbonatici alternati a modesti depositi detritico-colluviali.



Figura 4.3.22

Ripresa del 18 agosto 2004 dell'asta principale del Rio Merdovine, a quota 2'430 m circa. Sono evidenti le tracce del passaggio della colata del 6 agosto (erosioni e depositi) e, sullo sfondo, il settore ad elevata pendenza da cui ha avuto origine. La sponda sinistra, alta in questo tratto 6-10 m, è costituita da depositi di frana in equilibrio precario

- **Punto 1.** Tratto con inclinazione di 20° - 25° circa inciso al piede di uno scivolamento rotazionale attivo (sponda sinistra) in cui si evidenziano numerose scarpate, fenditure, trincee, emergenze idriche. Il volume instabile complessivo, direttamente afferente al corso d'acqua, è di oltre $60'000 \text{ m}^3$ (**figura 4.3.24**).
- **Punto 2.** Tratto di 500-600 m di lunghezza, caratterizzato dalla presenza in sinistra idrografica di numerosi fenomeni gravitativi complessi la cui origine è legata alla estesa DGPV (Auct.) che coinvolge tutto il versante sinistro del bacino del Rio Frejus (**figura 4.3.23** e **4.3.24**). Tale sponda, alta alcune decine di metri, è costituita da blocchi e ciottoli immersi in abbondante matrice sabbioso-limoso derivante dall'alterazione e disgregazione dei calcescisti filladici. Talvolta sono rilevabili porzioni rocciose di alcune centinaia di metri cubi. L'analisi della carta delle aree di drenaggio (**figura 4.3.25**) mette in evidenza come l'area in deformazione gravitativa sia soggetta a un deflusso superficiale intenso e diffuso.
- **Punto 3.** Tratto a moderata inclinazione (10° - 12°) e con sezione trasversale moderatamente più ampia del tratto a monte. In questo settore sono state osservate, nelle foto aeree del luglio 2001, cospicue masse nevose in parte mascherate dal sovrastante detrito, presumibilmente originate dall'accumulo di valanghe provenienti dal bacino del Rio Graviere.



Figura 4.3.23

Versante meridionale del monte Rocca Verde (sullo sfondo) in cui si evidenziano (linee rosse) morfologie tipiche legate ai fenomeni di *Deformazione Gravitativa Profonda di Versante* (DGPV Auct.)

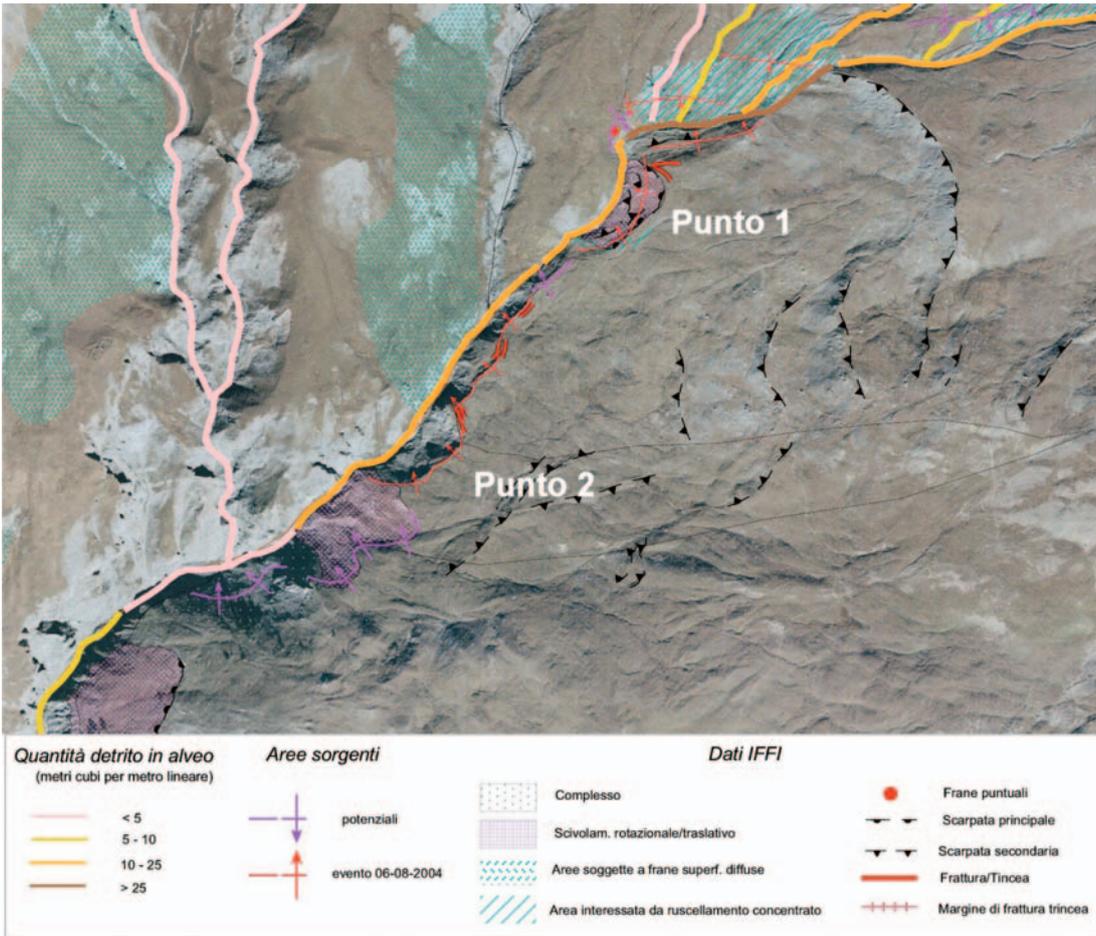


Figura 4.3.24 Estratto della carta geomorfologica sovrapposta alla fotografia aerea del Volo Regione Piemonte Alluvione 2000

