

3.5 La previsione delle frane

Studi condotti negli ultimi anni hanno consentito di classificare i fenomeni franosi caratteristici del Piemonte individuando le tipologie elencate di seguito (Progetto IFFI *Inventario Fenomeni Franosi in Italia*, 2004).

3.5.1 Principi e metodi per la previsione dei fenomeni franosi

Il criterio di classificazione è basato sull'accorpamento dei fenomeni per tipologia di movimento:

- crolli e ribaltamenti;
- colamenti rapidi;
- scivolamenti traslativi e rotazionali;
- fenomeni complessi;
- colamenti lenti;
- deformazioni gravitative profonde di versante.

La stabilità di un versante dipende dalle condizioni geo-strutturali dell'ammasso roccioso o geotecniche dei terreni ed è talora influenzata in maniera anche significativa dall'azione di fenomeni che ne condizionano o ne determinano l'insorgenza, quali precipitazioni, fusione del manto nevoso, sollecitazioni sismiche, escursioni termiche (cicli di gelo e disgelo), erosione fluviale al piede di un versante, modificazioni incaute del territorio da parte dell'uomo, ecc.

In generale non esiste una corrispondenza biunivoca tra fenomeni franosi e cause d'innescò, in quanto l'evoluzione di una frana può essere condizionata da differenti fattori che frequentemente concorrono alla compromissione della stabilità di un versante, attraverso interazioni complesse. In alcuni casi tuttavia può essere individuata una connessione diretta e traducibile in termini quantitativi tra fenomeno franoso e cause d'innescò, come avviene ad esempio tra colamenti rapidi e piogge; tale relazione appare più complessa nel caso degli scivolamenti traslativi in roccia tipici delle Langhe piemontesi e nel caso dei colamenti lenti in formazioni argillose tipici di certi settori della provincia di Alessandria ma incerta nel caso dei crolli.

Un primo aspetto dell'attività previsionale consiste, ove possibile, nell'individuazione e quantificazione delle cause d'innescò e nella comprensione delle circostanze nelle quali la loro azione è tale da compromettere la stabilità del versante. Quando la complessità del fenomeno renda problematica l'individuazione delle cause, l'attività previsionale può utilizzare indicatori correlati alle caratteristiche evolutive del fenomeno.

Solitamente la previsione si esprime in termini di probabilità di accadimento di un determinato fenomeno ed è caratterizzata da tre componenti fondamentali che devono essere analizzate unitamente: lo spazio, il tempo e l'intensità. A seconda delle finalità, ciascuna componente può assumere maggiore rilevanza rispetto alle altre: in attività di prevenzione, quali la pianificazione territoriale e la mitigazione, risulta fondamentale la previsione spaziale e di intensità; in attività di protezione civile risulta fondamentale anche la componente temporale.

In letteratura, sono noti diversi tipi di metodi per la valutazione della stabilità/pericolosità dei versanti con caratteristiche che differiscono per complessità, numero di parametri utilizzati ed ambito territoriale di validità. Un elenco dei metodi utilizzati da Arpa Piemonte, descritti in dettaglio nei paragrafi che seguono, è riportato in **tabella 3.5.1**. Il grado di complessità e il numero di parametri sono espressi in forma relativa. Per ambito territoriale di validità si intende la risoluzione spaziale della previsione: un ambito *puntuale* si riferisce alla capacità della previsione di localizzare singoli fenomeni franosi; un ambito *areale* si riferisce invece alla proprietà del metodo di localizzare, più genericamente, le aree soggette ad instabilità, ciascuna caratterizzata da un contesto omogeneo, senza tuttavia riuscire a discernere, all'interno di esse, singoli siti di innescò.

TABELLA 3.5.1 METODI DI PREVISIONE DELLA STABILITÀ DEI VERSANTI UTILIZZATI DA ARPA PIEMONTE

METODI	COMPLESSITÀ	NUMERO DI PARAMETRI	AMBITO TERRITORIALE DI VALIDITÀ
Metodo empirico - pluviometrico di I ordine*	Bassa	Basso	Areale
Metodo empirico - pluviometrico di II ordine**	Medio	Medio	Areale
Metodo empirico - idrologico	Alta	Moderato	Areale
Metodo statistico	Alta	Alto	Puntuale
Metodo meccanico - idrologico	Media	Medio	Puntuale

* I ordine: il metodo considera solo la variabile pioggia

** II ordine: il metodo considera la pioggia ed altre variabili del contesto fisico

L'applicazione dei metodi ai diversi contesti del territorio regionale dipende sia dalla finalità che la previsione intende perseguire, sia dalle caratteristiche del fenomeno franoso. Ad esempio, le previsioni a fini di protezione civile, oltre a richiedere valenza puntuale, qualora siano riferite a singoli fenomeni noti e particolarmente critici, possono anche avere valenza areale, qualora, ad esempio, si riferiscano ai colamenti rapidi che interessano in modo generalizzato ed indifferenziato determinati settori montuosi e collinari.

È possibile estendere l'applicazione dei metodi utilizzati da Arpa Piemonte, in alcune aree campione (puntualmente su un singolo fenomeno, o arealmente su gruppi di fenomeni con caratteristiche simili), ad altri ambiti territoriali in cui si disponga del medesimo dettaglio informativo.

Al riguardo bisogna tenere conto che i metodi per i quali è necessario disporre di un elevato numero di parametri e di una conoscenza approfondita dell'ambiente di sviluppo del fenomeno, possono essere applicati prevalentemente in ambiti puntuali o arealmente circoscritti; viceversa, i metodi per i quali è sufficiente un numero basso di parametri possono essere impiegati più facilmente in ambiti territoriali estesi. D'altro canto, l'adozione di metodi più sofisticati o che richiedono un maggior numero di parametri consente di fornire indicazioni previsionali potenzialmente più accurate.

3.5.2

Metodo empirico-pluviometrico

3.5.2.1

Descrizione del metodo

Il metodo consiste in un approccio semplificato volto all'individuazione di una correlazione tra la pioggia e l'innescamento del fenomeno franoso, prescindendo dalla conoscenza delle leggi fisiche che governano i meccanismi di instabilità dei versanti.

Qualora il metodo consideri esclusivamente le piogge, non avvalendosi di un'analisi approfondita di tutti gli elementi di natura morfologica, di uso e copertura del suolo, nonché dei caratteri geologici, geometrici ed idrologici del versante coinvolto, consente di fissare soglie che nella letteratura scientifica sono definite di *I ordine*.

Si definiscono invece di *II ordine* qualora il metodo consideri altre variabili del contesto fisico, valutando come le piogge critiche varino in base alle caratteristiche dell'ambiente di sviluppo del fenomeno.

La descrizione del metodo può essere strutturata distinguendo tra raccolta ed elaborazione dei dati. La raccolta del dato coinvolge aree in cui:

- in concomitanza con eventi pluviometrici inten-

si si sia innescato un numero significativo di fenomeni franosi;

- sia disponibile l'informazione circa la data e l'ora di innescamento delle frane;
- siano presenti stazioni pluviometriche sufficientemente prossime ai fenomeni franosi, con dati caratterizzati da completezza e sufficiente dettaglio temporale.

Per quanto riguarda l'elaborazione, dato un evento pluviometrico nel corso del quale si è innescato un fenomeno franoso, il metodo si basa sulla:

- individuazione di un pluviometro situato in prossimità del fenomeno franoso;
- individuazione della data e dell'ora di innescamento del fenomeno franoso;
- individuazione della data e dell'ora di inizio dell'evento pluviometrico e determinazione dell'intervallo critico compreso tra queste e l'innescamento del fenomeno franoso, nell'ipotesi che sia significativa la pioggia a scala d'evento; oppure, utilizzando un approccio più complesso, determinazione del tempo d'influenza delle precipitazioni sulla stabilità del versante, caratteristico di ciascun fenomeno, nell'ipotesi che sia significativa la pioggia ad una scala maggiore di quella dell'evento;
- determinazione della pioggia critica caduta nell'intervallo di tempo definito al punto precedente. La pioggia critica può essere espressa per mezzo di grandezze pluviometriche quali pioggia con assegnato tempo di ritorno, massimi di pioggia, pioggia cumulata, intensità oraria media. Tali grandezze, per essere più efficacemente confrontate tra ambiti territoriali diversi, possono essere normalizzate, cioè rapportate ad altre grandezze pluviometriche rappresentative del comportamento medio di un certo ambito territoriale, come ad esempio la Precipitazione Media Annuale (PMA).

Il metodo empirico pluviometrico solitamente associa la probabilità $P[L_t]$ che un fenomeno franoso L_t si innesci all'istante t ad una funzione $Y(t)$ dipendente dalle precipitazioni che hanno preceduto l'istante t :

$$P[L_t] = f[Y(t)] \quad (3.5.1)$$

Per i colamenti rapidi, la funzione $Y(t)$ viene frequentemente identificata con l'intensità oraria media I mentre il tempo t con la durata delle precipitazioni D ed è espressa con la seguente formulazione:

$$Y(t) \rightarrow I = a \cdot D^b \quad (3.5.2)$$

nella quale a e b sono costanti che dipendono dalle caratteristiche dell'ambito indagato (**figura 3.5.1**).

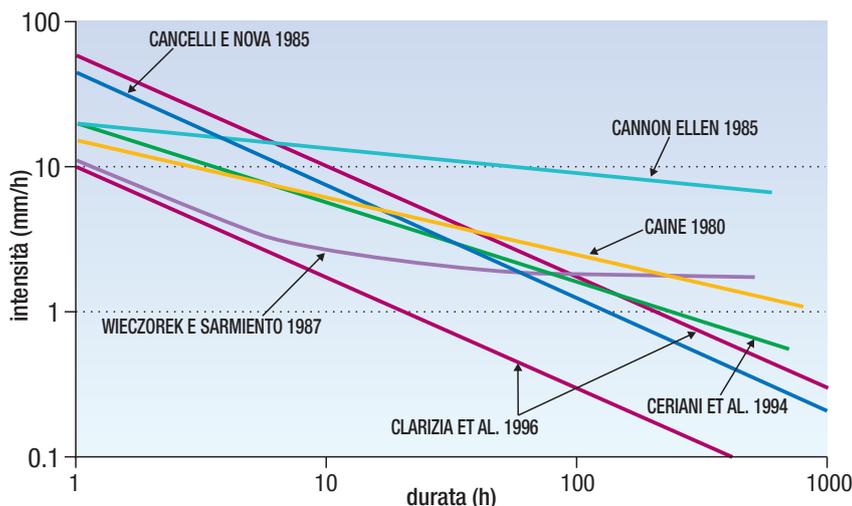


Figura 3.5.1
Rappresentazione
di alcune tra
le correlazioni
disponibili in letteratura
sul piano
Intensità vs Durata

3.5.2.2 Considerazioni sull'applicabilità del metodo

Il metodo empirico pluviometrico basato su soglie di I di II ordine fornisce buoni risultati se applicato a quelle tipologie di frana il cui innesco è direttamente correlato alle precipitazioni. Rientrano in questa categoria i colamenti rapidi, ossia quelli che interessano le coperture detritico-colluviali ed eluvio-colluviali per cui i meccanismi di circolazione idrica sub-superficiale non sono condizionati da situazioni idrogeologiche complesse.

I colamenti rapidi per saturazione e fluidificazione della coltre superficiale sono quelli che meglio rispondono ad entrambi gli approcci, mentre per fenomeni più profondi e/o con dinamiche più articolate si ottengono risultati incoraggianti esclusivamente con il metodo empirico basato su soglie di II ordine che, come specificato nei paragrafi precedenti, tengono conto di più fattori come le caratteristiche geologiche, idrogeologiche, morfometriche, ecc. Per altre tipologie di fenomeni come ad esempio le frane complesse, i crolli, i colamenti lenti e gli scivolamenti rotazionali che coinvolgono porzioni di substrato, l'applicabilità di entrambe le metodologie risulta molto problematica ed in alcuni casi impossibile, data la difficoltà di comprendere appieno il ruolo che la pioggia svolge, indirettamente, nel concorrere all'instabilità di tali fenomeni.

Il contenuto informativo a corredo di un fenomeno franoso richiede una certa consistenza affinché sia garantita la fattibilità delle analisi volte alla determinazione delle soglie di innesco. La precisione del dato cronologico è indispensabile per determinare le esatte quantità di pioggia critica che, a seconda della tipologia della frana, può essere rappresentata dai valori registrati nel corso dell'evento, o nel corso di un periodo più lungo, dipendente dal tempo d'influenza caratteristico del fenomeno.

Per la maggior parte degli inneschi noti verificati-

si in Piemonte dal secolo scorso fino ad oggi, il dato orario è sconosciuto ed è raramente disponibile quello giornaliero, in particolar modo per gli inneschi più antichi. Un altro problema che si presenta per inneschi di vecchia data è imputabile alla qualità del dato di pioggia fornito dall'antiquato sistema di registrazione delle piogge e alla ridotta densità della rete pluviometrica utilizzata fino alla seconda metà degli anni Ottanta. Contrariamente alla rete pluviometrica moderna, il dato veniva acquisito manualmente con frequenza di lettura giornaliera o tramite pluviografi a pennino che ne rendono l'utilizzo difficoltoso a fronte della necessità di analizzare intere serie storiche per numerosi pluviometri.

