

PARTE II

PERICOLOSITA' E RISCHIO IDROGEOLOGICO

Pericolosità e rischio idrogeologico

Generalità

Si è detto che il concetto di *pericolosità* è definito in ambito tecnico come probabilità di accadimento di un determinato evento calamitoso nell'ambito di una assegnata finestra temporale. Il tema è vasto e articolato e richiede alcune considerazioni di carattere generale. La definizione di *pericolosità idraulica* e *pericolosità da dissesto geomorfologico* seguono criteri e percorsi concettuali profondamente diversi.

La sollecitazione climatica è fortemente connessa con l'occorrere di frane e alluvioni. E sia le frane che le alluvioni hanno effetti sulla dinamica morfologica del contesto territoriale. Basti ad esempio ricordare, che l'evoluzione plano altimetrica degli alvei fluviali è legata soprattutto all'occorrenza delle piene più importanti. La pericolosità idraulica è tuttavia legata a processi connessi al ciclo naturale del clima e tende a presentare una certa periodicità, almeno in senso statistico.

Le porzioni di territorio colpite da dissesto franoso e alluvionale, se si trascurano per semplicità processi specifici ancorché importanti quali ad esempio le frane di sponda, sono generalmente complementari. Le *alluvioni di fondovalle*, intese nel senso di formazione geologica, in generale, vanno a delimitare l'inviluppo delle inondazioni succedutesi nel tempo sul territorio e sono per buona parte indipendenti dal dissesto geomorfologico, naturalmente connesso alla acclività dei versanti. La dinamica morfologica è assai diversa nei due tipi di dissesto. E questo per entità, modalità con le quali si esplica e soprattutto per via dell'effetto di retroazione che le variazioni morfologiche stesse implicano sull'evolvere della pericolosità nel tempo. La probabilità di alluvione in un determinato sito resta sostanzialmente stazionaria a parità di altre condizioni, mentre quella di frana è in certa misura condizionata dall'evolvere della frana stessa.

Definizioni operative

Si fa riferimento a fenomeni di dissesto di tipo geomorfologico e alluvionale. Le porzioni di territorio ove tali processi possano arrecare danno a persone e a beni sono dette *aree vulnerabili*. Gli *elementi a rischio* comprendono la vita umana, i beni, le attività economiche e le infrastrutture presenti in un'area vulnerabile e possono essere caratterizzati mediante

- a) la *tipologia* (persone, beni, attività, infrastrutture, risorse ambientali);
- b) l'*entità E* o *valore* degli elementi (numero di persone, valore economico dei beni);
- c) la *vulnerabilità V* degli elementi, cioè l'attitudine a subire danni per effetto dell'evento di piena. Quest'ultima si esprime mediante un coefficiente compreso tra zero, assenza di danno e uno, perdita totale.

Sia *E* che *V* possono variare in funzione del tipo e dell'intensità dell'evento calamitoso oltreché da fattori contingenti legati all'occorrere specifico del processo. Tra questi l'ora del giorno, il periodo dell'anno, o l'occorrere aleatorio di fenomeni concomitanti come, ad esempio, fatti naturali o sociali. Si ricordi ad esempio che l'alluvione del 1966 colpì Firenze nella mattina di un giorno festivo, proprio nel cuore del lungo ponte di inizio novembre. È probabile che il numero relativamente modesto delle vittime, trentanove, rapportato al quadro complessivo della tragedia, derivi proprio dal fatto che le attività lavorative e le scuole fossero chiuse.

La *intensità*, a sua volta, essere stimata attraverso indici quali, ad esempio, la massa e l'energia connessa all'occorrenza di una frana oppure il volume, i livelli e la velocità delle acque esondate durante un'alluvione.

In corrispondenza di ciascun evento i -esimo si definisce il *danno* D come prodotto

$$D_i = E_i V_i$$

del valore del bene per la sua vulnerabilità. Il danno, da un punto di vista dimensionale, è espresso in termini economici: ad esempio in euro.

Se in un periodo di t anni si verificano N_t eventi calamitosi e sul territorio sono presenti n elementi a rischio, il danno totale D_t sul periodo è pari a

$$D_t = N_t \sum_{i=1}^n D_i = N_t \sum_{i=1}^n E_i V_i$$

Il danno totale D_t è pertanto una variabile casuale la cui distribuzione dipende da quelle di N_t e di D_i . Per un determinato elemento a rischio e un prefissato periodo di tempo t è il valore atteso del danno totale D_t , opportunamente attualizzato attraverso una generica funzione A , costituisce il *rischio*

$$R = A(D_t)$$

Ai fini applicativi è possibile approssimare il valore di R attraverso l'equazione che segue, nota come *equazione del rischio*

$$R = EVH_t = D_t H_t$$

ove H_t è definita la *pericolosità*, cioè la probabilità di osservare nel periodo t almeno un evento calamitoso. V ed E rappresentano rispettivamente il valore medio della vulnerabilità e il complesso degli elementi a rischio soggetti a danno. La pericolosità è legata al periodo di ritorno T , che esprime l'intervallo di tempo nel quale l'intensità dell'evento viene superata mediamente una sola volta dalla relazione

$$H_t = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t$$

La pericolosità espressa dalla equazione precedente può essere facilmente tabulata per quantificarne l'entità in funzione del tempo di ritorno T dell'evento considerato e del periodo t di riferimento. Un esempio è riportato nella tabella che segue ove su ciascuna riga è, appunto, riferita ad un singolo periodo di riferimento. È così facile osservare, a titolo di esempio, che la probabilità di occorrenza H_{20} dell'evento centennale in venti anni è pari al 18.2%.