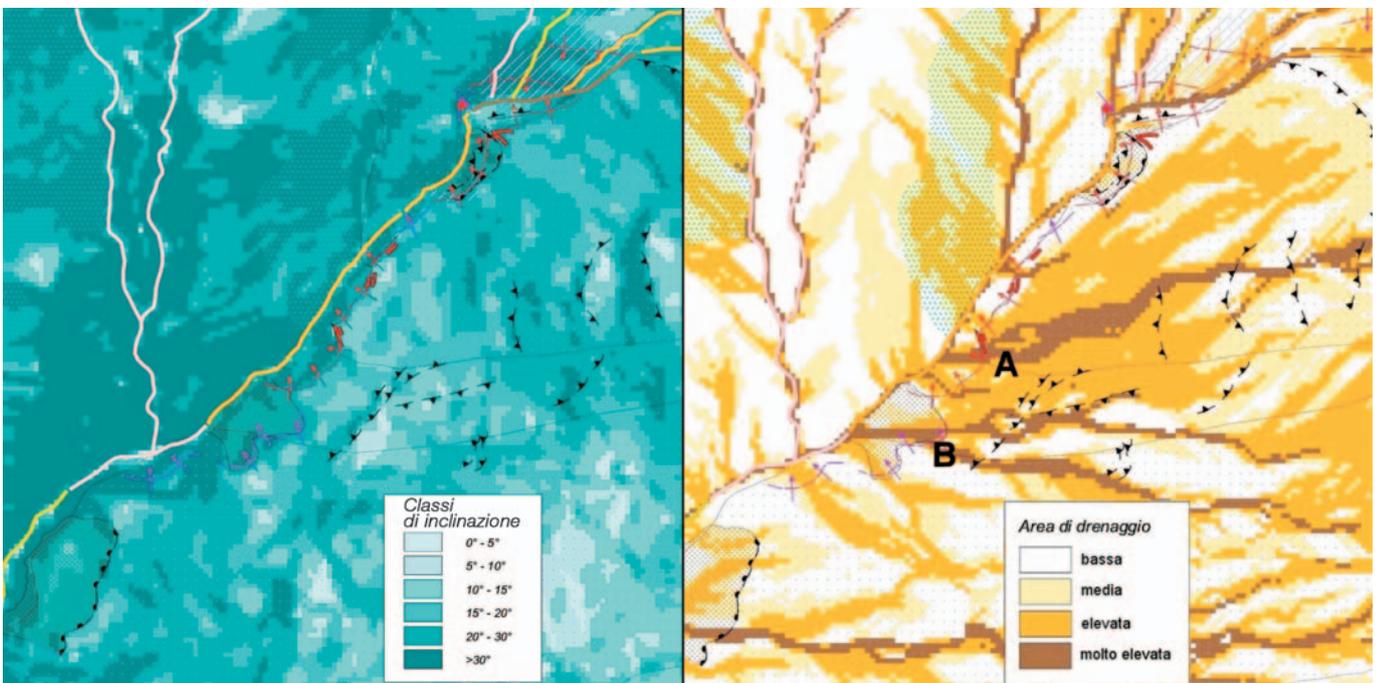
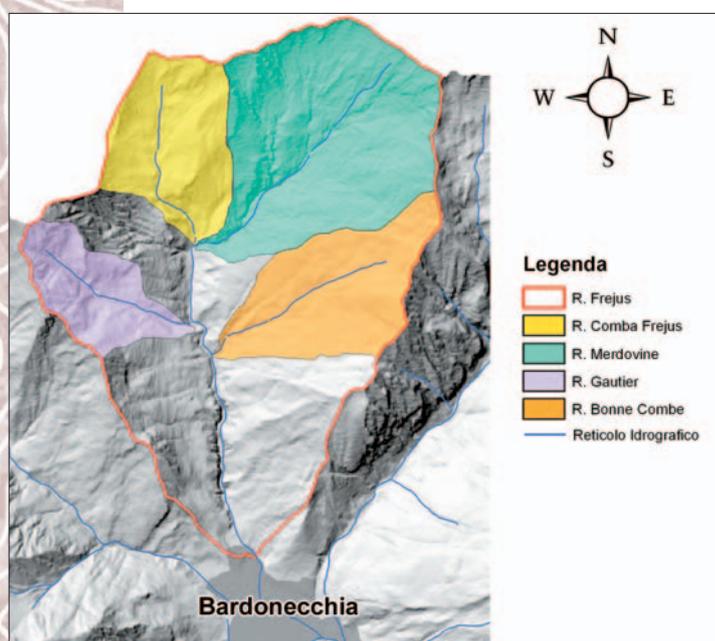


Figura 4.3.25 Estratto delle carte delle inclinazioni (a sinistra) e dell'area di drenaggio (a destra, per la descrizione del metodo – figura 4.3.20) riferito all'area in figura 4.3.24. Come esempio vengono indicate con A e B le zone dove si correla rispettivamente l'arretramento delle scarpate di erosione e l'innesco di scivolamenti gravitativi con deflussi superficiali particolarmente intensi. Da questa immagine risulta evidente il ruolo del reticolo idrografico superficiale, ancorché poco sviluppato, nel modellamento dei versanti e nell'attivazione dei fenomeni gravitativi

4.3.5 Analisi idrologica

Al fine di completare l'analisi dell'evento del 6 agosto 2004, sono stati applicati due differenti approcci idrologici per la valutazione delle portate. Un primo approccio si basa sui quantitativi di pioggia osservati e conduce al calcolo delle portate liquide, mentre il secondo approccio fornisce, da un'analisi a posteriori, una portata di picco sulla base della tipologia del processo e delle tracce della colata. In questo secondo caso, attraverso l'applicazione di formule empiriche, è stato possibile distinguere tra componente solida e componente liquida, quest'ultima confrontata successivamente con quella calcolata con il primo approccio.