Inoltre, malgrado l'elevata densità delle reti pluviometriche attuali sul territorio regionale, non è sempre affidabile l'attribuzione di un dato di pioggia misurato in un punto ad una frana verificata nel suo intorno, data la variabilità spaziale delle precipitazioni. L'affidabilità delle correlazioni tra grandezze pluviometriche e punti di innesco di fenomeni franosi diminuisce in funzione della distanza tra il pluviometro di riferimento e il sito in frana ed è condizionata anche dalla componente orografica. Tali difficoltà risultano meno vincolanti per eventi pluviometrici caratterizzati da precipitazioni prolungate e diffuse, mentre possono rendere problematica l'analisi per precipitazioni localizzate, brevi ed intense.

Per ovviare ai limiti legati alla registrazione puntuale del dato di pioggia operata dalle stazioni pluviometriche, viene in aiuto il radar meteorologico, in grado di osservare e quantificare in modo distribuito le precipitazioni. Incrociando i dati dei pluviometri con quelli del radar, è possibile ottenere un'informazione più affidabile sulla distribuzione delle piogge, salvo per quelle aree che costituiscono una zona d'ombra per il segnale radar (blocco del segnale da parte degli orogeni).

La determinazione del tempo d'influenza delle piogge sulla stabilità dei fenomeni richiederebbe la conoscenza dei parametri idrogeologici, a loro volta dipendenti da numerosi fattori legati alle caratteristiche dei depositi, alla circolazione idrica profonda, al tipo di vegetazione e alle caratteristiche intrinseche dei versanti (morfometria, concavità-convessità, esposizione, ecc.). Tuttavia, la mancanza di dati sufficientemente dettagliati impone che l'identificazione del tempo d'influenza avvenga mediante un'analisi incrociata delle serie storiche degli inneschi e delle piogge.

Alle piogge, in situazioni idrogeologiche particolari (ambienti carsici, idrotermali, periglaciali o ambienti caratterizzati da complessi sistemi multifalda, ecc.) si aggiungono altre tipologie di apporti idrici difficilmente quantificabili che possono rendere talvolta subordinato il ruolo delle precipitazioni nell'innesco dei fenomeni franosi.

3.5.2.3

Applicazione del metodo ai fenomeni di colamento rapido

Al fine di individuare una correlazione empirica valida a livello regionale, sono stati presi in considerazione i colamenti rapidi innescatisi nel corso dei seguenti eventi pluviometrici:

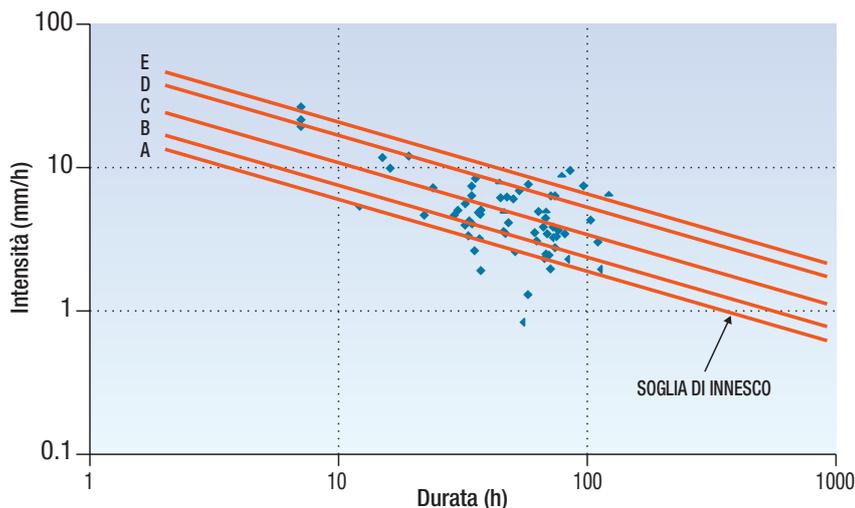
- novembre 1994, cuneese, torinese, astigiano e biellese;
- luglio 1996, Cusio;
- luglio e settembre 1998, verbano, vercellese ed alessandrino;
- aprile 2000, torinese;
- giugno 2000, cuneese e basso torinese;
- ottobre 2000, Ossola, vercellese, biellese e torinese;
- maggio 2002, Ossola, Sesia, biellese ed alessandrino;
- giugno 2002, Ossola, Sesia, biellese ed Alto Canavese;
- luglio 2002, cuneese;
- agosto 2002, Ossola ed alessandrino.

Nella **figura 3.5.2**, dove ciascun punto rappresenta la pioggia dimostratasi critica per l'innescio di un fenomeno franoso, è stata determinata una curva di interpolazione e, parallelamente a questa, con il criterio dell'inclusione parziale dei punti a percentuale predefinita, la curva che involuppa un dato numero di punti.

La scelta della percentuale più idonea da utilizzare in attività previsionali dipende dalle contrapposte esigenze di considerare da un lato, il maggior numero di casi possibili e di escludere dall'altro, i casi sporadici e poco rappresentativi di un comportamento medio.

La relazione empirica, definita in base allo studio degli eventi pluviometrici del passato, è stata associata a ciascuno dei pluviometri della rete regionale automatica, afferente al Centro Funzionale per la Previsione ed il Monitoraggio dei Rischi Naturali di Arpa Piemonte ed utilizzata per realizzare un software sperimentale di visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni (**figura 3.5.3**). L'esempio che segue mostra la valutazione del software alle ore 08:50 UTC del 04/12/2003: il colore attribuito a ciascuno dei punti-pluviometro in base ad una scala di criticità, che tiene conto della relazione empirica di cui sopra, consente di visualizzare quali intorno dei pluviometri raggiungono livelli di pioggia dimostratisi critici in passato.

Nel corso di attività di approfondimento tese alla definizione di soglie di II ordine, si è cercato di osservare se la distinzione delle piogge critiche in base a discriminanti di natura geografica, geologica, morfologica e di uso del suolo, consentisse una zonizzazione del territorio regionale tale da permettere la definizione di soglie a valenza sub-regionale. Lo studio è stato condotto sui seguenti eventi:



giugno 1992, ottobre 1992, settembre 1993, novembre 1994, luglio 1996, giugno 1998, luglio 1998, settembre 1998, aprile 2000, giugno 2000, ottobre 2000, febbraio 2002, maggio 2002, giugno 2002, luglio 2002, agosto 2002, aprile 2004, maggio 2004.

Si sottolinea come il tentativo di differenziare le soglie d'innescio, osservando la distribuzione dei punti rappresentativi delle piogge critiche su un diagramma di stabilità, necessiti di un'analisi incrociata con altre variabili del contesto fisico, che, se trattate singolarmente, forniscono un'indicazione parziale dell'influenza che esercitano sulla pioggia critica. Si riportano a titolo di esempio i risultati relativi a due elaborazioni.

Figura 3.5.2
Diagramma Intensità vs Durata
 valido per il territorio piemontese con curve a diversa percentuale di inviluppo: **A 90%, B 75%, C 50%, D 25%, E 10%**



Nel primo caso, le piogge critiche sono state cromaticamente distinte in base al substrato sulla cui copertura si sono innescati i fenomeni franosi: si osserva che i punti rappresentativi del substrato cristallino (simboli blu - Anfiboliti, Gneiss, Sieniti) occupano, rispetto alla distribuzione complessiva dei punti, la parte superiore del diagramma e che la corrispondente curva di inviluppo, valida per l'80% dei casi, ha uno scarto minimo del 45% rispetto a quella regionale di pari percentuale (**figura 3.5.4**).

Figura 3.5.3
Software sperimentale di visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni (1999).
 In giallo i pluviometri che hanno raggiunto valori di pioggia corrispondenti al 100% della soglia critica

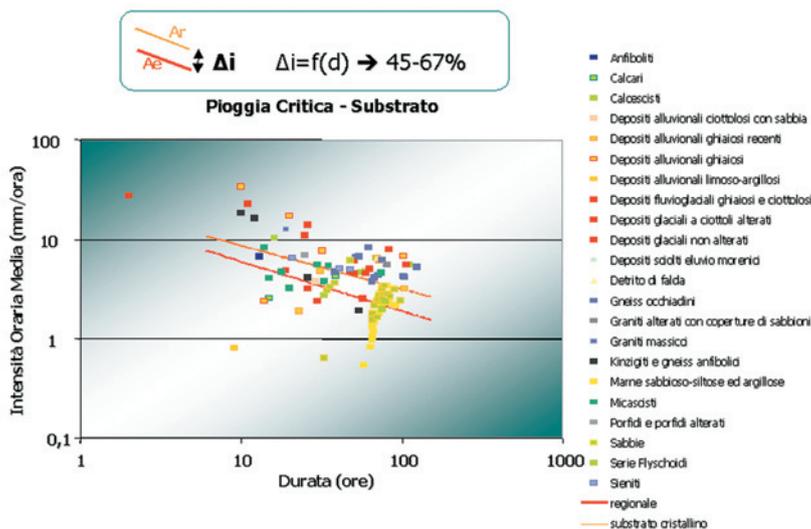


Figura 3.5.4
Diagramma di stabilità
Intensità vs Durata
con piogge critiche
distinte in base
al substrato

Nel secondo caso le piogge critiche sono state cromaticamente distinte in base all'uso del suolo dei versanti nei quali si sono innescati i fenomeni franosi (figura 3.5.5): si osserva che i punti rappresentativi delle superfici boscate (simboli viola) occupano, rispetto alla distribuzione complessiva dei punti, la parte superiore del diagramma e che la corrispondente curva di sviluppo, valida per l'80% dei casi, ha uno scarto minimo del 46% rispetto a quella regionale di pari percentuale.

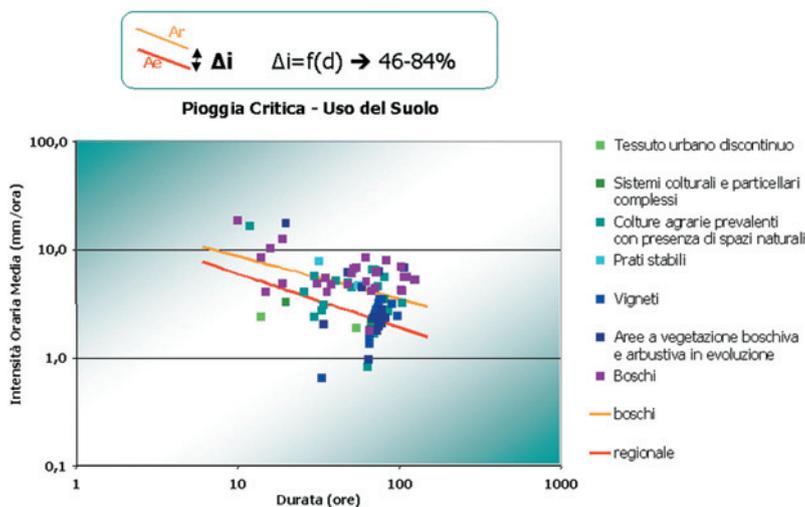


Figura 3.5.5
Diagramma di stabilità
Intensità vs Durata
con piogge critiche
distinte in base all'uso
del suolo

3.5.2.4 Applicazione del metodo ai fenomeni di scivolamento traslativo

Studi condotti negli ultimi anni nel territorio piemontese hanno messo in evidenza l'esistenza di specifiche relazioni tra l'innescò degli scivolamenti traslativi (noti anche come *scivolamenti planari*) tipici delle Langhe piemontesi ed il relativo regime pluviometrico. La storia evolutiva dei fenomeni evidenzia infatti una particolare concentrazione delle attivazioni nei periodi autunnale e primaverile, sottolineando un marcato carattere stagionale del fenomeno e suggerendo un quadro delle relazioni causa-effetto che frequentemente evi-

denza un ruolo importante delle precipitazioni. Al fine di verificare sperimentalmente e in via preliminare tale relazione, è stato selezionato un campione di frane innescatesi nel corso degli ultimi 40 anni in un'area che si estende tra le province del cuneese e dell'astigiano, soddisfacenti i seguenti requisiti:

- causa scatenante rappresentata da un evento pluviometrico;
- presenza di più attivazioni storiche;
- disponibilità di dati pluviometrici in grado di documentare il regime pluviometrico;
- alto valore informativo del sito legato all'esistenza di un'approfondita documentazione storica.

Per i casi selezionati è stata condotta un'analisi dei dati pluviometrici giornalieri aggregati su scala mensile o pluri mensile (pioggia stagionale), distinti in base allo stadio evolutivo del fenomeno (incipiente o evoluto). L'approccio sperimentale ha evidenziato significative differenze nella quantità di pioggia necessaria per attivare le frane a seconda dello stadio evolutivo considerato. In particolare, per la comparsa delle prime fratture di trazione, dei rigonfiamenti e degli avvallamenti tipici dello stadio incipiente è stato necessario un quantitativo di pioggia superiore rispetto a quello responsabile della successiva evoluzione consistente nel distacco e nella mobilitazione di blocchi lungo le superfici di scivolamento, effetti tipici dello stadio evoluto.

Nel diagramma di figura 3.5.6 compare un esempio di elaborazione empirica pluviometrica di piogge stagionali critiche. La pioggia cumulata su un periodo di quattro mesi è stata messa in relazione con il periodo dell'anno nel quale si è osservato l'innescò del fenomeno ed è stata distinta in base allo Stadio Evolutivo del fenomeno: Stadio Incipiente (simboli triangolari rossi) e Stadio Evoluto (simboli triangolari neri).