Tabella 1: Pericolosità in funzione del tempo di ritorno per diversi periodi di riferimento

	Tempo di ritorno [anni]							
	2	5	10	20	50	100	200	500
2	75.0%	36.0%	19.0%	9.8%	4.0%	2.0%	1.0%	0.4%
5	96.9%	67.2%	41.0%	22.6%	9.6%	4.9%	2.5%	1.0%
10	99.9%	89.3%	65.1%	40.1%	18.3%	9.6%	4.9%	2.0%
20	100.0%	98.8%	87.8%	64.2%	33.2%	18.2%	9.5%	3.9%
50	100.0%	100.0%	99.5%	92.3%	63.6%	39.5%	22.2%	9.5%
100	100.0%	100.0%	100.0%	99.4%	86.7%	63.4%	39.4%	18.1%
200	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	98.2%	86.6%	63.3%	33.0%
500	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99.3%	91.8%	63.2%

Le fonti del rischio idrogeologico sono molteplici e legate ad una pluralità di fattori causali. In particolare, il *rischio idraulico* scaturisce dalla possibilità di danno a persone, beni o infrastrutture in conseguenza al trasporto di acqua e solidi trasportati nei corpi idrici superficiali. Può essere a sua volta suddiviso in *rischio da esondazione*, connesso al trasporto di massa liquida, e *rischio da dinamica d'alveo*, connesso al trasporto sedimenti al fondo o in sospensione. Non è da trascurare anche il rischio da trasporto di sedimento flottante, in genere ramaglie, alberi e altri oggetti galleggianti resisi disponibili sulle sponde o nelle aree allagate. Le conseguenze si traducono, in generale, in azioni d'urto o di trascinamento sulle strutture, principalmente i ponti, e sull'incremento del rischio di esondazione per occlusione dei fornicci. Un terzo tipo di rischio, connesso al trasporto di massa inquinante, non verrà preso in considerazione ai fini del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico anche se può risultare importante nella progettazione delle opere di mitigazione.

La determinazione del rischio secondo l'atto di indirizzo e coordinamento

La formulazione appena presentata è coerente con i disposti dell'Atto di indirizzo e coordinamento. Il DPCM, nel presentare l'equazione del rischio nella classica formulazione, indica tuttavia che, nell'analisi, non è necessario *...giungere ad una valutazione di tipo strettamente quantitativo*.

Sono da considerarsi come elementi a rischio innanzitutto le persone e inoltre, in linea di priorità, almeno

1. gli agglomerati urbani comprese le zone di espansione urbanistica;
2. le aree su cui insistono insediamenti produttivi impianti tecnologici di rilievo, in particolare quelli definiti a rischio ai sensi di legge;
3. le infrastrutture a rete e le vie di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale;
4. il patrimonio ambientale e i beni culturali di interesse rilevante;
5. le aree sede di servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, strutture ricettive ed infrastrutture primarie.

L'individuazione e perimetrazione delle aree a pericolosità

GENERALITÀ

La definizione delle aree soggette a pericolosità idrogeologica è operazione delicata che comporta effetti normativi di grande rilevanza sul territorio interessato. L'attività di individuazione e perimetrazione delle aree a pericolosità idrogeologica può, e diremmo *deve*, essere condotta con diversi livelli di approfondimento, in funzione della tecnologia e del quadro conoscitivo al momento disponibili. Quest'ultimo, inoltre, risente di circostanze locali e complessive che ne comportano una sostanziale disomogeneità sul territorio del bacino dovuta, tra l'altro, al diverso stato di attuazione degli strumenti urbanistici, al livello di antropizzazione del territorio, alla disomogeneità nella vulnerabilità e pericolosità delle diverse aree. I dati disponibili, assai spesso, tendono difatti ad addensarsi laddove il rischio sul territorio venga a indicare la necessità di indagini specifiche mentre vaste aree, magari egualmente pericolose ma al momento meno vulnerabili, restano con un livello conoscitivo relativamente più modesto.

Un progetto di aggiornamento ed omogeneizzazione del quadro conoscitivo, svolto alla scala sinottica del bacino, richiede l'allocazione di tempi ed energie tali che ne sconsigliano la programmazione essendo assai più utile concentrare l'attenzione laddove maggiore è l'esigenza di accuratezza e approfondimento. È dunque ragionevole il fatto che tale lavoro debba essere condotto per fasi successive a seguire, tra l'altro, lo spirito dinamico della pianificazione di bacino.

L'Atto di indirizzo e coordinamento sottolinea tra l'altro come l'individuazione esaustiva delle possibili situazioni di pericolosità idrogeologica richieda, in generale, metodologie complesse, capaci di stimare la probabilità di accadimento in aree mai interessate in epoca storica da tali fenomeni. Riporta tuttavia come sia anche ragionevole assumere, quale elemento essenziale per la individuazione del livello di pericolosità, la localizzazione e la caratterizzazione di eventi avvenuti nel passato riconoscibili o dei quali si ha al momento presente cognizione.