Figura 4.3.26
Localizzazione dei bacini
e relative sezioni
di chiusura



Calcolo delle portate liquide basato sulle precipitazioni

La stima delle portate al colmo è stata condotta attraverso due differenti procedure: una metodologia analitica ed una modellazione idrologica distribuita. Sono state individuate le sezioni corrispondenti alle confluenze dei principali affluenti del Rio Frejus ed i relativi sottobacini contribuenti (figura 4.3.26), di cui sono riportate nella tabella 4.3.7 alcune informazioni morfometriche ed il tempo di corrivazione. L'approccio analitico è consistito nell'utilizzo della formula razionale, di frequente applicazione per

i piccoli bacini, che consente la valutazione della portata di piena Q_{\max} [m^3/s] mediante la seguente relazione:

$$Q_{\max} = \frac{C \cdot i_{\max} \cdot A}{3.6} \quad (4.3.1)$$

in cui C è il coefficiente di deflusso che tiene conto della riduzione dell'afflusso meteorico per effetto delle caratteristiche di permeabilità dei suoli ricadenti nel bacino, i_{\max} [mm/h] è il valore di precipitazione pari alla massima intensità registrata il giorno 6 agosto 2004, di durata pari al tempo di corrivazione del bacino, quest'ultimo ottenuto applicando la formula di Giandotti (1934), A [km^2] è la superficie del bacino.

Nel caso oggetto di studio si è ipotizzato un valore del coefficiente di deflusso per tutti i bacini pari a 1, considerando quindi un suolo completamente saturo tale per cui la totalità della precipitazione contribuisce al deflusso superficiale generando la massima portata liquida.

Il secondo approccio, il modello idrologico FEST (Mancini, 1990), utilizzato per il calcolo delle portate in corrispondenza delle sezioni considerate, è un modello distribuito, ad evento, basato sul metodo del CN (*curve number*) del *United Soil Conservation Service* (Bingner & Theurer, 2001) per il calcolo del deflusso superficiale e sul metodo Muskingum Cunge (Cunge, 1969; Ponce & Chaganti, 1994) per la sua propagazione.

Il parametro CN, stimato definendo le caratteristiche idrologiche dei suoli e della copertura vegetale, assume valori compresi tra 0 e 100 e rappresenta l'attitudine del bacino esaminato a produrre deflusso. I dati disponibili hanno una risoluzione di 100 m per quel che riguarda il parametro CN e di 10 m per le caratteristiche morfologiche del terreno. Il metodo tiene conto delle condizioni di umidità del suolo antecedenti l'inizio dell'evento che nella simulazione in oggetto si è ipotizzata una classe AMC pari a 3 che corrisponde a terreno molto umido.

I valori di precipitazione utilizzati in ingresso al modello sono relativi al giorno 6 agosto e derivano da misurazioni dirette registrate dalle stazioni pluviometriche (Camini Frejus e Prerichard) e dalle mappe di pioggia fornite dal radar meteorologico del Bric della Croce. Queste ultime forniscono per la loro natura una forzante pluviometrica spazialmente distribuita, in grado quindi di descrivere l'effettivo volume di pioggia per l'area considerata (Cremolini *et al.*, 2003), mentre le misure puntuali necessitano dell'applicazione di metodi per il calcolo delle superfici d'influenza delle stazioni pluviometriche. Nel caso di studio analizzato, la situazione della rete di monitoraggio risulta essere ideale in quanto il pluviometro di Camini Frejus

TABELLA 4.3.7 BACINI E LORO CARATTERISTICHE

Bacino	Superficie [km^2]	Lunghezza asta principale [km]	Altitudine media [m slm]	Tempo di corrivazione [h]
R. Comba Frejus	2.82	2.20	2'414	0.5
R. Merdovine	6.38	3.39	2'475	0.7
R. Gautier	1.87	2.12	2'287	0.4
R. Bonne Combe	3.25	2.50	2'150	0.6
R. Frejus	22.0	7.80	2'180	1.3

si trova nelle vicinanze dei sottobacini considerati e all'interno del bacino del Rio Frejus, inoltre il confronto con le osservazioni del radar meteorologico confermano la coerenza dei dati di precipitazione osservati. Nella **tabella 4.3.8** si riportano i valori di portata al colmo per i bacini considerati ottenuti utilizzando la formula razionale ed il modello idrologico distribuito (FEST) in cui le forzanti meteorologiche sono ricavate rispettivamente dalla rete di monitoraggio al suolo e dalle mappe radar.

I risultati forniti dall'applicazione del metodo razionale consentono una stima approssimata delle massime portate liquide transitate nelle sezioni considerate relative alle precipitazioni del giorno 6 agosto 2004 che, per la sezione di chiusura posta a quota 1'330 m in corrispondenza dell'apice del conoide di Bardonecchia, risulta essere pari a 40 m³/s. Il valore di portata al colmo ottenuta dall'utilizzo del modello FEST per la sezione di chiusura, ipotizzando come forzante meteorologica le precipitazioni fornite dal radar meteorologico, risulta essere di circa 17 m³/s con un orario del picco stimato alle 18:30 UTC del 6 agosto 2004; mentre utilizzando i dati della stazioni pluviometriche si ottiene un valore di 21 m³/s alle 18:40 UTC del 6 agosto 2004.