3.5.3 Metodo empirico-idrologico

3.5.3.1 Descrizione del metodo

Il metodo non analizza gli aspetti più strettamente idrogeologici e geotecnici, legati all'andamento delle falde sotterranee, o più in generale al regime delle pressioni interstiziali che intervengono nei processi di instabilità, ma si limita all'individuazione empirica di relazioni tra piogge e movimenti franosi, considerando, indirettamente, la quantità d'acqua infiltratasi nel sottosuolo prima dell'innescò.

In particolare, su due aree campione del territorio regionale, Arpa Piemonte ha utilizzato il modello idrologico *FLAIR* (*Forecasting of Landslides Induced by Rainfalls*), proposto da Sirangelo & Versace (1992) e successivamente sviluppato dagli stessi autori in altri lavori più recenti (Sirangelo et al., 1996; Versace et al., 2002), che consente di

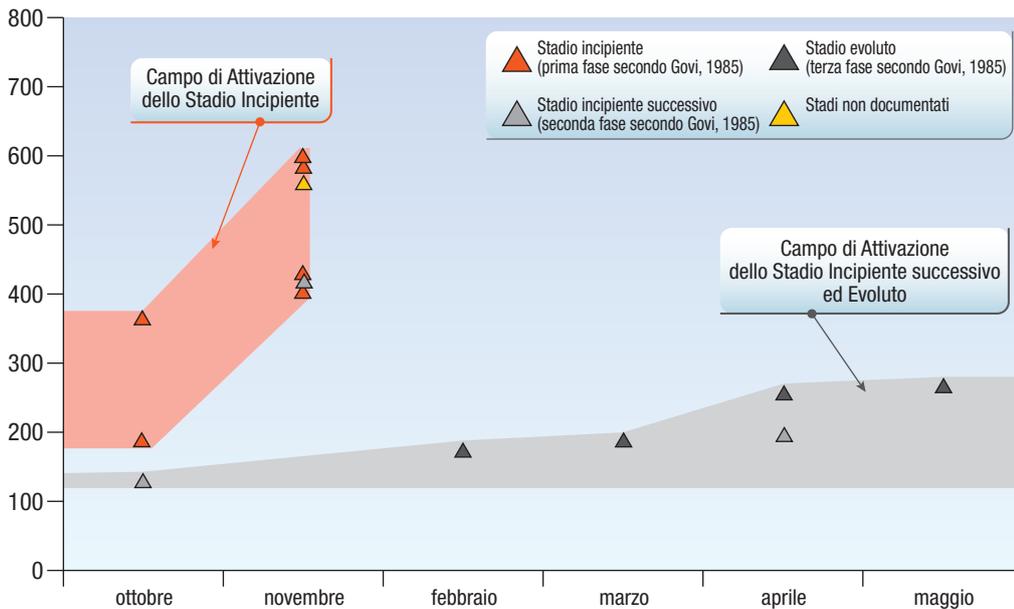


Figura 3.5.6
Diagramma di stabilità
Pioggia cumulata vs Mesi.
 La posizione dei simboli (triangoli rossi: stadio incipiente, triangoli neri: stadio evoluto) consente di individuare sulla superficie del diagramma aree a simile comportamento, differenziando di fatto le soglie di attivazione

prevedere l'innesco di movimenti franosi sulla base delle precipitazioni misurate o previste con modelli stocastici e/o meteorologici. Il modello, applicabile ad una singola frana o ad aree omogenee soggette alla medesima tipologia di fenomeno, si basa sull'identificazione di una funzione di mobilitazione $Y(t)$ che dipende dalle precipitazioni antecedenti e tiene conto, in maniera sintetica, delle caratteristiche del corpo franoso. Definita la funzione di mobilitazione, è possibile identificare valori critici al cui superamento è associata la maggiore o minore probabilità di movimento. La funzione di mobilitazione dipende, in ogni istante di tempo t , dalla quantità d'acqua infiltratasi nel sottosuolo prima dell'istante stesso:

$$Y(t) = f[I(u)] \tag{3.5.3}$$

essendo $I(u)$ l'intensità dell'infiltrazione al tempo u . La funzione di mobilitazione rappresenta un indicatore sintetico del rischio di attivazione indotto dalle piogge cadute in precedenza sul versante e viene definita analiticamente in modo da assumere solo valori non negativi. Trattandosi, inoltre, di un indicatore non è importante la conoscenza del suo valore assoluto, essendo il suo impiego legato al rapporto tra i valori assunti in diversi istanti. Ne consegue che la funzione $Y(t)$ può essere definita a meno di inessenziali costanti moltiplicative. Il modello *FLaIR* assume come relazione tra la funzione di mobilitazione $Y(t)$ e l'intensità dell'infiltrazione $I(u)$ un legame di tipo convolutivo:

$$Y(t) = c \int_0^t \psi(t-u)I(u)du \tag{3.5.4}$$

dove $\psi(t-u)$ è la funzione di trasferimento (o filtro), e c è un'inessenziale costante moltiplicativa citata in precedenza. La funzione di trasferimento tiene conto in modo sintetico delle relazioni che intercorrono tra la stabilità del pendio e le precipitazioni

meteoriche. Si possono adottare varie espressioni per la funzione di trasferimento, assicurando così al modello *FLaIR* grande flessibilità e, quindi, la capacità di modellare situazioni caratterizzate da meccanismi di innesco anche molto diversi tra loro.

3.5.3.2 Considerazioni sull'applicabilità del metodo

La stima dei parametri della funzione di trasferimento è uno degli aspetti più delicati del modello *FLaIR*. La difficoltà principale consiste nella possibilità di reperire informazioni complete sulle mobilitazioni storiche dei fenomeni sottoposti ad analisi. In mancanza di un quadro informativo completo, può accadere che, a parità di struttura analitica della funzione di trasferimento, esistano molti valori dei parametri che risultano compatibili con il criterio di stima adottato. Non è possibile, quindi, identificare un particolare vettore dei parametri ma può essere solo individuata una regione di ammissibilità dei parametri.

Il campo di ammissibilità dei parametri può essere delimitato utilizzando un criterio detto *ranking*, valutando cioè la funzione di mobilitazione $Y(t)$ su tutto l'intervallo di variabilità dei parametri e ritenendo ammissibili tutti quei valori che inducano $Y(t)$ ad assumere, in corrispondenza delle k mobilitazioni storiche, valori che si posizionino nei primi k posti del suo *ranking* o, in altre parole, che si situino nelle prime k posizioni della sequenza dei valori della funzione di mobilitazione riordinati in senso decrescente. La stima parametrica consente anche di individuare un valore limite inferiore $Y_{cr,li}$ ed un valore limite superiore $Y_{cr,ls}$. Il primo corrisponderà al massimo $Y(t)$ che non ha dato luogo a mobilitazione, mentre il secondo corrisponderà al minimo $Y(t)$ verificatosi in concomitanza con le mobilitazioni storicamente note.

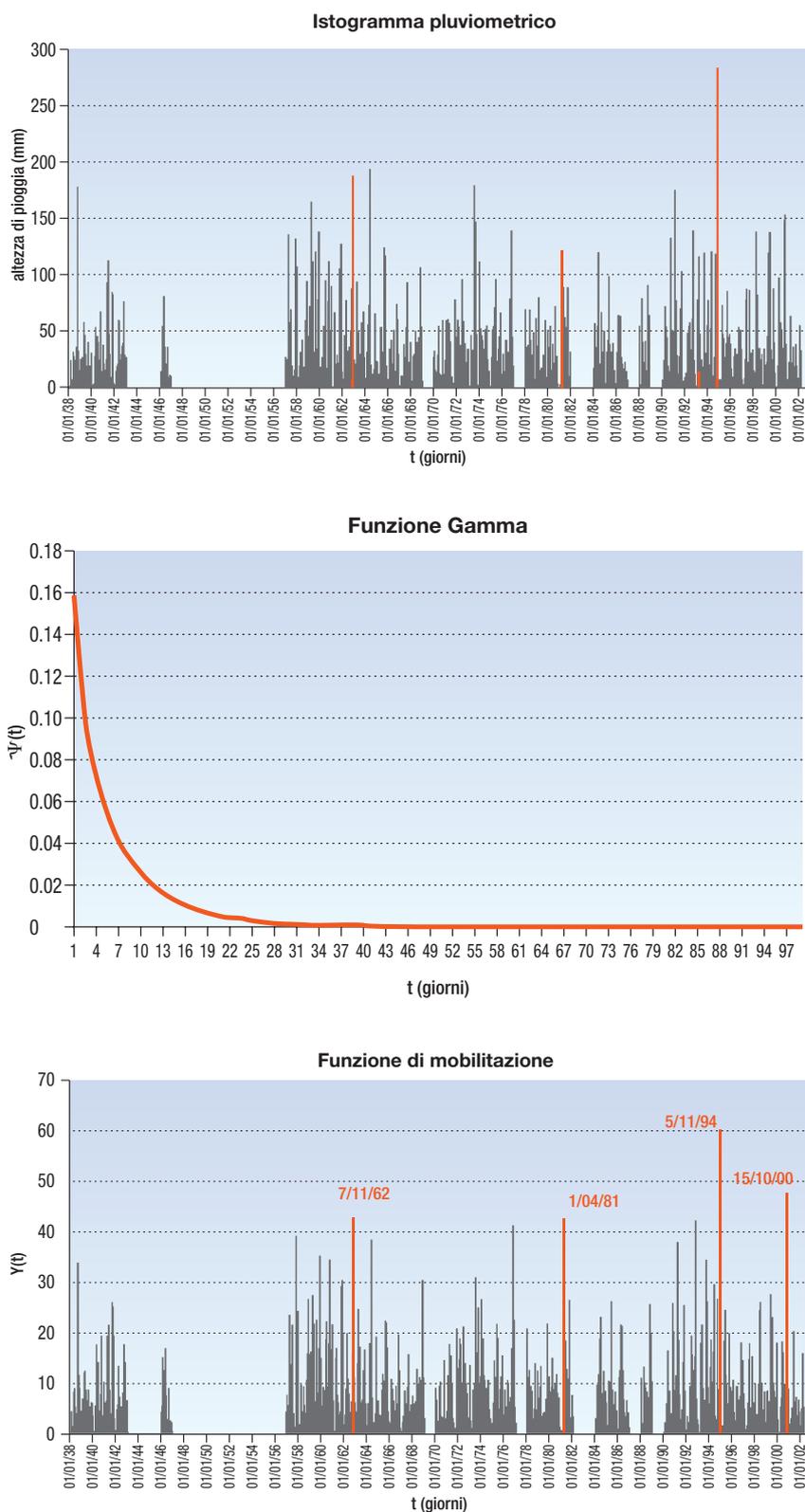


Figura 3.5.7
Esempi di istogramma pluviometrico giornaliero con indicazione degli inneschi (picchi rossi) e delle associate funzioni di trasferimento e di mobilitazione

3.5.3.3 Applicazione del metodo ai fenomeni di colamento rapido e di scivolamento traslativo

Il metodo *FLaIR* è stato applicato a due aree del territorio piemontese:

- Valli di Lanzo per i colamenti rapidi;
- Langhe per gli scivolamenti traslativi.

La scelta dei fenomeni franosi è stata fatta con-

siderando che il modello non risulta applicabile quando si verifica una delle seguenti condizioni:

- movimento provocato da cause diverse dalle precipitazioni meteoriche;
- assenza di informazione circa le date di mobilitazione storica;
- mancanza di dati pluviometrici relativi all'intero periodo considerato;
- evidenti modifiche dei luoghi che rendono poco plausibile l'ipotesi di stazionarietà del fenomeno;
- la frana si sviluppa in roccia.

In seguito all'identificazione dei fenomeni franosi ammissibili sono stati condotti approfondimenti di dettaglio inerenti gli ambienti di sviluppo dei dissesti e gli eventi pluviometrici in coincidenza dei quali si sono verificati gli inneschi. Le frane selezionate sono state sottoposte ad analisi con il modello *FLaIR*, identificando per ogni fenomeno o per ogni gruppo di fenomeni appartenenti ad ambiti ritenuti omogenei, la struttura della funzione di trasferimento ed il valore dei suoi parametri.

Lo studio ha consentito di associare una funzione di mobilitazione ai fenomeni studiati e di realizzare un software sperimentale di monitoraggio e visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni, denominato *MoniFLaIR*. L'esempio che segue mostra la valutazione del software alle ore 08:30 UTC del 04/08/2004: il colore attribuito a ciascun ambito in base ad una scala di criticità semaforica consente di visualizzare quali ambiti raggiungono livelli di pioggia dimostratisi critici in passato (figura 3.5.8).

3.5.4 Metodo statistico

3.5.4.1 Descrizione del metodo

Il metodo statistico si propone di prevedere il fenomeno franoso non dal punto di vista fisico ma individuando le relazioni esistenti tra caratteristiche del territorio e la frana. Qualora il fenomeno investigato abbia una sufficiente ripetitività spaziale e temporale e presenti caratteristiche tipologiche omogenee, è possibile descrivere statisticamente queste proprietà e, in ragione della loro forte connotazione spaziale, impiegare al meglio le funzionalità offerte da una gestione dei dati in ambiente GIS.

Il vantaggio dell'applicazione di tali metodi su porzioni di territorio statisticamente rappresentative è la possibilità di estendere i risultati in modo predittivo anche ad altri contesti simili.