SIGNIFICATO DELLA CARTOGRAFIA

La cartografia delle *aree a pericolosità* costituisce in effetti la ricaduta operativa più importante per quanto attiene alla attività connessa alla elaborazione del *PAI*. Sulla base della perimetrazione delle diverse fasce, si è detto dianzi, vengono apposti vincoli e emanate normative che interagiscono in maniera profonda con la vita del territorio. Occorre chiarire bene il carattere di queste mappe, al fine di comprendere appieno il significato dell'attività svolta e programmarne gli sviluppi futuri. Trattiamo prima il caso della pericolosità idraulica.

L'inondazione del territorio è un fatto caratterizzato da una forte componente aleatoria, determinata da una complessa catena di processi fisici. Questi, a partire dalla formazione dell'afflusso meteorico, ne determinano la trasformazione in deflussi nel reticolo di drenaggio prima, in livelli idrometrici lungo le aste, portate tracimanti e ancora livelli idrometrici e velocità di deflusso sulle aree allagate, poi. È facile quindi comprendere come la componente stocastica, nel fenomeno complessivo, possa risultare significativa e, alle volte, persino dominante rispetto a quella deterministica.

L'approccio allo studio di questi fenomeni può essere di ordine storico, sulla base della memoria degli eventi passati, o analitico, attraverso l'impiego di modelli matematici a diverso livello di complessità. I limiti raggiunti da un evento di inondazione, oltre ai livelli idrici e le velocità, sono in effetti la realizzazione di un processo stocastico che, in termini generali, ha probabilità minima di ripetersi due volte negli medesimi aspetti di dettaglio. La mappatura su base storica, stante anche la natura intrinsecamente dinamica dell'assetto del territorio alle diverse scale di interesse, ha dunque un valore che va debitamente valutato.

La modellistica numerica, a sua volta, risente della drastica concettualizzazione alla quale i processi fisici di base sono inquadrati e descritti. A tale aspetto si aggiunge l'informazione disponibile sul territorio che risulta limitata, stante anche la complessità, la non stazionarietà e l'estensione dell'ambiente fisico considerato. È pure noto dall'esperienza che il grado di incertezza sulla previsione viene soltanto in parte mitigato dall'incremento nella qualità e quantità dei dati disponibili e dalle risorse di calcolo impiegate. Lo stato vegetativo delle colture e della vegetazione riparia, la dinamica della meteora nello spazio e nel tempo, la presenza variabile di ostacoli sul terreno quali, ad esempio, le automobili, il determinarsi occasionale di elementi di criticità nelle difese di sponda, sono solo alcuni degli elementi che vengono ad influire, in maniera a volte rilevante, sull'effettiva estensione delle aree soggette all'inondazione.

Queste considerazioni, naturalmente, non devono scoraggiare rispetto allo sforzo, peraltro indispensabile, teso verso livelli sempre più elevati nella raccolta e

organizzazione dei dati, nell'analisi e nella simulazione dei processi in esame. È tuttavia evidente che i risultati degli studi, tradotti nella cartografia di piano, hanno una valenza forzosamente approssimata testimoniata, in prima istanza, dal carattere puramente deterministico della rappresentazione cartografica delle aree a rischio per assegnata frequenza. Il limite delle aree a pericolosità, da noi indicato attraverso una linea sulla carta topografica, dovrebbe in effetti essere sostituito da una fascia corrispondente a diversi livelli di probabilità. È d'altro canto ovvia la considerazione che la formulazione in probabilità delle aree sottoposte a vincolo determinerebbe problemi insuperabili in fase di emanazione ed applicazione delle normative.

Nessuno strumento analitico né alcuna, seppur perfetta, memoria storica potrà dunque garantire risultati in termini di certezza dell'estensione e degli effetti prodotti dai fenomeni naturali. Il carattere della perimetrazione deve essere pertanto inteso in senso sostanzialmente convenzionale seppur basato su solide basi tecniche e scientifiche. Il lavoro di svolto costituisce uno strumento dinamico, soggetto a periodiche revisioni dettate dall'incremento del quadro conoscitivo, dallo sviluppo della tecnologia disponibile e dalla generale dinamica del territorio e del clima.

Analoghe considerazioni valgono per la pericolosità geomorfologica. Questa, innanzitutto, ha valenze ed accezioni diverse a seconda della classe di processi che consideriamo. Una colata rapida, un movimento traslativo di una coltre superficiale, una frana rotazionale profonda sono lontane per meccanismo di innesco, massa coinvolta e dinamiche spaziali e temporali. La cartografia della pericolosità viene in effetti ad individuare aree che mostrano una propensione al dissesto. Secondo la letteratura più recente è possibile ottenere buoni risultati identificando porzioni di territorio omogenee per determinate associazioni di caratteristiche quali la litologia, la pedologia, l'acclività, l'esposizione. Valutando l'incidenza statistica dei dissesti osservati nelle diverse *unità territoriali* è possibile stimare la relativa probabilità di dissesto.