Infine, i dati idrometrici registrati durante l'evento (idrometro di Beaulard sito sulla Dora di Bardonecchia con frequenza di rilevazione del dato di 5 minuti) riportano alle ore 18:50 UTC un picco di 0.58 m rispetto allo zero idrometrico, da cui si ricava un valore di portata pari a 20 m³/s. Il massimo osservato risulta essere inferiore al livello corrispondente all'ordinaria criticità (1.6 m).

TABELLA 4.3.8 VALORI DI PORTATA AL COLMO OTTENUTI DALL'UTILIZZO DELLA FORMULA RAZIONALE E DEL MODELLO FEST

Bacino	Formula razionale (C=1)		FEST	
	Intensità di pioggia [mm/h]	Portata [m ³ /s]	Mappe Radar Portata [m ³ /s]	Dati da Pluviometri Portata [m ³ /s]
R. Comba Frejus	14.1	11	3	4
R. Merdovine	10.0	18	4	6
R. Gautier	14.0	7	2	3
R. Bonne Combe	11.4	10	2	3
R. Frejus	6.5	40	17	21

Stima della portata di picco della colata dal rilievo delle tracce d'evento

La stima della portata di picco dell'evento 2004, effettuata a posteriori in base all'analisi delle evidenze morfologiche e delle tracce del passaggio della colata, è stata condotta attraverso l'applicazione di equazioni del moto specifiche per il tipo di processo torrentizio considerato. Prima di procedere con i calcoli è necessario, pertanto, caratterizzare il processo che ha interessato il Rio Frejus il 6 agosto 2004. Sulla base dei rilievi di terreno, delle testimonianze verbali e delle fotografie scattate in corso d'evento, si sono evidenziate delle differenze tra le caratteristiche del deflusso in conoide e lungo le aste tributarie in cui ha avuto origine il processo. Infatti, sul conoide si può ragionevolmente supporre che si sia verificato un processo in moto turbolento, a componente liquida rilevante, ricadente nelle correnti detritiche inerziali ibride pietroso-fangose (**figura 4.3.27**); mentre i bacini dei rii Gautier e Merdovine sono stati interessati da correnti detritiche mature (per la classificazione si veda Takahashi, 1991 e 1999 in Ghilardi *et al.*, 1999).

Per la stima della portata di picco si è fatto riferimento alla correlazione tra portata di picco unitaria e massima profondità di flusso, in funzione della velocità di propagazione del flusso e la pendenza del canale (Hungri *et al.*, 1984; Rickenmann & Zimmermann, 1993).



Figura 4.3.27
Ripresa verso valle del Rio Frejus dal ponte di via Torino, durante la fase conclusiva della colata del 6 agosto 2004 (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle di Susa)