Data la complessità dei fenomeni in gioco, si ricorre generalmente all'analisi multivariata che è una tecnica di elaborazione dei casi statistici mediante l'impiego contemporaneo di più variabili (ed in ciò si contrappone all'analisi univariata), fino a deter-

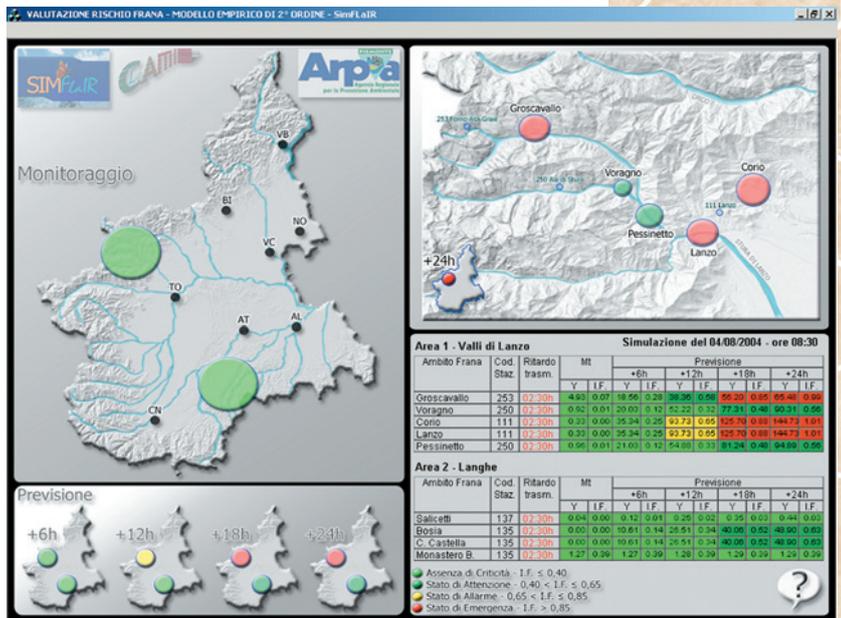
- Indicazioni contenute nei quadranti**
- Finestra del Monitoraggio:** indica la massima criticità registrata nelle aree 1 e 2 con aggiornamento dei dati ogni 30 minuti a partire dal 15° e 45°.
 - Finestra della Previsione:** indica la massima criticità prevista nelle aree 1 e 2 a partire da +6h, +12h, +18h, +24h.
 - Finestra del Dettaglio Geografico:** indica la criticità registrata o prevista in ognuno degli ambiti dell'Area o i singoli fenomeni dell'Area 2. La dimensione dei simboli circolari rappresentativi dell'ambito è proporzionale all'estensione del territorio coinvolto dai fenomeni franosi.
 - Finestra dei Dati:** fornisce un'indicazione quantitativa della criticità osservata e prevista su ogni ambito o frana per mezzo dell'indice Flair (I.F), calcolato come rapporto tra la Funzione di Mobilitazione osservata o prevista e quella limite.

minare eventuali correlazioni multiple tra variabili ed a stabilire il peso statistico delle stesse. In particolare, l'analisi discriminante si rivela uno strumento particolarmente utile per individuare quali variabili discriminino tra due o più gruppi naturali e per classificare i casi in gruppi differenti con un'accuratezza migliore che la semplice scelta casuale.

Ciò permette di individuare una relazione tra avvenimento e una serie di parametri e di variabili prescindendo dal significato fisico che tali relazioni assumono. Stabilito a priori se ogni elemento del territorio è attualmente *Stabile* o *Instabile* (a partire dai rilevamenti sistematici degli eventi pregressi), il modello statistico *impara* da tale situazione iniziale già nota, capitalizzando così al massimo le informazioni esistenti sullo stato del dissesto. Combinando in modo opportuno le variabili a disposizione, il modello statistico riesce a ricostruire la situazione originaria, dando origine a semplici equazioni polinomiali di primo grado che possono essere usate in fase predittiva in altre zone.

Nell'ambito del progetto CARG, già descritto in § 2.4, è stato applicato un metodo statistico per la previsione di frane per scivolamento traslativo, che, quantunque riconducibili ad una semplice schematizzazione geometrica e meccanica, sono caratterizzate da parametri che ne governano l'innescio di difficile quantificazione.

Oltre alle oggettive problematiche di determinare questi parametri (difficoltà di campionamento nelle zone di taglio), sussiste anche una reale impossibilità di applicare un modello meccanico appropriato e generalizzabile ad un contesto territoriale ampio, caratterizzato da una molteplicità di situazioni di instabilità. Avendo quindi a disposizione molti dati storici relativi alla distribuzione spaziale e temporale degli eventi franosi, si è deciso di impiegare un approccio puramente statistico grazie al quale è possibile trovare una relazione tra avvenimento di frana e parametri che ne influenzano l'innescio usando la statistica multivariata.



3.5.4.2 Considerazioni sull'applicabilità del metodo

L'Analisi Discriminante è uno strumento molto utile per individuare le variabili che permettono di discriminare tra differenti gruppi e per classificare i casi in gruppi differenti con una accuratezza migliore che la semplice scelta casuale. Essa considera i fenomeni (biologici, clinici, fisici, economici, sociali, ecc.) nella loro interezza, tenendo quindi conto delle diverse caratteristiche (cioè le variabili) che meglio servono a descrivere i fenomeni stessi: da tre o quattro variabili sino, in casi particolari, a diverse centinaia di variabili.

La possibilità di analizzare più variabili simultaneamente non significa tuttavia che ad un alto numero di variabili corrisponda un'analisi migliore. Se alle variabili di interesse (supposto) vengono aggiunte altre di scarso significato si causa una diluizione dell'informazione che rende più difficile l'analisi dei dati. Esistono, è vero, anche metodi che aiutano a valutare l'importanza relativa delle diverse variabili (come l'analisi fattoriale), ma devono comunque essere ponderate alla luce dell'esperienza e del buon senso.

L'idea di base sottostante all'analisi delle funzioni discriminanti è quella di determinare se i gruppi differiscono rispetto alla media di ogni variabile e quindi usare tali variabili per predire l'appartenenza di nuovi casi ai gruppi. Si tratta quindi di minimizzare la variabilità degli elementi all'interno dei gruppi e di massimizzarla tra i gruppi. Ad esempio, supponendo di aver misurato le altezze in un campione casuale di 50 uomini e 50 donne, risulterà che le donne sono, in media, meno alte degli uomini.

Tale differenza si rifletterà nella differenza tra le altezze medie e pertanto la variabile altezza per-

Figura 3.5.8 Interfaccia del modulo *MoniFLAIR*, 2004

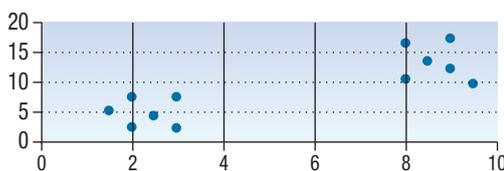
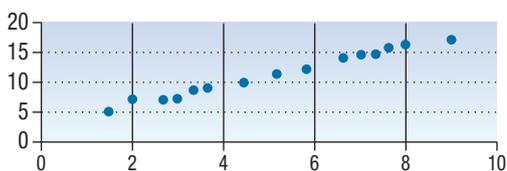


Figura 3.5.9 Esempio di variabili correlate (a sinistra) e casi raggruppati (a destra)

mette di discriminare tra uomini e donne con una probabilità migliore della semplice casualità. Se una persona è alta, allora è probabilmente un uomo, se invece è bassa, allora è probabilmente una donna. Nella **figura 3.5.9**, a sinistra si nota una forte correlazione tra le due variabili. I soggetti (punti del grafico) sono allineati in forza della relazione tra le variabili e non si intravedono raggruppamenti particolari. Viceversa il grafico a destra dimostra una evidente relazione (gruppi, parentele) tra i soggetti a scapito della relazione tra le variabili. Infatti nessuno potrebbe pensare di rappresentare il grafico a destra mediante una retta di regressione. Si può quindi dire che variabili fortemente correlate sono poco utili a svelare relazioni tra i soggetti, mentre variabili poco correlate (indipendenti) mettono spesso in luce interessanti relazioni tra soggetti.

Le principali assunzioni del modello sono la indipendenza delle variabili tra di loro e la loro distribuzione normale. Mentre la normalità è una caratteristica richiesta ma non fatale per l'analisi se non presente, l'indipendenza delle variabili è una caratteristica necessaria. Per indipendenza si intende che una variabile non è una combinazione lineare di nessuna delle altre o per meglio dire, utilizzando un concetto geometrico, le variabili sono a due a due ortogonali. Tale assunzione dà un significato più intuibile dell'Analisi Discriminante: ogni variabile corrisponde ad un asse di uno spazio n -dimensionale e ogni caso è individuato dalla combinazione lineare delle proprie distanze (euclidee o di altro tipo) da ciascun asse. Disponendo di un sistema di assi ortogonali, la distanza euclidea corrisponde all'ipotenusa di un triangolo rettangolo, i cui cateti sono quindi le differenze tra i valori delle due variabili. Quanto detto vale se e solo se gli assi (variabili) sono ortogonali (altrimenti sarebbe come applicare il teorema di Pitagora ad un triangolo non rettangolo). In termini di variabili, la condizione di ortogonalità (90°) corrisponde alla indi-

pendenza delle variabili. Quanto più due variabili sono correlate, tanto più il loro spazio vettoriale si chiude con un angolo sempre più stretto. Paradossalmente, se si applica la stessa variabile a entrambi gli assi, lo spazio vettoriale si riduce ad una retta. Con metodi matematici è possibile rendere le variabili ortogonali, in modo da calcolare valide distanze.

Specificamente, ci si può chiedere se due o più gruppi sono significativamente differenti tra loro rispetto alla media di una particolare variabile. Dunque se le medie per una variabile sono significativamente differenti in gruppi differenti, allora si può dire che questa variabile discrimina tra i due gruppi.

Classificazione

Un altro degli obiettivi per cui è applicata l'Analisi Discriminante è quello della classificazione dei casi non utilizzati per la creazione del modello statistico. Una volta completato il modello e derivate le funzioni discriminanti, è possibile utilizzare le funzioni di classificazione per determinare a quale gruppo appartiene con maggiore probabilità ogni caso. Vi sono tante funzioni di classificazione quanti sono i gruppi. Ogni funzione permette di calcolare punteggi di classificazione per singolo caso di ciascun gruppo, applicando la formula:

$$S_i = c_i + w_{i1}x_1 + w_{i2}x_2 + \dots + w_{im}x_m \quad (3.5.5)$$

dove:

- il pedice i denota il gruppo rispettivo;
- i pedici $1, 2, \dots, m$ indicano le m variabili;
- c_i è una costante per l' i -mo gruppo;
- w_{ij} è il peso per la j -ma variabile nel calcolo del punteggio di classificazione per l' i -mo gruppo;
- x_j è il valore osservato per il rispettivo caso per la j -ma variabile;
- S_i è il risultante punteggio di classificazione.

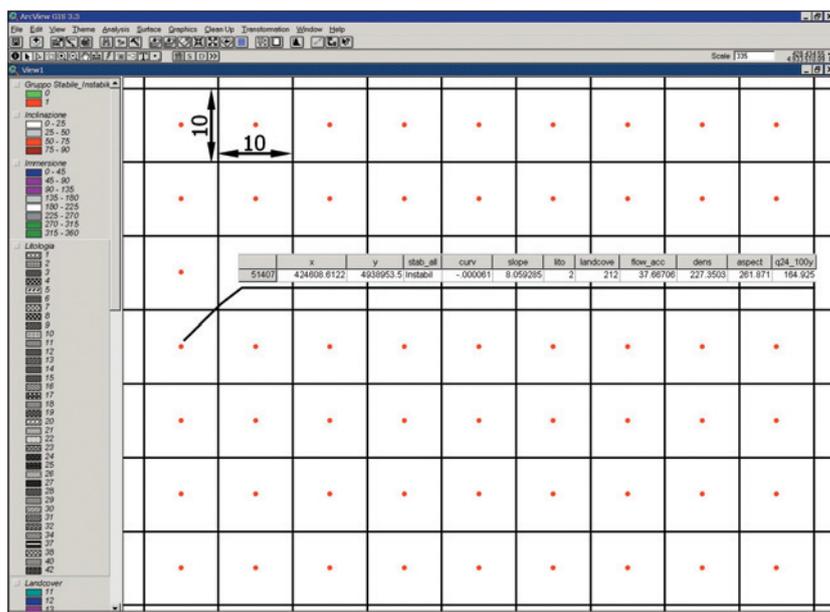
È dunque possibile adoperare le funzioni di classificazione per calcolare direttamente i punteggi di classificazione per alcune nuove osservazioni. Una volta calcolati i punteggi per un caso, esso verrà classificato come appartenente al gruppo per cui ottiene il punteggio più elevato.