L'efficacia di un tale approccio è proporzionale al quadro conoscitivo disponibile, sia per quanto attiene alle caratteristiche del territorio e del clima, sia per la consistenza del patrimonio di dissesti osservati. Anche in questo caso, in presenza di dati scarsi o scarsamente affidabili può essere utile procedere seguendo la memoria storica pur nell'ambito di un sistematico lavoro di raccolta, archiviazione e manutenzione delle osservazioni.

Pericolosità e rischio idraulico

GENERALITÀ

Si è detto che la questione è quella della stima della probabilità di inondazione di un certo sito, nell'arco di un periodo di tempo assegnato ed, eventualmente, il livello raggiunto dalle acque e la loro velocità. La risposta ha conseguenze rilevanti sull'assetto del territorio, con vitali implicazioni di ordine sociale, culturale ed economico.

Il problema si manifesta a diverse scale spaziali, comprese tra la dimensione caratteristica dei quartieri urbani soggetti ad inondazione per insufficienza delle reti pluviali, pochi ettari, a quella del bacino sotteso dai diversi elementi del reticolo di drenaggio: da pochi a migliaia chilometri quadrati. Le scale temporali, dettate al processo della corrivazione e della propagazione delle piene, sono fissate dalla dimensione spaziale dell'area interessata e dalle caratteristiche dinamiche dei processi meteorologici.

Le fenomenologie da studiare sono assai complesse e numerosi aspetti scientifici del problema, risultano tuttora inesplorati. Una adeguata valutazione della sollecitazione

meteorica richiede una conoscenza dei campi di precipitazione con livelli di approssimazione superiori a quelli oggi disponibili. Così i processi che controllano la formazione delle piene sono tuttora descrivibili in modo sostanzialmente rudimentale. Ancora rilevante e, per molti aspetti da approfondire, è l'impatto delle azioni antropiche sull'ambiente fluviale. Proprio tale impatto viene drammaticamente evidenziato dagli effetti alle volte catastrofici, osservati in seguito ad eventi apparentemente non eccezionali dal punto di vista strettamente pluviometrico.

Lo sforzo scientifico nella direzione di una migliore conoscenza dei processi fisici di base è stato tuttavia massiccio nel corso degli ultimi anni ed ha prodotto una larga messe di nuove metodologie e modelli previsionali, migliorando senz'altro il livello conoscitivo. Questo fatto non sempre ha comportato maggiore efficacia nella scelta delle procedure di analisi da parte dei tecnici. Alle volte difatti non è chiaro, o quantomeno non è compreso appieno, l'effettivo campo di validità dei modelli, le approssimazioni connesse con i diversi passaggi della concettualizzazione del fenomeno, le ipotesi spesso drastiche, alla base delle procedure. Ne deriva che proprio i modelli si prestino talvolta a mascherare l'effettiva incapacità di interpretazione dei complessi fenomeni in gioco. La conseguenza che ne può derivare è un'artificiosa sensazione di capacità di previsione che si rivela, in realtà, del tutto virtuale.

Allo stesso modo, l'impiego dei sensori remoti ha dilatato la visione dei sistemi idrografici e dei processi meteorologici, aprendo una finestra dall'enorme potenziale di sviluppo conoscitivo e previsionale. Accade tuttavia che queste belle immagini vengano introdotte disinvoltamente in ingresso a modelli privi della sufficiente base fisica ma capaci di risultati graficamente assai suggestivi. Ne derivano sistemi supporto alle decisioni che possono risultare privi di adeguato contenuto fenomenologico.

Per comprendere il valore delle nuove tecnologie ed i possibili effetti potenzialmente negativi dei nuovi strumenti di modellazione dei processi idrologici, valga l'esempio dell'ormai consolidato impiego dell'analisi probabilistica e dell'inferenza statistica in campo idrologico. Il concetto di *periodo di ritorno* consente di valutare la vulnerabilità idrologica e stabilire la relazione fra rischio, danno atteso ed affidabilità del sistema in esame. In alcuni casi, tuttavia, si dimentica di validare le ipotesi necessarie a definirne correttamente la stima e si trascura, soprattutto, l'incertezza con cui tale stima viene determinata. Può allora succedere di porre sottili argomentazioni su eventi centennali o millenari valutati in base a campioni ventennali, spesso affetti da non trascurabili errori di misura, come accade nel caso delle portate di piena.

Convien dunque osservare che, il valore scientifico e l'efficacia progettuale dei nuovi strumenti di conoscenza e di previsione, sono proporzionali allo sforzo dei singoli ricercatori di superare gli steccati disciplinari. Si tratta di perseguire una sintesi tra le diversi punti di vista, meteorologico, idrologico, geomorfologico, urbanistico, solo per citarne alcuni, che aiutano a comprendere fenomeni dinamici di natura complessa quali le piene fluviali e, soprattutto, a valutarne correttamente l'impatto.