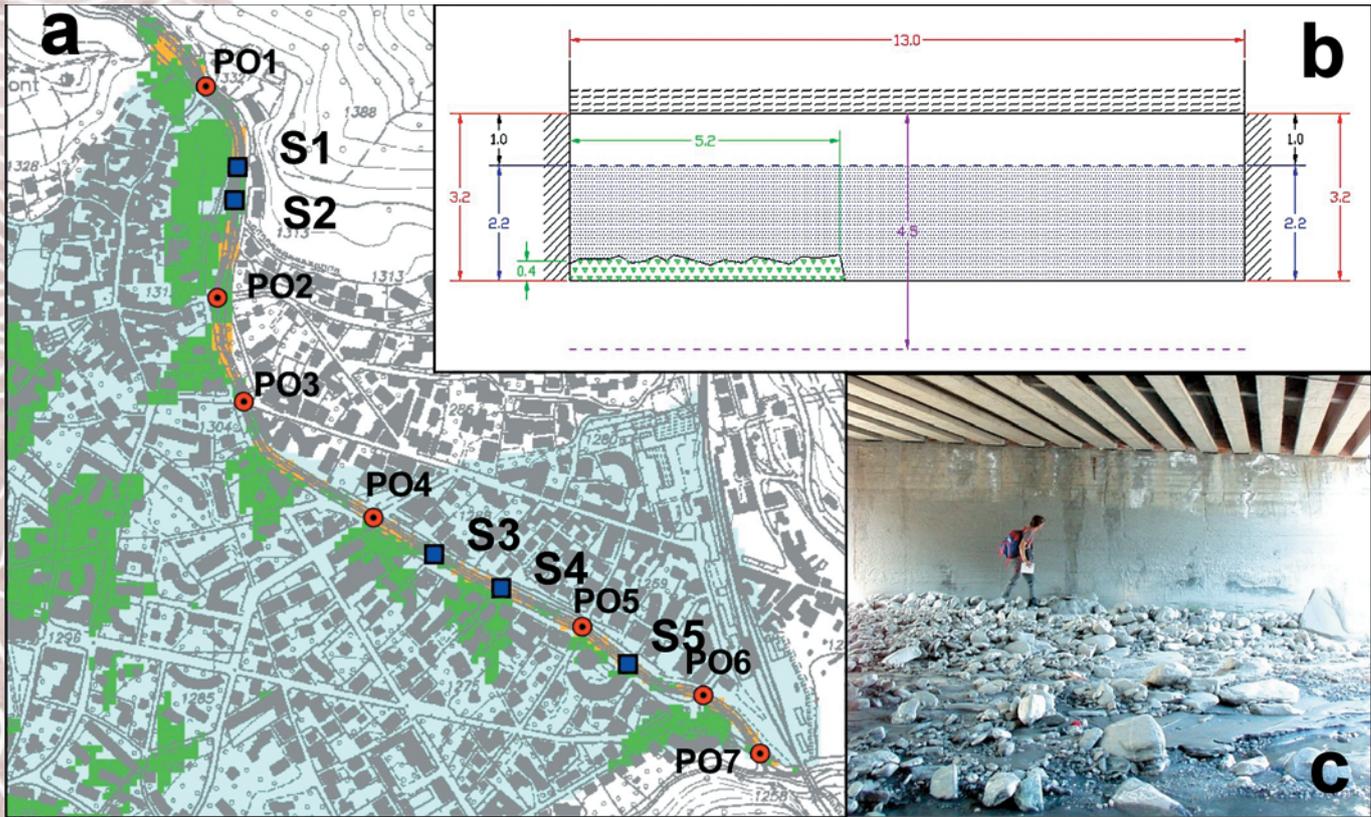


Figura 4.3.28

- a) Carta del pericolo per il conoide di Bardonecchia prodotta nel Progetto CatchRisk (AA.VV., 2005a; 2005b): arancio = pericolo elevato, verde = pericolo moderato, azzurro = pericolo basso. Sono, inoltre, evidenziati i punti in cui sono state rilevate le sezioni di transito della colata (PO: attraversamenti, S: tratti rettilinei).
- b) Particolare della sezione del ponte PO4: in blu il livello raggiunto dalla colata del 6 agosto 2004; in fucsia l'altezza dell'infradosso da fondo alveo misurata nel febbraio 2001; in verde i lembi di depositi terrazzati osservati in occasione delle misurazioni 2004.
- c) Dettaglio fotografico delle tracce della colata rilevate in sinistra idrografica sotto l'impalcato dell'attraverso PO4. Dal confronto delle condizioni dell'alveo in conoide tra la situazione post-evento 6 agosto 2004 e del febbraio 2001 (Regione Piemonte, 2001), si evince che le riduzioni della luce degli attraversamenti aumentano progressivamente da monte verso valle: riduzione delle sezioni di deflusso < 20% per PO1, PO2, PO3, PO4; riduzione della sezione di deflusso di circa il 50% in corrispondenza del ponte PO5 e > 80% in PO6 e PO7

Le tracce di percorrenza della colata sono state rilevate in una serie di sezioni trasversali sia nel canale principale del conoide, in corrispondenza dei manufatti di attraversamento e di alcuni tratti canalizzati subrettilinei (rispettivamente PO ed S in figura 4.3.28), sia nell'alveo dei sottobacini dei rii Gautier e Merdovine, in corrispondenza di tratti in curva.

In conoide è stata ricavata una portata unitaria di picco di circa $6 \text{ m}^2/\text{s}$, corrispondente ad una portata di picco complessiva (solido-liquida) di circa $75 \text{ m}^3/\text{s}$, sulla base dei seguenti dati:

- la profondità di flusso media relativa alla portata di picco è compresa tra 2.2–2.5 m con una

larghezza media dell'alveo nel tratto considerato di 13 m;

- l'inclinazione dell'alveo ha un valore medio < 6° ;
- la velocità della colata, per la quale non sono disponibili precise rilevazioni in corso d'evento, è ipotizzabile fosse compresa tra 2 m/s e 3 m/s, in considerazione del tipo di processo considerato e dei valori di pendenza dell'alveo in conoide (Rickenmann & Zimmermann, 1993).

Lungo le aste tributarie dei rii Gautier e Merdovine, invece, è stato misurato il sovrizzo in curva della colata al fine di effettuare stime di velocità in base ai metodi proposti da Johnson & Rodine (1984) e da Hungr *et al.* (1984): entrambi i metodi sono basati sulla differenza di altezza della colata misurata sulle due sponde in un tratto curvo (infatti, per effetto della forza centrifuga la colata in corrispondenza delle curve raggiunge un'altezza maggiore sulla sponda esterna rispetto a quella raggiunta in sponda interna). In base ai dati di sovrizzo, del raggio di curvatura della linea che individua

TABELLA 4.3.9 DATI DI VELOCITÀ PER I RII COMBA GAUTIER E MERDOVINE

Rio Comba Gautier*		Rio Merdovine**	
$i = 14^\circ$	$R_c = 18 \text{ m}$	$i = 8^\circ$	$R_c = 13 \text{ m}$
	$v [1] = 5.5 \text{ m/s}$		$v [1] = 3.6 \text{ m/s}$
	$v [2] = 3.4 \text{ m/s}$		$v [2] = 2.4 \text{ m/s}$

* a monte della confluenza nel Torrente Frejus

** a monte della confluenza con il Rio Comba del Frejus

[1] Johnson & Rodine (1984) e [2] Hungr *et al.* (1984)

il centro alveo (R_c) e della inclinazione del canale (i), si può dedurre la velocità della colata (in m/s). Sulla base dei valori medi di velocità calcolati (**tabella 4.3.9**), la portata di picco complessiva calcolata per i due tributari considerati, risulta di 105 m³/s circa per il Rio Comba Gautier e di 78 m³/s circa per il Rio Merdovine.

Stima delle componenti solido/liquida

Partendo dai dati di portata di picco complessiva, è stata effettuata una suddivisione indicativa della portata nelle componenti liquida e solida in riferimento ad un approccio computazionale che mette in relazione la portata liquida e la portata totale attraverso valori di concentrazione volumetrica (Takahashi, 1981).