3.5.4.3

Applicazione del metodo ai fenomeni di scivolamento traslativo

Il metodo è stato applicato con successo nell'ambito del progetto CARG all'intero Foglio *Dego* alla scala 1:50.000. Per eseguire l'Analisi Discriminante è stato necessario innanzi tutto individuare una variabile di gruppo cui attribuire la classificazione a priori del campione. Ciò significa, in pratica, attribuire ogni cella del dominio di studio ad uno dei Gruppi scelti come base per la discriminazione. Come variabile di gruppo è stata scelta l'appartenenza di ogni cella al Gruppo *Stabile* o al Gruppo

Figura 3.5.10
Esemplificazione della discretizzazione del dominio di studio ed attribuzione dei valori delle variabili al baricentro di ciascuna cella



Instabile, ottenuta mediante *overlay* topologico della maglia regolare di 10 m di lato in cui è stato discretizzato il Foglio Degeo con il rilevamento delle frane per scivolamento traslativo avvenute in occasione degli eventi alluvionali del 1968, 1972, 1974 e del 1994. Per ogni cella è stato così possibile individuare *a priori* l'appartenenza al Gruppo *Stabile* o al Gruppo *Instabile*. Tale variabile rappresenta la condizione iniziale di discriminazione che il modello statistico cerca di ricostruire attraverso la combinazione delle variabili disponibili. Operativamente, in ambiente GIS Esri ArcView® 3.3, tutti gli strati informativi che rappresentano una variabile sono stati ricondotti ad un'unica matrice, in cui ogni riga è una cella elementare e quindi un caso statistico, mentre ogni colonna è una variabile.

Nella **figura 3.5.10** è riportato un dettaglio del dominio di studio, in cui si esemplifica il concetto di cella elementare derivata dalla griglia del Modello Digitale del Terreno e le caratteristiche attribuite al baricentro della cella stessa, mentre nella **figura 3.5.11** è riportata la matrice di 2'249 righe per 2'683 colonne, per un totale di 6'034'067 celle, così come si presenta entro l'ambiente di analisi statistica SPSS®. Si noti che ogni cella è individuata univocamente dalla coppia di coordinate X e Y, espresse in metri nel sistema di riferimento UTM ED 1950, che permette di mantenere la corrispondenza spaziale tra cella e caratteristiche di tipo statistico che si ottengono dopo l'analisi in SPSS®. I risultati ottenuti sono contenuti nelle tabelle seguenti, in cui sono riportati le percentuali di successo (**tabella 3.5.2**), il *potenziale discriminante* di ciascuna variabile (**tabella 3.5.3**) e i valori

dei coefficienti delle Funzioni di Classificazione relative al Gruppo *Stabile* e al Gruppo *Instabile* (**tabella 3.5.4**).

La **tabella 3.5.2** fornisce tutti i dettagli per valutare la bontà dell'Analisi Discriminante effettuata. Infatti si può leggere che il 74.2% delle celle dichiarate *stabili* prima dell'analisi, cioè *a priori*, sono state effettivamente ri-classificate nel Gruppo *Stabile*, mentre il 78.9% delle celle dichiarate *instabili a priori* sono state correttamente ri-classificate nel Gruppo *Instabile*. Complessivamente il rapporto tra le celle correttamente riclassificate (2'415'687 *stabili* e 902'301 *instabili*) e tutte le celle del dominio oggetto dell'analisi è di 75.4%, che può essere assimilata ad una valutazione globale di successo.

Figura 3.5.11
Matrice di analisi entro l'ambiente SPSS®. Ogni riga corrisponde ad un elemento del Modello Digitale del Terreno e ciascuna cella mostra il valore di ciascuna variabile in quel punto. Si noti che l'univocità di ogni elemento è garantita dalla coppia di coordinate X e Y

TABELLA 3.5.2 RISULTATI DELL'ANALISI DISCRIMINANTE

PREVISIONE DI APPARTENENZA				
	GRUPPO STABILE-INSTABILE	STABILE	INSTABILE	TOTALE
Numero	Stabile	2'415'687	841'053	3'256'740
Numero	Instabile	240'589	902'301	1'142'890
%	Stabile	74.2	25.8	100.0
%	Instabile	21.1	78.9	100.0

Il 75.4% dei casi originali è stato correttamente classificato

TABELLA 3.5.3 COEFFICIENTI STANDARDIZZATI E COEFFICIENTI DI STRUTTURA DERIVATI DALL'ANALISI DISCRIMINANTE

	COEFFICIENTI STANDARDIZZATI DELLA FUNZIONE DISCRIMINANTE CANONICA	MATRICE DI STRUTTURA
Immersione del versante	-0.682	-0.733
Inclinazione del versante	0.468	0.580
Pioggia max annuale attesa in 24 h con Tempo di Ritorno 100 anni	0.329	0.417
Landcover	0.130	0.334
Litologia	0.137	0.333
Densità dei lineamenti telerilevati	-0.048	-0.044
Curvatura totale del versante	0.024	0.016
Area contribuente	0.024	0.004

TABELLA 3.5.4 COEFFICIENTI DELLE FUNZIONI DI CLASSIFICAZIONE

VARIABILI DISCRIMINANTI		GRUPPO	
		Stabile	Instabile
Immersione del versante	imm	2.167E-02	3.050E-02
Inclinazione del versante	incl	0.226	0.156
Pioggia max annuale attesa in 24 h con Tempo di Ritorno 100 anni	24h100y	0.420	0.404
Landcover	lc	1.994E-02	1.833E-02
Litologia	lit	-0.867	-0.892
Densità lineamenti telerilevati	dens	6.516E-03	6.815E-03
Curvatura totale del versante	curv	2.197E-02	8.516E-03
Area contribuente	flow	1.782E-05	1.565E-05
Costante		-47.881	-44.979

La **tabella 3.5.3** riporta nella prima colonna, per ogni variabile discriminante, i coefficienti standardizzati della funzione discriminante canonica. Tali coefficienti potranno essere interpretati in maniera tale da capire in che modo le singole variabili contribuiscono a discriminare: maggiore è il coefficiente standardizzato, maggiore è il contributo della variabile nel discriminare tra i gruppi. Comunque, questi coefficienti non indicano tra quali gruppi essi discriminano, ma rivelano il contributo unico (parziale) di ogni variabile sulle funzioni discriminanti.

Nella seconda colonna della **tabella 3.5.3** sono riportati i coefficienti strutturali che indicano le correlazioni semplici tra le variabili e le funzioni. La matrice di struttura dei fattori è un altro modo per determinare quali variabili *marcano* o definiscono una particolare funzione discriminante. I coefficienti di struttura dei fattori sono le correlazioni tra le variabili nel modello e la funzione discriminante. Si può pensare a queste correlazioni come ai pesi fattoriali delle variabili su ogni funzione discriminante. Pertanto:

- *i coefficienti di struttura* indicano le semplici correlazioni tra le variabili e le funzioni discriminanti;
- *i coefficienti delle funzioni discriminanti* indicano il contributo unico (parziale) di ciascuna variabile alle funzioni discriminanti.

Se si desidera assegnare etichette di *significato* alle funzioni discriminanti, allora dovrebbero essere adoperati, cioè interpretati, i coefficienti di struttura; se si desidera invece sapere quale è il contributo unico di ciascuna variabile alla funzione discriminante, si usano i coefficienti della funzione discriminante. Sulla base delle considerazioni fatte, dall'analisi della **tabella 3.5.3** si ricava che le variabili che più contribuiscono alla discriminazione sono l'*im-*

mersione e l'*inclinazione* del versante, mentre quella meno importante è l'*area contribuente*.

Come descritto, uno degli obiettivi per cui è applicata l'Analisi Discriminante è quello della classificazione predittiva dei casi. Una volta completato il modello e derivate le funzioni discriminanti, quanto bene si può prevedere a quale gruppo appartiene un particolare caso?

L'Analisi Discriminante calcolerà automaticamente le Funzioni di Classificazione che possono essere utilizzate per determinare a quale gruppo appartiene con maggiore probabilità ogni caso. Vi sono tante funzioni di classificazione quanti sono i Gruppi.

La **tabella 3.5.4** riporta per ciascun gruppo i coefficienti delle Funzioni di Classificazione. Una volta calcolati i punteggi di classificazione per un caso, esso verrà classificato come appartenente al gruppo per cui ottiene il punteggio più elevato ed è possibile calcolarne la probabilità di appartenenza, che sono dette *a posteriori* e forniscono la probabilità che il rispettivo caso appartenga ad un gruppo particolare, in base alla conoscenza dei valori delle altre variabili. Tale probabilità costituisce la pericolosità in senso stretto, espressa in termini spaziali e, indirettamente, temporali, poiché una delle variabili discriminante, la *Pioggia max annuale attesa in 24 h con Tempo di Ritorno 100 anni*, ha un significato temporale.

In questo modo è possibile estrapolare il modello statistico anche a zone teoricamente sconosciute, che abbiano però caratteristiche ragionevolmente omogenee rispetto alla zona in cui il modello statistico è stato generato. Tale opportunità deve comunque essere bene calibrata rispettando i vincoli e le condizioni d'uso del modello. Nel caso specifico i due polinomi che rappresentano le Funzioni di Classificazione per il Gruppo *Stabile* e per il Gruppo *Instabile* sono:

$$\text{Gruppo}_{\text{stabile}} = 2.167 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{imm}) + 0.226 \cdot (\text{incl}) + 0.420 \cdot (24\text{h}100\text{y}) + 1.994 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{lc}) + \\ -0.867 \cdot (\text{lit}) + 6.516 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{dens}) + 2.197 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{curv}) + 1.782 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{flow}) - 47.881 \quad (3.5.6)$$

$$\text{Gruppo}_{\text{instabile}} = 3.050 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{imm}) + 0.156 \cdot (\text{incl}) + 0.404 \cdot (24\text{h}100\text{y}) + 1.833 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{lc}) + \\ -0.892 \cdot (\text{lit}) + 6.815 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{dens}) + 8.516 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{curv}) + 1.565 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{flow}) - 44.978 \quad (3.5.7)$$

La **figura 3.5.12** riporta per ogni cella la classificazione *a priori* (colonna *stab_all*), la previsione eseguita dal modello statistico (colonna *dis_2*) e la probabilità di appartenere al Gruppo *Stabile* associata alla previsione. Ad esempio nel caso della cella numero 51'407, si ha che la cella è stata classificata come *Instabile* ed effettivamente il modello la ri-classifica come *Instabile* con una probabilità di appartenere al Gruppo *Stabile* pari al 15%. Poiché i Gruppi sono solo due, la probabilità che la cella appartenga al Gruppo *Instabile* è il complemento a 100 della probabilità di appartenere al Gruppo *Stabile*, cioè 85%. Questo caso verrà valutato come un successo, poiché classificazione *a priori* e la classificazione *a posteriori* coincidono. Viceversa ad esempio nel caso della cella numero 51'417, la previsione eseguita dal modello statistico non porta alla corretta ri-classificazione del caso stesso, poiché era stato dichiarato come appartenente al Gruppo *Stabile*, mentre il modello lo ha collocato nel Gruppo *Instabile*, con una probabilità del 80%, che è il complemento a uno della probabilità del 20% di appartenere al Gruppo *Stabile*, come riportato nella colonna *dis1_4*.

Tralasciando la corretta classificazione o meno, ciò che è importante in questi risultati è l'opportunità di valutare quanto un caso sia effettivamente *dentro* un Gruppo. Infatti, una probabilità di appartenenza al Gruppo *Stabile* pari all'80% rende ragionevolmente fiduciosi sul fatto che quella cella sia realmente stabile, mentre una probabilità intorno al 50% dà la misura della situazione di incertezza nell'effettiva classificazione in quel Gruppo. Dal punto di vista statistico, significa che le distribuzioni dei valori dei punteggi della Funzione Discriminante si sovrappongono e pertanto l'interferenza delle code rende difficoltosa la corretta attribuzione ad un Gruppo.

3.5.5 Metodo meccanico-idrologico

3.5.5.1 Descrizione del metodo

L'utilizzo di questo metodo implica l'applicazione di componenti modellistiche dedicate a:

- 1) analisi delle componenti meccanica e idrologica (modello di stabilità);
- 2) valutazione del contributo dell'infiltrazione delle piogge.

Per una determinata area il metodo consente di:

- 1) simulare gli effetti di un evento pluviometrico pregresso di cui è noto il solido di pioggia, in termini di perimetrazione di aree instabili;
- 2) calcolare le soglie critiche di pioggia responsabili dell'innescio di fenomeni franosi;
- 3) simulare gli effetti di un evento pluviometrico previsto che si caratterizza per una distribuzione spaziale presunta di valori di pioggia.

51410:	x	y	stab_all	dis_2	dis1_4	var	var	var	var	var
51407	424608 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	15078					
51408	424618 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	15077					
51409	424628 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	14546					
51410	424638 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	13520					
51411	424648 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	12570					
51412	424658 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	16778					
51413	424668 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	20800					
51414	424678 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	18581					
51415	424688 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	15764					
51416	424698 6122	4938953 5	Instabile	Instabile	18415					
51417	424708 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	20856					
51418	424718 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	23488					
51419	424728 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	25830					
51420	424738 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	26749					
51421	424748 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	28709					
51422	424758 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	30196					
51423	424768 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	32779					
51424	424778 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	34290					
51425	424788 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	35405					
51426	424798 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	37205					
51427	424808 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	38479					
51428	424818 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	39241					
51429	424828 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	39969					
51430	424838 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	39645					
51431	424848 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	36506					
51432	424858 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	30474					
51433	424868 6122	4938953 5	Stabile	Instabile	23548					

L'attività 1 è una fase propedeutica alle altre due, che sono tra loro indipendenti, poiché comprende anche la taratura dei parametri d'ingresso al modello. La fase 2, presentando come risultato i valori soglia di pioggia di innesco delle frane esprimibili in termini di tempi di ritorno, consente di connotare il territorio in termini di pericolosità spaziale e temporale. L'utilizzo in chiave previsionale del modello è rappresentato dalla terza delle possibili applicazioni succitate. Il margine di incertezza dei risultati di tale applicazione è legato:

- all'incertezza dei dati di base in ingresso al modello;
 - ai limiti dell'approccio modellistico che, in quanto tale, semplifica il fenomeno naturale che vuole rappresentare;
 - all'incertezza della previsione meteorologica.
- L'analisi dell'incertezza dei dati di base non vuole essere oggetto di questa trattazione. Si vuole invece focalizzare l'attenzione sugli altri due aspetti limitanti di cui si deve necessariamente tenere conto ai fini di un corretto utilizzo di tale metodologia nell'ambito della previsione delle frane.