QUATTRO PAROLE FONDAMENTALI

I grandi temi del rischio di inondazione, dal punto di vista idrologico, si possono sintetizzare in quattro parole: *percezione*, *previsione*, *prevenzione* e *preannuncio*. Per gli ingegneri idraulici del passato, la difesa dalle alluvioni era un problema percepito a scala prevalentemente locale e sovente valutato e risolto tramite la realizzazione di opere, appunto, localizzate nel sito giudicato pericoloso. Questa soluzione invocava talvolta l'esame di dati idrologici e idraulici anch'essi limitati nello spazio e nel tempo. Il problema del preannuncio veniva spesso trascurato, anche per la difficoltà di comunicare e condividere rapidamente le informazioni, nonché per una inadeguata organizzazione infrastrutturale e sociale.

Una moderna *percezione* della pericolosità idrologica associa la coscienza del verificarsi ineluttabile dei nubifragi e delle loro conseguenze idrologiche, alla consapevolezza del danno economico e sociale connesso a tali eventi. Tale coscienza, è bene ricordarlo, è ben diversa dal quadro fornito dalla *memoria d'uomo*. L'arco temporale della vita umana è difatti insufficiente per consentire l'osservazione statisticamente significativa dei processi idrologici. L'osservazione non sistematica è inoltre condizionata da molteplici fattori contingenti che ne riducono l'efficacia. È noto a tutti come eventi estremi, anche in presenza di danni gravi, vengano spesso percepiti nel pensiero comune e giustificati, come anomalie irripetibili e per questo rimossi e dimenticati con estrema rapidità. La *percezione* del rischio naturale è il primo, fondamentale, elemento della sequenza dei provvedimenti a difesa del territorio. Deve essere coltivata all'interno della cultura del territorio, a partire dalle scuole, per preparare quella coscienza civica indispensabile per comprendere i problemi, valutarli correttamente e creare i presupposti per la condivisione delle scelte.

La *previsione* della pericolosità idraulica tende a valutare la vulnerabilità idrologica del territorio; ad esempio, il periodo di ritorno delle eventuali esondazioni, la loro estensione, il danno atteso e l'affidabilità complessiva dei sistemi e delle procedure di mitigazione. Impone una valutazione dinamica del rischio, in grado di fornire indicazioni sulla risposta del sistema agli interventi strutturali, che si possono operare non soltanto sul reticolo locale, ma sull'intero complesso della rete idrografica e della superficie drenata; essa tende anche a comprendere i meccanismi fisici che governano la risposta del sistema alle modificazioni di uso del suolo, sia a scala locale che a scala di bacino.

I modelli previsionali basati sulla combinazione di conoscenze sulla frequenza e l'intensità dei nubifragi, sulla propensione del terreno a favorire il ruscellamento, sulla morfologia degli alvei, sono in grado di fornire una risposta, ancorché imperfetta, ai quesiti posti da tale concezione. Le previsioni puramente statistiche, invece, sono strettamente legate alla validità delle ipotesi di ergodicità e stazionarietà del sistema necessarie a risolvere il problema inferenziale, senza dimenticare le incertezze indotte dalla consistenza relativamente modesta dei dati idrometrici disponibili.

A sua volta la *prevenzione*, tramite gli interventi di mitigazione vede coesistere due filosofie, apparentemente diverse, ma non inconciliabili e spesso complementari. La prima comporta la predisposizione di interventi strutturali, che, sotto il nome storico e generico di *opere idrauliche*, comportano una modificazione artificiale del reticolo idrografico e dei versanti tramite diverse forme di sistemazione. Ad essa fanno anche capo la manutenzione straordinaria degli alvei e dei versanti, ivi comprese le opere esistenti e la correzione degli asservimenti fluviali quali, ad esempio, le tombature. Una seconda filosofia mira all'intervento di tipo non strutturale, abbracciando un largo ventaglio di opzioni, dagli interventi di manutenzione ordinaria e di polizia fluviale, alla predisposizione di efficaci sistemi di preannuncio, allarme e protezione civile, alla adeguata formulazione di norme e direttive urbanistiche ed edilizie, alla copertura assicurativa del rischio naturale.

Il ruolo del *preannuncio* di piena, soprattutto per le aree di fondovalle, è altrettanto essenziale. La messa a punto di sistema efficace richiede uno sforzo crescente in maniera non lineare con il ridursi del bacino di formazione della piena. Si possono individuare, nella sostanza, tre livelli di complessità. I sistemi *puramente idrometrici* sono basati sulla stima delle portate e dei relativi tiranti idrici sulla base delle stesse grandezze osservate nelle sezioni di monte. I sistemi *pluviometrici e idrometrici* si fondano sulla misura delle piogge e sul relativa trasformazione in portate e livelli in alveo attraverso modelli di trasferimento eventualmente calibrati in tempo reale.

Un ulteriore livello di complessità si ha con l'integrazione di sistemi *meteorologici, idrologici e pluviometrici* che possano anticipare i tempi della previsione alla

formazione della meteora. Si tratta di sfruttare previsioni meteo alla scala locale, basate su procedure di downscaling dinamico da modelli alla scala sinottica, per anticipare al massimo la precisione. Tale previsioni, in ingresso a modelli a diverso livello di complessità, consentono le stime delle altezze idrometriche nelle diverse sezioni del reticolo idrografico. Un continuo confronto con le osservazioni a terra consente di ridurre progressivamente la varianza di stima.