La massima portata totale (solida e liquida) della colata Q_d (m³/s) è correlata alla portata liquida dalla seguente relazione:

$$Q_d = Q_l \cdot [c^* / (c^* - c_v)] \quad (4.3.2)$$

dove:

Q_l è la portata massima liquida [m³/s];

c_v è la concentrazione volumetrica di equilibrio dei solidi (fini e grossolani) nella corrente in moto uniforme;

c^* è la concentrazione volumetrica della fase solida di massimo impaccamento ($c^* = 0.8$ sul conoide del Rio Frejus e $c^* = 0.7$ sul Rio Gautier e Merdovine).

La concentrazione volumetrica dei solidi grossolani nella corrente detritica *matura* in moto uniforme c_{df} è fornita dall'equazione di Takahashi, confermata sperimentalmente da vari Autori, è la seguente:

$$c_{df} = \rho_m \cdot \tan \theta / (\rho_s - \rho_m) \cdot (\tan \varphi - \tan \theta) \quad (4.3.3)$$

dove:

θ è l'inclinazione del terreno nel tratto considerato [°];

φ è l'angolo di attrito statico del terreno [°];

ρ_s è la densità dei solidi grossolani (di norma 2600-2700 kg/m³);

ρ_m è la densità del fluido interstiziale, costituito da acqua e sedimenti fini [kg/m³].

Nelle colate detritiche *immature*, la concentrazione di trasporto c_q (rapporto tra portata solida e portata totale della corrente detritica) può essere stimata in base ad una formula empirica proposta dallo stesso Takahashi (1981), per cui:

$$c_q = 6.7 \cdot (c_{df})^2 \quad (4.3.4)$$

Vista la notevole difficoltà nella corretta valutazione dei parametri di *input* (la variazione anche minima di alcuni di questi parametri influenza in modo sensibile le portate), i risultati esposti sono da con-

TABELLA 4.3.10 RAPPORTI RELATIVI TRA PORTATA COMPLESSIVA (100%) E COMPONENTI LIQUIDA E SOLIDA

	Rio Gautier	Rio Merdovine	Rio Frejus
Q liquida	20%	55%	75%
Q solida	80%	45%	25%

siderarsi puramente indicativi per il confronto con quanto ricavato dalla modellazione idraulica. Le portate massime complessive risultano in queste ipotesi scomposte nelle due componenti – portata liquida e solida – mediamente attestata intorno ai valori percentuali riportati in **tabella 4.3.10**.

Alla luce delle analisi e delle stime effettuate, è importante sottolineare che le tracce osservate sono relative alla portata di picco mentre i valori che caratterizzano la colata (c^* , φ , ρ_m) sono stati assegnati considerando l'evoluzione complessiva della stessa. La distinzione tra la componente liquida e quella solida dipende in modo determinante dalla pendenza del canale, dalla granulometria del materiale solido e dalla densità e dal grado di addensamento del miscuglio della colata. In particolare il valore della portata solida aumenta all'aumentare del valore di pendenza del canale e del valore di densità attribuito al fluido interstiziale della colata e al diminuire del valore dell'angolo di attrito statico del materiale solido mobilizzabile e del coefficiente di massimo impaccamento della colata (c^*).

Considerazioni sulle portate liquide

Dal confronto tra le portate liquide calcolate con il metodo indiretto di Takahashi ed il modello idrologico FEST, in tutte le sezioni prese in considerazione risulta una notevole discrepanza tra i valori. In particolare, sul conoide del Rio Frejus (in prossimità dell'apice) la portata liquida stimata con il metodo indiretto è superiore di circa tre volte rispetto a quella dedotta con il modello FEST; mentre sul Rio Merdovine e sul Rio Gautier le portate stimate con il metodo indiretto sono superiori di circa 7 volte rispetto alle portate calcolate utilizzando i dati delle stazioni pluviometriche e di 10 volte circa rispetto alle portate calcolate mediante i dati delle mappe radar. Tale situazione è interpretabile, oltre che per problemi connessi all'applicazione delle formule empiriche nel metodo indiretto, agli effetti di amplificazione che il processo torrentizio subisce in corso d'evento che conduce ad una sovrastima delle portate.

Infatti, il carattere impulsivo del *trasporto solido iperconcentrato* comporta estrema variabilità temporale e spaziale dei processi, con ondate di piena violente ed intense alternate a momenti con portate minori, come osservato in occasione dell'evento dell'agosto 2004. Tali riflessioni hanno importanti ricadute sulla valutazione della *magnitudo* dell'evento di cui non è possibile definire con precisione il valore (ordine di grandezza di alcune migliaia di metri cubi).



4.3.6 Considerazioni conclusive

In conclusione, sulla base dei risultati conseguiti, è necessario puntualizzare alcuni aspetti importanti relativi sia alle caratteristiche specifiche dell'evento dell'agosto 2004, sia agli elementi che in generale condizionano l'innesco e l'evoluzione dei fenomeni di colata nel bacino del Rio Frejus. In particolare, pur lasciando aperte alcune importanti questioni, le analisi hanno fornito interessanti spunti di riflessione per l'affinamento dei metodi di previsione e prevenzione di tali fenomeni.

La colata dell'agosto 2004, pur avendo destato preoccupazione per i danni che si sono verificati, non ha certo rivestito carattere di eccezionalità in quanto si inserisce in un quadro del dissesto ormai ben noto. Infatti, le notizie storiche ed i documenti tecnici più recenti indicano chiaramente che tali fenomeni si verificano con elevata frequenza, soprattutto nel periodo estivo (da maggio a settembre), procurando ogni volta danni di varia gravità.