La componente inerente al modello di stabilità

L'approccio proposto è quello di Montgomery e Dietrich (Montgomery & Dietrich, 1994; Dietrich & Montgomery, 1998) integrato per la componente di coesione efficace.

Il metodo accoppia un modello idrologico ed uno di stabilità dei pendii all'equilibrio limite. Le principali assunzioni alla base della formulazione sono:

- pendio infinito;
- superficie di rottura piana parallela al pendio e localizzata al contatto tra coltre detritica alterata superficiale e substrato (roccia o deposito quarternario);
- criterio di resistenza del terreno secondo Mohr-Coulomb espresso in termini di tensioni efficaci;
- flusso stazionario parallelo al pendio;
- assenza di drenaggio profondo e di flusso nel substrato.

Figura 3.5.12
Risultato dell'Analisi Discriminante in termini di probabilità



In particolare (**figura 3.5.13**) al crescere dell'altezza h dello strato di terreno saturo corrisponde una diminuzione della tensione agente normalmente al piano di rottura e , di conseguenza, della resistenza al taglio disponibile. Tale altezza viene riferita allo spessore totale della coltre detritica (z) mediante la relazione:

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} = W \quad (3.5.8)$$

in cui:

q = pioggia netta infiltrata;

$T = K \cdot z \cdot \cos \theta$ = trasmissività idraulica;

K = coefficiente di permeabilità del terreno saturo;

a = area contribuyente (totale delle celle con flusso diretto verso la cella in esame);

b = larghezza della sezione di deflusso;

θ = inclinazione del versante.

Nel prodotto al secondo membro nella relazione **3.5.8**, il primo fattore è definito termine idrologico, il secondo termine topografico; il significato di tale distinzione è più chiaro facendo riferimento agli schemi riportati in **figura 3.5.13**. Al fine di valutare con il massimo rigore possibile la componente di pioggia netta infiltrata (q) si fa riferimento ad un modello di infiltrazione dettagliato nel seguito.

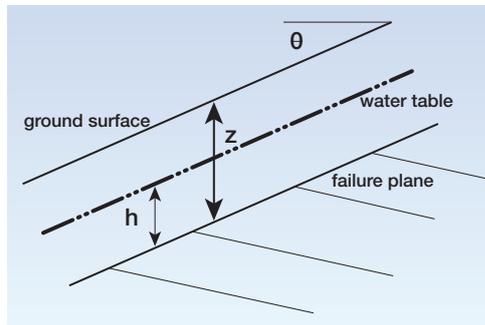
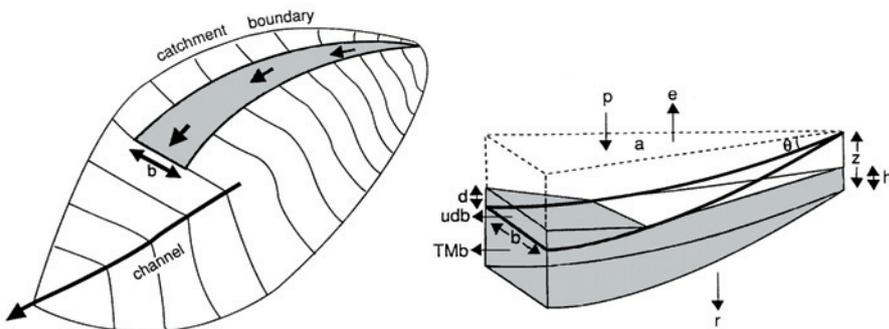


Figura 3.5.13
Valutazione del contributo idrologico (Dietrich & Montgomery, 1998). h e z sono rispettivamente gli spessori dello strato saturo e della massa potenzialmente mobilizzabile, mentre b è la larghezza della sezione di deflusso. La precipitazione infiltrata, q , è uguale alla precipitazione, p , meno l'evapotraspirazione, e , ed il drenaggio profondo, r



Con lo scopo di ottenere un'equazione che includa, oltre al modello idrologico, anche il modello di stabilità, il fattore di sicurezza F , nel caso di pendio indefinito con filtrazione parallela alla superficie, formulando la resistenza al taglio secondo il criterio di Mohr-Coulomb, può essere espresso (Skempton & De Lory, 1957):

$$F = \frac{c' + (\gamma - W \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (3.5.9)$$

c' = coesione efficace (intercetta dell'involuppo di rottura);

z = profondità verticale della superficie di scivolamento;

γ = peso del suolo umido per unità di volume;

γ_w = peso dell'acqua per unità di volume;

ϕ' = angolo di resistenza al taglio.

In relazione alle ipotesi enunciate ed alla struttura del modello, la condizione di instabilità per ciascuna cella del dominio è espressa dalla seguente relazione:

$$\frac{a}{b} \geq \left[\frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi'} \right) \right] \cdot \frac{T}{q} \cdot \sin \theta \quad (3.5.10)$$

La condizione di instabilità espressa nella **(3.5.10)** viene verificata esclusivamente su quelle celle che non soddisfano le condizioni di assoluta stabilità e assoluta instabilità espresse rispettivamente nelle disequazioni **(3.5.11)** e **(3.5.12)**:

(assoluta stabilità)

$$\tan \theta \leq \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \tan \phi' \quad (3.5.11)$$

(assoluta instabilità)

$$\tan \theta \geq \frac{c'}{\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta} + \tan \phi' \quad (3.5.12)$$

La condizione di assoluta stabilità individua quegli elementi topografici che vengono classificati stabili anche quando il terreno risulti completamente saturo ($W = 1$). Occorre notare che la **(3.5.12)**, priva del termine di coesione, è definita in modo conservativo. La condizione di assoluta instabilità è definita per quegli elementi topografici che vengono classificati come instabili anche in assenza di pioggia.

Imponendo l'uguaglianza tra il primo ed il secondo termine della disequazione **(3.5.10)**, ovvero stabilendo un fattore di sicurezza pari all'unità e risolvendo l'equazione rispetto a q , si ottiene la soglia di infiltrazione critica che porta a condizioni di equilibrio limite:

$$q_{cr} = \left[\frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi'} \right) \right] \cdot \frac{T \cdot b}{a} \cdot \sin \theta \quad (3.5.13)$$

La componente inerente al contributo delle piogge: il modello di infiltrazione

Per la valutazione della componente di pioggia netta infiltrata, q , necessaria al modello di stabilità si è fatto riferimento al modello di infiltrazione di Green & Ampt (1911). Tale modello stima il tasso di infiltrazione ipotizzando un profilo di umidità nel suolo di tipo semplificato che consente di

ottenere una soluzione analitica dell'equazione che descrive il processo fisico dell'infiltrazione. Gli Autori ipotizzano che lungo la verticale, z , il fronte di infiltrazione sia orizzontale (**figura 3.5.14**) e separi una zona sovrastante satura, dove il contenuto d'acqua è quindi pari alla porosità ($\theta = n$), da quella inferiore non satura, dove il contenuto d'acqua sia pari a quello iniziale ($\theta = \theta_i$).

Le ipotesi semplificative introdotte non pregiudicano la rappresentatività del metodo in particolare quando si considerano suoli sabbiosi. Tali suoli sono generalmente caratterizzati da bassa capacità di ritenzione e minima risalita capillare; ciò porta ad avere fronti di infiltrazione con caratteristiche molto simili a quelli ipotizzati nel modello. Detta L la distanza lungo la verticale z tra la superficie del suolo e la posizione del fronte di infiltrazione il volume infiltratosi, $F(t)$, al tempo t , è dato da:

$$F(t) = L(n - \theta_i) = L(\Delta\theta) \tag{3.5.14}$$

La velocità di infiltrazione viene rappresentata dalla legge di Darcy scritta per la sola zona satura, tra la superficie e il fronte di infiltrazione a profondità L :

$$q = -K \left(\frac{h_0 - h_1}{L} \right) \tag{3.5.15}$$

dove: h_0 è il tirante idrico sulla superficie del suolo e h_1 è il carico agente sul fronte di infiltrazione somma del carico capillare, ψ , e del carico gravitazionale, L . Questa equazione si può quindi scrivere come:

$$q = -K \left(\frac{h_0 - (-\psi - L)}{L} \right) \tag{3.5.16}$$

Generalmente h_0 è trascurabile rispetto ad L e pertanto:

$$q = -K \left(\frac{\psi + L}{L} \right) \tag{3.5.17}$$

Sostituendo la **(3.5.14)** nella **(3.5.17)** si ottiene:

$$\frac{dF}{dt} = K \left(\frac{\psi \Delta\theta + F}{F} \right) \tag{3.5.18}$$

Il volume infiltrato si ottiene integrando la **(3.5.18)** scritta nella forma seguente:

$$K dt = dF \left(\frac{F}{F + \psi \Delta\theta} \right) = dF \left(\frac{F + \psi \Delta\theta - \psi \Delta\theta}{F + \psi \Delta\theta} \right) = dF \left(1 - \frac{\psi \Delta\theta}{F + \psi \Delta\theta} \right) \tag{3.5.19}$$

si ottiene quindi

$$[Kt]_0^t = [F - \psi \Delta\theta \ln(F + \psi \Delta\theta)]_0^F \tag{3.5.20}$$

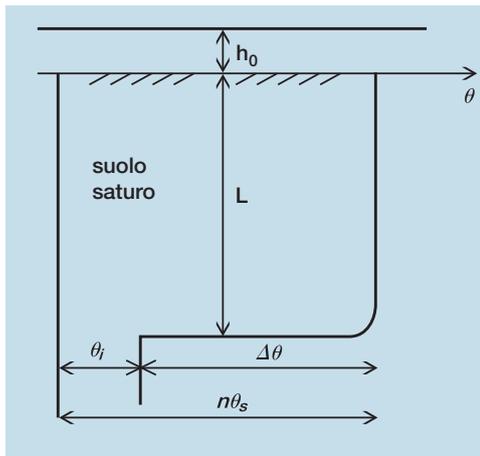


Figura 3.5.14
Schema di infiltrazione di Green & Ampt

$$Kt = F - \psi \Delta\theta [\ln(F + \psi \Delta\theta) - \ln(\psi \Delta\theta)] = F - \psi \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F}{\psi \Delta\theta} \right) \tag{3.5.21}$$

Si noti che la **(3.5.21)** è un'equazione non lineare in F , che può essere risolta, per esempio, con metodi iterativi.

Il modello così costruito presuppone che sulla superficie del suolo esista una sottile lama d'acqua (pozzangheramento) e che tutta l'acqua che potenzialmente potrebbe infiltrarsi sia effettivamente disponibile. Per tenere in considerazione il fatto che per intensità di pioggia basse, comunque minori del tasso di infiltrazione potenziale, non si ha pozzangheramento, è necessario applicare una correzione al metodo di Green & Ampt (Mein & Larson, 1973).

Ipotizzando che prima del pozzangheramento tutta la pioggia si infiltre e che il pozzangheramento inizi quando il tasso di pioggia supera la capacità di infiltrazione del suolo, considerando inoltre che il tasso di infiltrazione potenziale è legato al volume infiltrato (F) secondo la **(3.5.18)**, il transitorio iniziale è facilmente descrivibile. Ad esempio considerando un tasso di pioggia costante, i , all'inizio dell'evento si ha $F = i \cdot t$ fintantoché non si ha $i = dF/dt$. L'istante di inizio pozzangheramento, t_p , si ottiene dalla **(3.5.18)** sostituendo:

$$i = K \left(\frac{\psi \cdot \Delta\theta + i \cdot t_p}{i \cdot t_p} \right) = K \left(1 + \frac{\psi \cdot \Delta\theta}{i \cdot t_p} \right) \tag{3.5.22}$$

da cui:

$$t_p = \frac{K \cdot \psi \cdot \Delta\theta}{i \cdot (i - K)} \tag{3.5.23}$$

A partire dall'istante di pozzangheramento è possibile applicare il metodo di Green & Ampt come descritto in precedenza. Per l'applicazione del modello proposto si rende necessaria la stima di tre parametri che caratterizzano le proprietà idrologiche dei suoli di interesse.