Le tecnologie e le metodologie di osservazione e trasmissione dei dati sono ormai ragionevolmente assestate e quelle di diffusione della comunicazione superano addirittura la capacità previsionale degli addetti ai lavori. Al contrario, il margine di prevedibilità dei nubifragi, ovvero il preannuncio dell'evoluzione quantitativa degli eventi di pioggia intensa, a partire dalle osservazioni di precipitazione a terra, dal monitoraggio radar e dalle immagini satellitari, presenta ancora vasti margini di perfezionamento, soprattutto per la grande variabilità che i campi di precipitazione presentano nel tempo e nello spazio.

Molte aree di fondovalle sono spesso soggette all'inondazione improvvisa da parte di corsi d'acqua caratterizzati da bacini che tendono a produrre piene di tipo impulsivo. I tempi caratteristici di formazione, per buona parte del bacino dell'Arno, sono al di sotto delle cinque ore. L'efficacia dei sistemi di preannuncio, in questi casi, dipende proprio dalla capacità di estendere l'orizzonte al di là della realtà prodotta dai sistemi di monitoraggio delle piogge e dei livelli idrometrici.

Perimetrazione delle aree a pericolosità

GENERALITÀ

La prima metodologia usualmente presa in considerazione è quella basata su criteri storici e inventariali. Si tratta di inferire la attitudine di un'area ad essere inondata a partire dalla memoria di eventi calamitosi passati. La tecnica ha una indubbia ragionevolezza e consente il tracciamento di scenari realistici, basati su tracce spesso inoppugnabili di dissesti che oggettivamente hanno cimentato il territorio. L'osservazione sperimentale costituisce peraltro un pilastro irrinunciabile per qualsiasi modello previsionale e va tenuta nella massima considerazione. Esistono tuttavia diverse critiche che possono essere mosse al trasferimento diretto del dato rilevato verso mappe di pericolosità che è bene discutere con attenzione.

Le cartografie delle aree storicamente allagate, spesso prodotte a livello comunale, presentano una forte disomogeneità qualitativa se assemblate alla scala del bacino idrografico. Le misure dipendono fortemente dalle modalità di osservazione e sono spesso condizionate dall'occorrere stesso dell'emergenza. La loro trasposizione in carte tematiche è svolta con criteri diversi, anche in funzione della tecnologia disponibile negli uffici. Ne deriva un quadro di difficile valutazione complessiva, in specie ove si vadano ad imporre norme e vincoli sul territorio. L'Autorità di Bacino, attraverso il Piano Stralcio per la riduzione del rischio idraulico, ha fatto un significativo passo avanti verso la costruzione di un quadro organico³⁸. Un ulteriore contributo può derivare dalle osservazioni da piattaforma satellitare, secondo tecnologie in continua evoluzione.

³⁸ La Norma 6 recita, tra l'altro, *Entro dodici mesi dall'approvazione del Piano di Bacino, stralcio Rischio Idraulico, le Amministrazioni Comunali, attraverso il recepimento delle linee guida provinciali dei Piani Territoriali di Coordinamento, ove esistenti, adotteranno le «Carte comunali delle aree allagate», restituite in scala 1:5000 e informatizzate secondo le direttive comunitarie e gli standards nazionali.*

A tale incertezza si aggiunge quella derivante da una ulteriore questione. L'inondazione di una porzione di territorio può verificarsi a seguito di diversi classi o tipologie di evento. Quella tipica è data dal superamento della capacità di smaltimento di un tronco del reticolo. Attraverso la stima della massima portata che l'alveo è in grado di convogliare sotto prefissate condizioni di manutenzione, è possibile risalire alla frequenza del corrispondente livello idrometrico e, conseguentemente, dell'evento di tracimazione. La memoria storica individua, in questo caso, una criticità fisiologica della rete che, in corrispondenza di un determinato evento e salvo interventi di sistemazione, tenderà a ripetersi. Esistono tuttavia eventi alluvionali che, anche in parte, possono derivare da ulteriori fenomeni specifici di difficile previsione. Tra questi, i cedimenti di argini non dovuti alla tracimazione, l'interferenza di ostacoli, ad esempio veicoli trascinati dalla corrente, a ridurre della capacità di smaltimento dell'alveo, l'occlusione casuale dei forni dei ponti.

La caratterizzazione statistica di questi eventi è spesso di grande difficoltà e la probabilità di accadimento è spesso largamente indipendente dal sito specifico e grava in misura pressoché uniforme, pensiamo ad esempio alla probabilità di sifonamento di un argine, su lunghi tratti di alveo. Accade inoltre che la frequenza presumibile di questi incidenti, fissato il sito, sia assai minore da quella dell'evento idrometrico e pluviometrico corrispondente. Ne deriva un quadro confuso, nel quale accadimenti diversi, derivanti da molteplici fattori casuali, si mescolino insieme a concorrere all'evento calamitoso cui, nelle diverse componenti, corrisponde uno complesso spettro di frequenze.