L'analisi delle altezze di pioggia registrate nel corso degli eventi che hanno accompagnato l'innesco dei fenomeni, sia per l'evento 2004 sia per quelli storici, fornisce un quadro nel quale, in relazione ai sistemi di riferimento delle piogge critiche adottate a livello regionale, le precipitazioni del giorno d'innesco appaiono poco significative come elemento determinante.

Durante le osservazioni in fase di monitoraggio dell'agosto 2004, solamente la pioggia del giorno 3 ha raggiunto la soglia pluviometrica di moderata criticità adottata nel Sistema di Allerta Regionale. L'analisi statistica ha evidenziato per tale data una pioggia con tempo di ritorno compreso tra 3 e 8 anni, mentre le precipitazioni del giorno 6, in cui si è verificata la colata, sono di poco superiori alla pioggia del giorno medio piovoso.

D'altro canto, il bacino del Frejus presenta evidenti elementi geologici e geomorfologici predisponenti all'innesco ed alla propagazione delle colate, il principale dei quali risulta essere la presenza di imponenti accumuli detritici in diretta interferenza con il reticolo idrografico. Le analisi condotte per la caratterizzazione delle aree sorgenti della

colata dell'agosto 2004 hanno evidenziato un quadro tipico dei bacini alpini impostati nelle unità di calcescisti, in cui i versanti risultano spesso interessati da estesi fenomeni gravitativi. Tali fenomeni, di differente tipologia e grado evolutivo, sono infatti i principali responsabili della produzione di materiale detritico presente sia in alveo sia sulle sponde dei corsi d'acqua. Ciò è verificabile principalmente lungo le aste torrentizie dei sottobacini Merdovine, Comba Gautier e Comba del Frejus, incise all'interno o ai margini di imponenti accumuli di origine gravitativa.

L'origine principale delle colate che interessano il bacino in esame risulta pertanto essere all'interno degli alvei, spesso intasati da abbondanti materiali sciolti in cui prevale la componente fine (limoso-sabbiosa), derivante dai processi di disgregazione ed alterazione dei calcescisti ricchi in livelli filladici. Più in generale le principali aree di innesco sono localizzate dove si osservano contemporaneamente elevati valori di: (1) volumi di materiale detritico, (2) pendenza delle aste torrentizie e (3) aree sottese contribuenti al deflusso (analisi dell'area di drenaggio). Meno significativo pare, invece, l'innesco di colate detritiche a partire dai fenomeni gravitativi interessanti le coperture superficiali sui versanti.

In questo contesto, affinché si inneschino le colate, è necessario un apporto idrico sufficientemente elevato ed improvviso in grado di mobilitare repentinamente grandi quantitativi di materiale, prelevati in più punti lungo il corso d'acqua. È possibile ipotizzare che l'energia per la mobilitazione del materiale sia fornita dallo svuotamento repentino di sbarramenti temporanei che si possono produrre lungo l'alveo. Tali sbarramenti possono prodursi a monte di fenomeni gravitativi, di precedenti fenomeni di colata detritica oppure ancora di accumuli nivali. L'evoluzione di queste piene improvvise e della propagazione verso valle della colata, con la potenziale formazione di ulteriori sbarramenti e rilasci repentini, amplifica gli effetti del fenomeno torrentizio lungo il suo percorso. Le caratteristiche geometriche e morfologiche del bacino, unitamente alla presenza di opere di sistemazione, condizionano l'equilibrio dei processi erosivo-deposizionali con importanti conseguenze in conoide, dove risiedono i principali elementi a rischio.

Particolarmente significative sono risultate le osservazioni in corso d'evento ed i rilevamenti effettuati nei giorni seguenti che hanno permesso di verificare che le caratteristiche reologiche della colata del 2004 si sono modificate lungo l'asta torrentizia, passando da una corrente detritica matura (nelle parti alte del bacino) ad una corrente detritica inerziale ibrida pietroso-fangosa (in conoide). In altri termini, il fenomeno si è evoluto passando da un processo più ricco in componente solida ad un processo in moto turbolento a componente liquida prevalente. Tale evoluzione è legata alle dimensioni del bacino (con estensione area superiore ai 22 km²) e dell'asta percorsa dalla colata (lunga circa 8 km, di cui gli ultimi 2 km a monte del conoide con inclinazione inferiore ai 10°), che favoriscono la deposizione del materiale trasportato. Questo aspetto viene particolarmente enfatizzato in corrispondenza della forra presente a monte del conoide, in cui la ridotta sezione di deflusso (non oltre 1.5-2 m) e la bassa inclinazione (circa 5°) diminuiscono la velocità della colata e la granulometria del materiale in transito.

In base alle considerazioni sopraesposte, la probabilità temporale di questi eventi subisce l'influenza di numerose variabili che, al momento attuale, sono di difficile valutazione e quantificazione. Infatti, per la comprensione dei meccanismi di innesco delle colate è necessario considerare sia le precipitazioni sia le caratteristiche del bacino in un modello assai complesso e dinamico che ha validità esclusivamente per il bacino indagato. D'altronde, anche nella vasta letteratura disponibile sull'argomento, non è possibile reperire una metodologia univoca ai fini previsionali, valida su estesi ambiti territoriali; anzi, la maggior parte di questi lavori evidenzia la necessità di approfondire accuratamente la conoscenza del bacino, l'analisi degli eventi storici ed il monitoraggio delle cause innescanti.

In tale contesto, sono in fase di predisposizione da parte di Arpa Piemonte alcuni progetti volti a dettagliare i legami tra cause predisponenti e scatenanti nei fenomeni di colata, al fine di poter valutare la fattibilità di un approccio di tipo previsionale sull'instaurarsi di condizioni critiche.