Questi parametri compaiono nelle equazioni utilizzate ed hanno una forte connotazione fisica e, come visto sono: la porosità, n , la conducibilità idraulica, K , che corrisponde alla permeabilità del suolo saturo, la tensione matriciale al fronte di infiltrazione, ψ , che corrisponde alla risalita della frangia capillare satura. La disponibilità di informazioni pedologiche di dettaglio ed una nutrita bibliografia in merito (Rawls *et al.*, 1983) consente di desumere il valore di questi parametri evitandone la calibrazione. A questo proposito l'incertezza più elevata riguarda la stima del valore di K . Il modello meccanico idrologico infatti mostra un'elevata sensibilità a tale parametro mentre una sua valutazione a scala di versante o a scale ancora maggiori risulta estremamente difficoltosa. L'influenza degli apparati radicali nel suolo e della macroporosità costituisce un elemento di difficile quantificazione data la sua elevata aleatorietà e variabilità spaziale. In questo contesto, il parametro K assume il significato di risposta integrale del suolo e come tale riassume in sé l'insieme delle diverse caratteristiche del fenomeno di infiltrazione richiedendo un più attenta fase di taratura.

Calcolo della pioggia lorda (P_{cr}) assegnata all'infiltrazione (q_{cr})

Una volta determinato il tasso di infiltrazione critico sulla base della soluzione del problema geotecnico (3.5.13) si deve ricercare la soluzione del calcolo della pioggia lorda che lo genera. La soluzione di questo problema inverso risulta essere meno immediata rispetto alla soluzione del problema diretto a causa della non linearità del modello idrologico di infiltrazione. Si rende pertanto necessario utilizzare un processo di soluzione ricorsivo: si ipotizza un valore della pioggia lorda, si risolve il problema diretto, si confronta infine se l'infiltrazione così calcolata è uguale, a meno di una tolleranza, all'infiltrazione voluta. Se il confronto non dà esito positivo si corregge la pioggia incrementandola o diminuendola secondo il caso (il legame tra pioggia e infiltrazione è monotono, maggiore è la pioggia e maggiore risulta l'infiltrazione) e si riesegue la procedura prima descritta fino ad ottenere la soluzione.

Non si è resa necessaria una particolare ottimizzazione del processo di soluzione ricorsivo in quanto i tempi di calcolo non sono elevati ed il calcolo converge in poche iterazioni.

3.5.5.2

Considerazioni sull'applicabilità del metodo

I risultati che si ottengono dal modello accoppiato meccanico-idrologico presentano alcuni limiti che devono essere tenuti in considerazione nell'analisi dei risultati. In particolare l'assunzione di un flusso idrico nel versante di tipo stazionario, in equilibrio con l'afflusso medio nelle 24 ore precedenti, implica la necessità di considerare eventi pluvio-

metrici di lunga durata superiori almeno alle 24 ore che non siano preceduti da periodi prolungati privi di precipitazioni. Solo in questo modo l'ipotesi di base del modello può essere ritenuta plausibile. Inoltre il transitorio legato all'infiltrazione della pioggia nel pendio viene sostanzialmente trascurato. Tale fenomeno è fortemente condizionato dalle piogge di forte intensità e breve durata e deve essere trattato e descritto con approcci modellistici dedicati.

Nell'ambito della previsione di scenario d'evento, i risultati ottenuti consentono la definizione di indici di pericolosità utili nel medio-lungo periodo (anni o decenni) e legati al tempo di ritorno caratteristico della pioggia critica in ciascuna porzione del territorio. La pericolosità così derivata tuttavia non deve essere intesa in termini assoluti in quanto conservativa. Come detto, le piogge critiche calcolate devono infatti essere precedute da precipitazioni sufficientemente prolungate per essere veramente causa di innesco di movimenti franosi.

Nell'ambito delle previsioni a breve termine (scala oraria), le osservazioni pluviometriche dell'evento meteorologico in corso non consentono l'applicazione diretta del modello con sufficiente anticipo per la valutazione dello scenario di pericolosità a causa delle limitazioni dovute all'assunzione di stazionarietà del flusso idrico nel versante del modello che, come si è detto, richiede piogge di durata superiore alla 24 ore.

Nell'ambito delle previsioni a scala giornaliera, il modello può essere utilizzato come strumento a supporto delle attività di allertamento poichè è in grado comunque di evidenziare i settori di versante maggiormente vulnerabili. Inoltre un utilizzo inverso del modello, cioè l'impiego delle simulazioni per determinare soglie pluviometriche d'innesco dei fenomeni franosi, può affinare soglie di derivazione empirica.

3.5.5.3

Applicazione del metodo ai fenomeni di colamento rapido

Il metodo è stato sperimentato con successo in diversi contesti geomorfologici per una serie di eventi alluvionali:

- agosto 1978, Val Vigezzo;
- novembre 1994, Alta Langa;
- giugno 2002, Valle Cervo.

La sperimentazione ha dimostrato la robustezza della metodologia nella corretta individuazione di aree con diversa propensione al dissesto, apprezzabili anche alla luce dei limiti di applicazione detagliati nelle pagine precedenti.

Di seguito vengono illustrati i risultati della sperimentazione per il caso del contesto collinare delle Langhe, correlato all'evento alluvionale del

novembre 1994.

La simulazione è stata condotta su piattaforma GIS *raster based*, ovvero discretizzando il dominio spaziale in studio in celle a maglia quadrata di 10 m di lato.

Dell'evento alluvionale del novembre 1994 erano note:

- le altezze di pioggia (precursore meteorologico);
- l'ubicazione delle aree instabilizzate per effetto delle piogge.

Dato il precursore meteorologico, il modello è stato alimentato con quattro diverse configurazioni di parametri e variabili e se ne sono ricavate altrettante simulazioni di scenari di instabilità che sono state messe a confronto con la realtà delle aree in frana del 1994. Il confronto tra accaduto e previsione ha consentito di selezionare la configurazione ottimale dei parametri in ingresso al modello (taratura) e di passare alla fase di lavoro inerente alla valutazione delle soglie di infiltrazione critica di innesco (figura 3.5.15).

In tabella 3.5.5 sono riportati i risultati della simulazione effettuata con la configurazione ottimale dei dati. A fronte di un buon risultato di previsione delle celle in frana, si ottengono ottime previsioni delle celle stabili e totali. Si noti che il metodo tende a sovrastimare l'instabilità (cfr. *totale delle celle valutate instabili*) e tale peculiarità è imputabile all'ipotesi di stazionarietà del flusso idrico nel versante discussa nei paragrafi precedenti.

Poiché il riconoscimento e la georeferenziazione delle frane dell'evento di riferimento sono stati condotti principalmente mediante fotointerpretazione, si è voluto tenere conto, nelle procedure di calcolo del successo della simulazione,

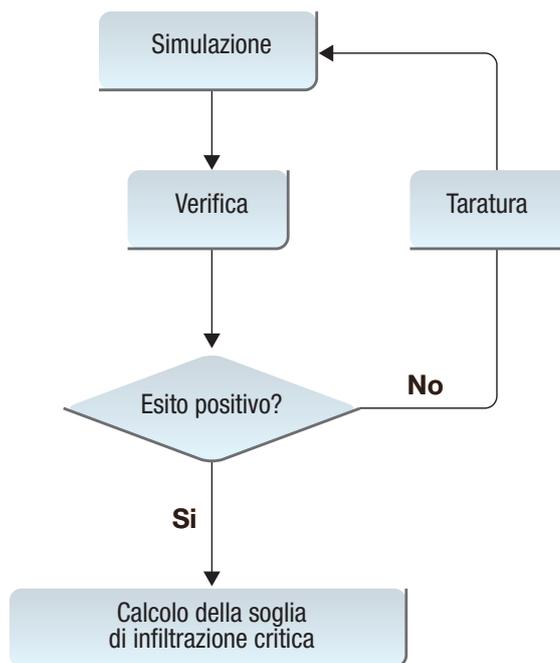


Figura 3.5.15
Schema di valutazione delle soglie di infiltrazione critica. Occorre tenere presente che l'intero ciclo elaborativo può essere ripetuto qualora dall'analisi delle soglie di infiltrazione critica emergano incongruenze con i valori di innesco dell'evento dedotti, ad esempio, attraverso metodi empirici

anche delle inesattezze cartografiche contestuali a tale modalità di rilevamento.

È così stata messa a punto una modalità alternativa di valutazione della bontà dello scenario dissestivo riprodotto dal modello. In sintesi tale modalità prevede che il successo delle celle instabili venga calcolato non verificando la precisa corrispondenza spaziale tra cella in frana e cella prevista instabile dal modello come viene fatto di norma, ma utilizzando l'espedito di una finestra mobile circolare di raggio 15 m centrata su ciascuna cella in frana, all'interno della quale verificare la presenza di almeno una cella instabile calcolata dal modello.

Con tale modalità alternativa la percentuale di celle in frana previste correttamente dal modello sale al 79.7%, indicando che esso, per un'elevata percentuale dei casi, individua correttamente le aree connotate da condizioni di equilibrio limite tali da determinarne la mobilitazione delle coltri superficiali di terreno per altezze di pioggia pari a quelle dell'evento alluvionale del 1994.

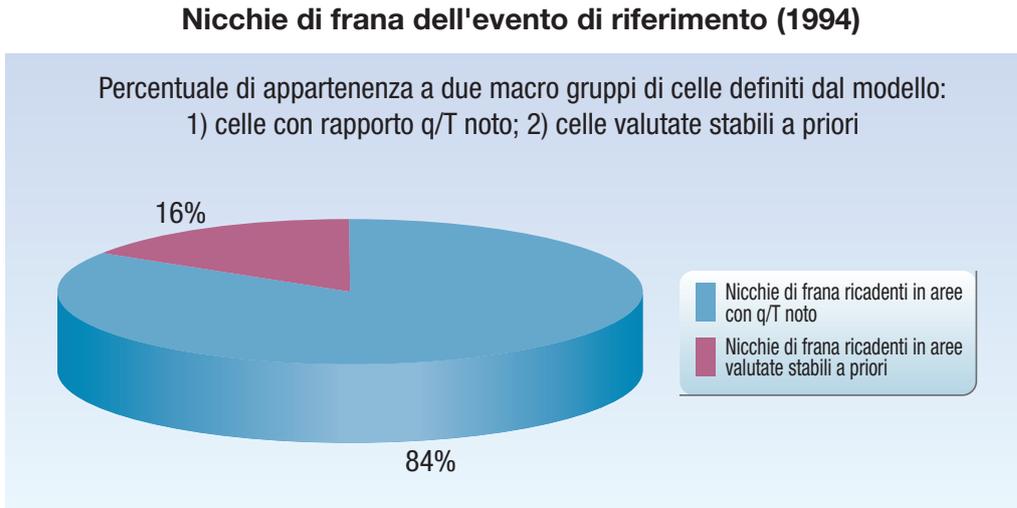
Uno degli indicatori significativi per valutare la bontà del metodo è altresì, come suggerito dagli stessi autori (Dietrich & Montgomery, 1998), il rapporto q/T , ovvero il valore di pioggia efficace normalizzato rispetto alla trasmissività. Secondo gli autori il metodo ha successo se:

- 1) la maggior parte delle nicchie di frana dell'evento di riferimento si verifica nelle celle caratterizzate da valori di q/T bassi e coerenti con le soglie di innesco note per l'area in studio;
- 2) le nicchie dell'evento di riferimento mostrano una maggior concentrazione intorno a un dato valore di q/T rispetto ad un campione di nicchie generate in maniera completamente casuale.

TABELLA 3.5.5 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

INDICATORE	VALORE
Totale celle	4'707'028
Totale delle celle in frana dell'evento di riferimento	199'522
Totale delle celle valutate instabili dal modello	1'412'108
Totale delle celle stabili dell'evento di riferimento	4'507'506
Totale delle celle valutate stabili dal modello	3'294'920
Percentuale delle celle in frana dell'evento di riferimento previste correttamente dal modello [%]	60.4
Percentuale delle celle stabili dell'evento di riferimento previste correttamente dal modello [%]	71.4
Percentuale del successo totale del modello [%]	70.9
Percentuale delle celle instabili previste correttamente (valutazione con finestra mobile) [%]	79.8

Figura 3.5.16
Percentuali di nicchie di frana ricadenti nei due macro gruppi valutati dal modello: celle valutate stabili a priori; celle per le quali è noto il valore di q/T



Analizzando nello specifico le circa 19'000 nicchie di frana del 1994 identificabili distintamente dal corpo d'accumulo, si può osservare che (**figura 3.5.16**):

- 1) l'84% è ubicato in aree non giudicate stabili a priori dal modello per le quali è noto il valore di q/T ;
- 2) il 16% di tali nicchie insiste su aree valutate stabili a priori dal modello.

Le frequenze dei valori di q/T per le nicchie non insistenti su celle valutate stabili a priori e trasformati per comodità di rappresentazione in forma logaritmica, sono riportati in **figura 3.5.17**. In **figura 3.5.18** le stesse frequenze sono riportate cumulate. La mediana dei $\log_{10}(q/T)$, valore di soglia del 50% degli inneschi, risulta pari a circa -1.3. La distribuzione inoltre presenta il 60% ed il 70% circa dei dissesti con valori di $\log_{10}(q/T)$ rispettivamente inferiori a -1.2 e -1.1.