È dunque comprensibile come, progressivamente, si siano prese in considerazione tecniche analitiche basate su modelli idrologici e idraulici che consentano di descrivere, per assegnate frequenze, i processi che conducono alla formazione della piena e alla sua propagazione nel reticolo, i meccanismi di tracimazione e inondazione del territorio. Gli aspetti teorici e tecnici del problema possono essere affrontati con approcci a diversi livelli di complessità in relazione, sia alla descrizione fisica dei processi idrologici e idraulici considerati, sia alla rappresentazione fisica e morfologica del territorio ove tali processi si svolgono.

La finalità essenzialmente operativa che le procedure di perimetrazione delle aree inondabili devono avere, induce a rivolgere l'attenzione verso tecniche che globalmente siano in grado di fornire risultati con il livello di approssimazione confrontabile con quello dei dati disponibili. Occorre infatti tener presente che, al di là della maggiore o minore complessità della modellistica idrologica e idraulica adottata, la bontà dei risultati ottenuti è fortemente condizionata dalla qualità e quantità dei dati di ingresso. Per esempio, una inadeguata rappresentazione geometrica dell'alveo e delle aree adiacenti il corso d'acqua può pregiudicare la correttezza dei risultati, come pure la mancanza di affidabili scale di deflusso, di idonee serie storiche dei dati idrologici, delle caratteristiche fisiche del bacino.

Per passare dalla definizione delle aree inondabili alla valutazione del rischio idraulico e alla sua rappresentazione cartografica, è necessario poi definire idonei criteri che, partendo dalla conoscenza del territorio e dei valori economici e ambientali in esso presenti, consentano la localizzazione e quantificazione dei livelli di rischio.

IL RISCHIO DA ESONDAZIONE

Il rischio idraulico da *esondazione* trae origine dalla eventualità che una determinata area sia invasa dalle acque fuoriuscite da reti di drenaggio naturali e/o artificiali per insufficiente capacità di smaltimento delle portate in transito nella stessa rete, oppure per collasso di opere di contenimento. Per *capacità di smaltimento* si deve intendere la massima portata che può transitare in un tratto del corso d'acqua con un'altezza d'acqua contenuta entro le sommità delle sponde o degli argini. A parità di portata, la

capacità di smaltimento del tratto può variare nel tempo per cause sistematiche e/o accidentali quali, ad esempio *interventi plano-altimetrici* in alveo tali da variare la sezione del deflusso, il tracciato planimetrico, il profilo altimetrico, *variazioni di scabrezza*, dovute per esempio a modifiche della geometria trasversale oppure alla formazione e sviluppo di vegetazione, *occlusioni localizzate* prodotte da detriti galleggianti quali, ad esempio, i tronchi, da accumuli di materiale d'alveo, da frane di sponda o di versante.

La *rottura delle opere di contenimento* è conseguente alla perdita di stabilità di strutture arginali e di opere di sbarramento. Si manifesta in generale durante l'evento alluvionale attraverso, ad esempio, il sifonamento e lo scalzamento di un rilevato arginale. Può tuttavia originarsi per cause diverse quali il progressivo abbassamento dell'alveo per erosione generalizzata che determina l'instabilità di sponde e manufatti.

Solo in parte connesso al rischio da esondazione è il fenomeno del *ristagno* che si verifica in quelle zone che per caratteristiche geomorfologiche non dispongono di efficienti capacità di drenaggio superficiale e/o profondo e pertanto risultano suscettibili al trattenimento di acque sulla superficie del terreno, siano esse di esondazione, meteoriche o di falda.

IL RISCHIO DA DINAMICA D'ALVEO

Il rischio idraulico da *dinamica d'alveo* trae origine dai fenomeni di erosione e/o deposito, e quindi dalla evoluzione plano-altimetrica dell'alveo che si manifesta per effetto della interazione tra la corrente liquida e il materiale mobile costituente l'alveo. La dinamica planimetrica riguarda la tendenza dell'alveo ad evolvere il proprio percorso attraverso processi più o meno periodici quali i meandri o le configurazioni di tipo intrecciato. Questi processi interessano soprattutto l'erosione di sponda. La dinamica altimetrica è governata dai fenomeni di erosione e di deposito. Questi sono la conseguenza dello squilibrio tra la *capacità di trasporto* della corrente e la portata solida in arrivo al tronco considerato. La *capacità di trasporto* di un tratto fluviale è difatti la portata solida che potenzialmente la corrente è in grado di trasportare. Essa dipende dalle caratteristiche geometriche, idrauliche e sedimentologiche del tratto considerato.

La portata di sedimenti che arriva al tronco considerato dalla rete idrografica a monte costituisce il *trasporto solido* e dipende dalle caratteristiche del corso d'acqua e del bacino di alimentazione quali il clima, la geologia e la vegetazione, nonché da attività antropiche a scala di bacino e in alveo quali l'uso del suolo, la creazione di sbarramenti e l'estrazione di inerti. Un determinato tratto fluviale è dunque in equilibrio quando la capacità di trasporto uguaglia il trasporto solido. Si verifica invece erosione o sovralluvionamento quando la capacità di trasporto è rispettivamente maggiore e minore del trasporto solido.