Allo stato attuale delle conoscenze, un'azione possibile ai fini di un'adeguata azione preventiva per

la riduzione dei rischi nel territorio di Bardonecchia è la predisposizione di un sistema di preannuncio locale basato su una rete di strumenti (idrofondi, geofoni, ecc.) in grado di monitorare la propagazione di colate già innescate. Infatti, tale sistema è in grado di rilevare l'altezza idrometrica e la velocità della colata e, sulla base di parametri preventivamente calcolati e dei tempi di percorrenza stimati, di attivare sistemi acustici e visivi di allerta (ad esempio segnali semaforici ad impedire il traffico sugli attraversamenti).

Ciò ovviamente non può sostituire la necessaria opera di manutenzione degli alvei che principalmente deve riguardare il mantenimento e ripristino delle opere di sistemazione idraulica (briglie, soglie e difese spondali) e la pulizia del canale in conoide, soprattutto in corrispondenza degli attraversamenti.

Contributi

Si ringrazia il dottor Nicola Quaranta per la preziosa collaborazione fornita.

Bibliografia

AA.VV. (2005a), *Final Report*. Programma Interreg III B Spazio Alpino, Progetto CatchRisk: Mitigation of Hydrogeological risk in alpine catchments. Regione Lombardia.

AA.VV. (2005b), *Guidelines*. Programma Interreg III B Spazio Alpino, Progetto CatchRisk: Mitigation of Hydrogeological risk in alpine catchments. Arpa Piemonte.

Arpa Piemonte (2004a), *Il Progetto IFFI in Piemonte: Inventario dei fenomeni franosi in Italia*. Archivio Centro regionale per le ricerche territoriali e geologiche (<http://www.webgis.csi.it/arpagis>).

Arpa Piemonte (2004b), *Rapporto sui fenomeni di trasporto in massa dei rii Fenils e Frejus del 06-07 agosto 2004*. A cura dell'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale e del Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, Torino, Pubblicazioni Arpa Piemonte; pp. 28 più allegati.

Bingner R.L. & Theurer F. D. (2001), *AnnAGNPS TECHNICAL PROCESSES. Documentation, Version 2*.



- Burlando P., Oliva G. & Rosso R. (1997), *RAP Rain-fall Analysis Package. Valutazione automatica del rischio idrometeorologico sul territorio*, Milano.
- CIMA [Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale] (2001), *Realizzazione di un atlante delle piogge intense sulle Alpi occidentali italo-svizzere*, Genova.
- Cremonini R., Bechini R., Barbero S. & Rabuffetti D. (2003), *Use of weather radar data in Regione Piemonte for hydrological risk management*, ECAM.
- Cunge J.A. (1969), *On the subject of a flood propagation computation model*, Journal of Hydraulic Research.
- De Michele C. & Rosso R. (1999), *La valutazione delle piene nell'Italia Nord-Occidentale: bacino padano e Liguria tirrenica*, CNR-GNDCI.
- Ghilardi P., Natale L. & Savi F. (1999), *Il rischio idraulico nelle aree di conoide*, a cura della Direzione Generale Presidenza, Servizio Programmazione e Sviluppo della Regione Lombardia.
- Giandotti M. (1934), *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, "Memorie e studi idrografici", Pubbl. 2 del Servizio Idrografico Italiano, vol. VIII, pp. 107.
- Hungr O., Morgan G.C. & Kellerhals R. (1984), *Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures*. Can. Geotech J., vol. 21, pp. 663-677.
- Johnson A.M. & Rodine J.R. (1984), *Debris flow*. In Brunnsden D. & Prior D.B. [eds] (1984), *Slope instability*. Chichester, Wiley; pp. 257-362.
- Mancini M. (1990), *La modellazione della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e dalla scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento*, Tesi di dottorato, Politecnico di Milano.
- Servizio Geologico d'Italia (2002), *Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 Foglio 132-152-153 Bardonecchia*, Servizio Geologico Nazionale, Ente realizzatore Regione Piemonte – Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione.
- Polino R., Dela Pierre F., Borghi A., Carraro F., Fioraso G. & Giardino M. [a cura di] (2002), *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 132-152-153 Bardonecchia*, Servizio Geologico d'Italia, Ente realizzatore Regione Piemonte – Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione.
- Ponce V.M. & Chaganti P.V. (1994), *Variable – parameter Muskingum – Cunge method revisited*, Journal of Hydrology, vol. 162, pp. 433-439.
- Regione Piemonte (2001), *Progetto Raccolta e organizzazione di dati territoriali; valutazione di pericolosità e rischio dei fenomeni naturali e predisposizione di piani comunali di Protezione Civile*, Programma Interreg IIC Italia – Francia.
- Rickenmann D. & Zimmermann M. (1993), *The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis*, Geomorphology, vol. 8, pp. 175-189.
- Takahashi T. (1981), *Estimation of potential debris flow hazardous zones: soft countermeasures for a disaster*, Journal of Natural Disaster Sciences, vol. 3(1), pp. 57-59.
- Tarboton D.G. (1997), *A New Method For The Determination Of Flow Directions And Upslope Areas In Grid Digital Elevation Models*. Water Resources Research, American Geophysical Union, vol. 33(2), pp. 309-319.
- Tarboton D.G. (2002), *Some Potential Terrain Analysis Tools for ArcGIS*, Presentation at Symposium on Terrain Analysis for Water Resources Applications, The University of Texas at Austin, December 16-18, 2002.
- Varnes D. J. & IAEG [Int. Ass. of Eng. Geology Commission on Landslides and other Mass Movements] (1984), *Landslide hazard zonation; a review of principles and practice*. Paris, UNESCO.