LOG₁₀(q/T) - ksat = 4 x 10⁻⁵ [ms⁻¹]

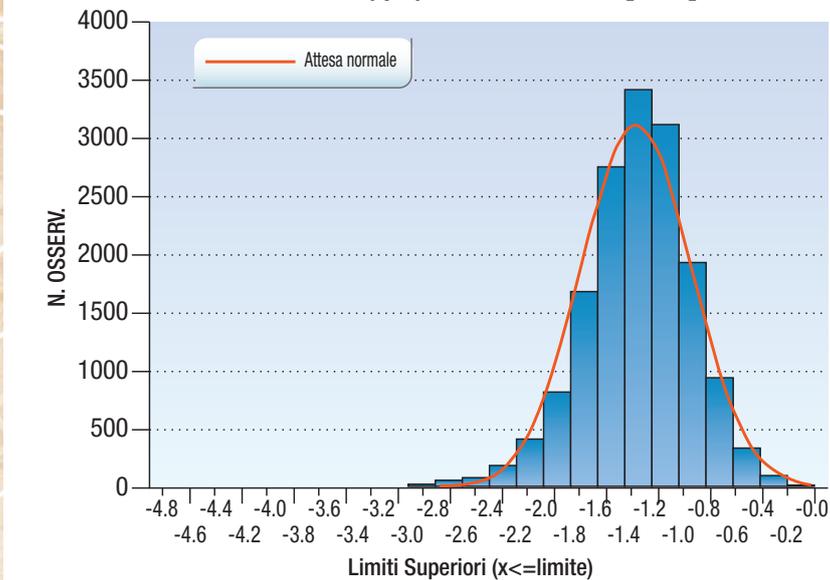
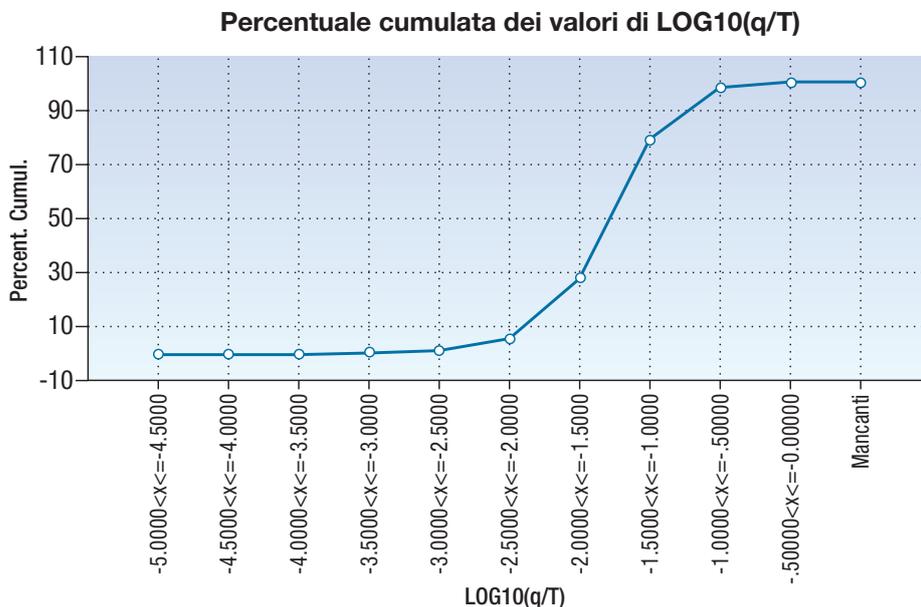


Figura 3.5.18
Frequenze cumulate per i valori di $\log_{10}(q/T)$ per le nicchie di frana dell'evento di riferimento



Considerando che la potenza media della coltre di suolo per l'area in studio risulta intorno a 0.7 m, dato un valore medio di permeabilità satura di $4 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, si ottengono per valori di $\log_{10}(q/T)$ di -1.3, -1.2 e -1.1, altezze di pioggia critica rispettivamente di 124 mm/24h, 152 mm/24h e 192 mm/24h, coerenti con le soglie pluviometriche di innesco ricavate mediante metodi empirici (AA.VV., 2005).

Come è stato sopra menzionato uno dei test della robustezza del modello consiste nel confrontare le distribuzioni di frequenza del valore $\log_{10}(q/T)$ relative alle nicchie delle frane dell'evento di riferimento (istogramma di **figura 3.5.17**) ad un campione equivalente di nicchie generate in maniera casuale (**figura 3.5.19**).

Da tale confronto risulta evidente che le frane osservate mostrano una più alta concentrazione in corrispondenza dei valori centrali della distribuzione; questo è interpretabile come una prova del successo del modello.

Un modo per comprendere meglio questa affermazione è quello di osservare che mentre per le frane osservate solo il 16% del campione risulta collocato in aree giudicate stabili a priori dal modello, per il campione di nicchie casuali questo quota sale al 53%.

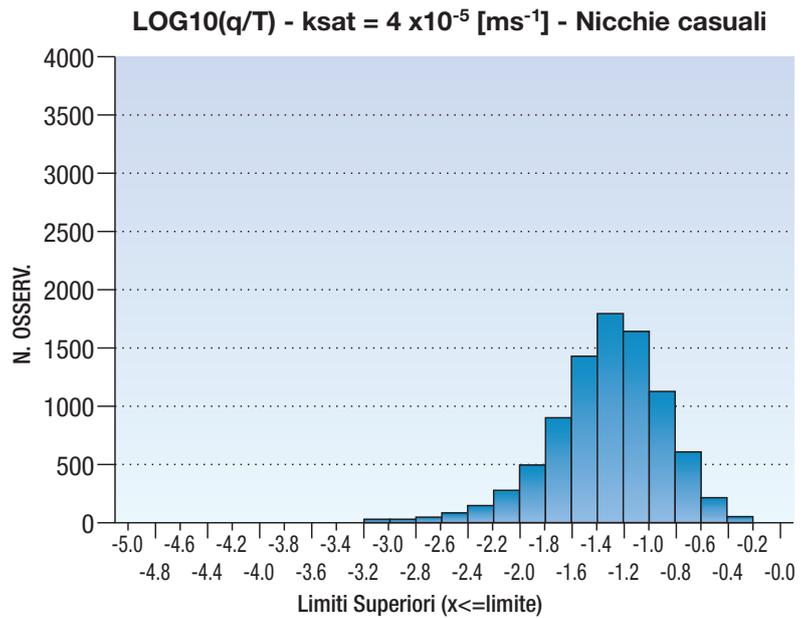
Un ulteriore approfondimento d'analisi è stato dedicato al 16% di frane ricadenti nelle aree giudicate stabili a priori dal modello.

Attraverso un'analisi di prossimità, è stato verificato che il 55% di queste è collocato ad una distanza massima di 10 m da aree non giudicate stabili a priori; un ulteriore 5% risulta a non più di 10 m da infrastrutture stradali e/o edifici; se si considera una distanza massima di 20 m, la percentuale di nicchie prossime ad aree non giudicate stabili a priori arriva al 78%; un ulteriore 4% di frane risulta a non più di 20 m da manufatti (**figura 3.5.20**).

Queste cifre sembrano indicare che una cospicua parte delle frane ricadenti in aree giudicate stabili a priori dal modello sono interpretabili come inesattezze cartografiche ed in misura minore probabilmente imputabili anche all'impatto negativo sul territorio delle opere antropiche di cui il modello digitale del terreno non ha tenuto conto.

Figura 3.5.20
Risultati dell'analisi di prossimità delle nicchie di frana ubicate in aree valutate stabili a priori dal modello.

- Sono stati considerati due casi:
- 1) percentuali di nicchie di frana per distanze inferiori a 10 m e 20 m dal confine con aree per cui è noto il valore di q/T ;
 - 2) percentuali di nicchie di frana per distanze inferiori a 10 m e 20 m da manufatti, calcolate sulle nicchie che non rientrano nel caso 1).



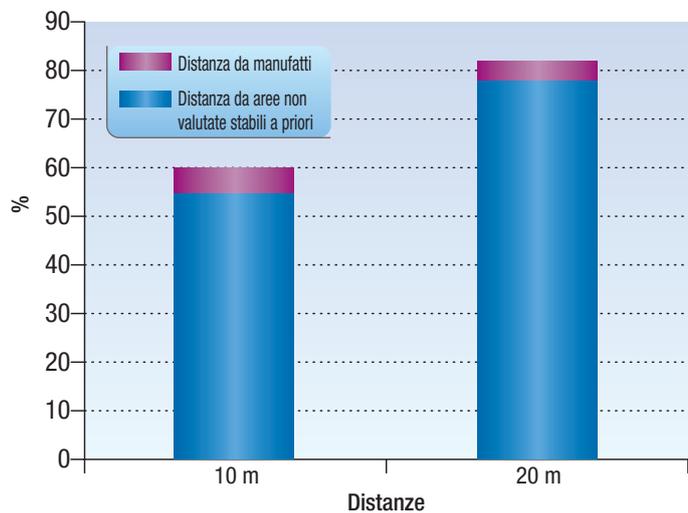
Contributi

Si ringraziano il prof. Pasquale Versace e l'ing. Giovanna Capparelli, Dipartimento Difesa del Suolo, Università della Calabria, per il prezioso contributo nello sviluppo dell'argomento inerente al Metodo FlalR. Si ringrazia Francesco Palamara, Area Previsione e Monitoraggio Ambientale, Arpa Piemonte, per il fondamentale contributo nell'attività di sviluppo del software sperimentale di visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni.

Si ringraziano il dott. Ferruccio Forlati, il dott. Pierfranco Sorzana, il dott. Dario Fontan, il dott. Fabrizio Piana e il dott. Michele Morelli per il contributo dedicato alla fase conoscitiva delle tipologie di frana del contesto collinare delle Langhe.

Figura 3.5.19
Istogramma di frequenza di $\log_{10}(q/T)$ per un campione di nicchie generate in maniera casuale

Analisi di prossimità delle nicchie di frana ubicate in aree valutate stabili a priori dal modello



Bibliografia

I lavori contrassegnati da asterisco non sono citati esplicitamente nel testo.

AA.VV. (2002) *Progetto Interreg Il Italia Svizzera 1994-99 – Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e delle conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico*. Unione Europea – Regione Piemonte – Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.

AA.VV. (2005), *Note Illustrative alla Carta di Pericolosità per Instabilità dei Versanti del Foglio 1:50.000 Dego*, Arpa Piemonte – Apat

Cancelli A. & Nova R. (1985), *Landslides in soil debris cover triggered by rainstorm in Valtellina (Central Alps, Italy)*. Proc. 4th Int. Conf. on Landslides, Tokyo, pp. 1-267, 272.

Cannon S.H. & Ellen S.D. (1985), *Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California*. California Geology, vol. 38 (12): pp. 267-272.

Ceriani M., Lauzi S. & Padovan N. (1994), *Rainfall thresholds triggering debris flows in the alpine area of Lombardia Region Central Alps – Italy*. In: “Man and Mountain”94”, I Convegno internazionale per la protezione e lo sviluppo dell’ambiente montano, pp. 123-139.

Clarizia M., Gullà G. & Sorbino G. (1996), *Sui meccanismi di innesco dei soil slip*. Atti del Convegno Internazionale *La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica*, Alba (CN), 5-7 Novembre 1996, vol. 1, pp. 585-597.

*Dietrich W.E. & Montgomery D.R. (1998), *SHAL-STAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. Technical Report by NCASI - <http://ist-socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>

Govi M., Mortara G. & Sorzana P. (1985), *Eventi idrologici e frane*. Geol. Appl. e Idrol., XVIII, pp. 3.

*Green W.H. & Ampt G.(1911), *Studies of soil physics, Part I – The flow of air and water through soils*. The Journal of Agricultural Science vol. 4, pp. 1-24.

Mein, R. G., and Larson, C. L. 1973. *Modeling Infiltration During Steady Rain*, Water Resources Research, vol. 2, pp. 384-394.

*Montgomery D.R. & Dietrich W.E. (1994), *A physically based model for the topographic control of shallow landsliding*. Water Resources Research, vol. 30, pp. 1153-1171.

Progetto IFFI (2004)

<http://www.webgis.csi.it/arpagis/index.htm>;
<http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/IFFI/>.

*Rawls W.J., Brakensiek D.L. & Miller N. (1983), *Green-Ampt infiltration parameters from soils data*. Journal of Hydraulic Engineering 109(1), pp. 62-70.

Sirangelo B. & Versace P. (1992), *Modelli stocastici di precipitazione e soglie pluviometriche di innesco dei movimenti franosi*. Atti del XXIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Firenze, vol. 3, pp. D361-D373.

Sirangelo B., Liritano G. & Versace P. (1996), *Il preannuncio dei movimenti franosi innescati dalle piogge. Valutazione della probabilità di mobilitazione in presenza di indeterminatezza nell'identificazione del modello FLAI*. Atti del XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, vol. 3, pp. 378-391.

Sirangelo B. & Versace P. (2002), *Un modello probabilistico per la predizione in tempo reale delle altezze di precipitazione a scala oraria*. Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, vol. 2, pp. 395-414.

*Sirangelo B., Capparelli G. & Versace P. (2002), *Modellazione idrologica dei movimenti franosi innescati dalle piogge*. Atti del Convegno “Conservazione dell’Ambiente e Rischio Idrogeologico”, Assisi, pp. 11-12.

*Skempton A.W. & De Lory F.A. (1957), *Stability of natural slopes in London Clay*, 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., vol. 2, pp. 378-381.

Versace P., Sirangelo B. & Capparelli G. (2002), *Forewarning model of the landslides triggered by rainfall*. Atti del convegno “New Trends in Hydrology” – 1st Italian – Russian Workshop”, Rende (CS), Italy.

Wieczorek G.F. & Sarmiento J. (1983), *Significance of storm intensity-duration for triggering of debris flows near La Honda, California*, Geological Society of America Abstracts with Programs, vol. 15, n. 5, pp. 289.