I fenomeni di dinamica d'alveo possono esplicitarsi su scale spaziali e temporali molto diverse. In generale si possono distinguere fenomeni di tipo *esteso* e fenomeni di tipo *localizzato*. Ad esempio, si ha il fenomeno di *erosione estesa* quando l'abbassamento delle quote d'alveo coinvolge tratti del corso d'acqua dell'ordine delle centinaia di volte la larghezza media dell'alveo. Tali processi si esplicano in generale con tempi dell'ordine di diverse decine di anni. In tal caso si possono manifestare condizioni di rischio anche indipendenti dalla insorgenza di eventi alluvionali. Possiamo fare cenno, ad esempio, alla progressiva riduzione della stabilità di sponde, arginature e manufatti, al abbassamento dei livelli idrici medi in alveo con conseguenze sulle eventuali possibilità di utilizzo della risorsa e sui rapporti dinamici tra falda e corso d'acqua, all'innescarsi di fenomeni di erosione regressiva sui tronchi terminali degli affluenti.

Si invece ha il fenomeno dell'erosione *localizzata* quando le variazioni altimetriche dell'alveo interessano un'estensione ridotta dell'alveo (in generale non superiore alla sua larghezza media). Tale fenomeno può manifestarsi anche in occasione di un singolo evento di piena. Analogamente si hanno fenomeni di deposito *localizzati*, quali per esempio la formazione di barre sedimentarie e gli accumuli di materiale a monte di sbarramenti, e fenomeni di deposito *estesi*, in seguito ai quali lunghi tratti d'alveo subiscono il fenomeno dell'innalzamento delle quote di fondo alveo. Si parla in questo caso di sovralluvionamento. Tali fenomeni possono indurre incrementi delle quote idriche tali da rendere non trascurabile l'aumento della pericolosità degli eventi di piena e del rischio da esondazione a questi connesso.

Alcuni cenni al riferimento internazionale

LA SITUAZIONE AMERICANA

Le diverse attività di protezione dal rischio di inondazione fanno riferimento al programma assicurativo *NFIP* (National Flood Insurance Program), varato nel 1968 e gestito dalla *FEMA* (Federal Emergency Management Agency). Al programma assicurativo accedono i residenti delle aree a rischio idraulico i quali stipulano a proprie spese una polizza assicurativa contro i danni a strutture e beni causati da inondazioni. Tale polizza è attivabile solo se l'Amministrazione Locale adotta idonei strumenti di pianificazione del territorio e piani di gestione delle aree a rischio (Ciurli, 1997).

In particolare, i piani di gestione devono contenere adeguati studi idrologici e idraulici finalizzati alla caratterizzazione del rischio nelle aree inondabili. A tale proposito risultano già individuate dalla *FEMA* circa 22000 Comunità Locali per le quali sussiste rischio di inondazione (*FHBM*, Flood Hazard Boundary Map). Ogni Comunità Locale interessata, solo dopo aver presentato un piano, seppur preliminare, di gestione delle aree a rischio, può partecipare al *NFIP* attivando una copertura assicurativa immediata, seppur ridotta.

Nel frattempo vengono portati avanti gli studi idrologici-idraulici di dettaglio per una più precisa definizione dei livelli di rischio e delle polizze assicurative.

La *FEMA* ha stabilito delle linee guida alle quali gli "Study Contractors" devono attenersi nella redazione degli studi di dettaglio per la delimitazione delle fasce di rischio idraulico utili alla definizione dei premi assicurativi (*FIRM*, Federal Insurance Rate Map). Questi ultimi sono generalmente correlati ai tiranti idrici di sommersione.

Per la elaborazione delle *FHBM* l'evento di piena di riferimento è quello avente tempo di ritorno 100 anni. Vengono definite anche le aree inondabili in corrispondenza di eventi relativi a tempi di ritorno compresi tra 100 e 500 (aree a rischio moderato), mentre le aree esterne vengono classificate a rischio *minimo*.

Le aree ricadenti all'interno della fascia 100 anni (*SFHA*, Special Flood Hazard Areas) vengono suddivise in ulteriori 7 zone che, in funzione delle conoscenze di dettaglio disponibili, corrispondono a livelli e tipologie di rischio differenti. Nella tabella che segue si riporta una breve descrizione di tale classificazione:

Tabella 2

A	Zona caratterizzata da inondazione con tempo di ritorno 100 anni Mancano studi idrologici e idraulici di dettaglio che ne definiscano le quote d'acqua (in generale viene redatta su base storica o morfologica);
AE	Zona caratterizzata da inondazione con tempo di ritorno 100 anni. Le quote di inondazione, definite con studi di dettaglio, risultano superiori a 3 piedi;
AH	Zona caratterizzata da inondazione con tempo di ritorno 100 anni. Le quote di inondazione, definite con studi di dettaglio, risultano comprese tra 1 e 3 piedi (generalmente acque di ristagno).
AO	Zona caratterizzata da inondazione con tempo di ritorno 100 anni. Le quote di inondazione, definite con studi di dettaglio, risultano comprese tra 1 e 3 piedi (terreni in pendenza generalmente soggetti a transito di basse lame d'acqua)
A99	Zona caratterizzata da inondazione con tempo di ritorno 100 anni. Tali zone saranno oggetto di protezione idraulica in conseguenza della realizzazione prevista a livello federale di un piano di interventi.
V	Zone costiere soggette a inondazione centennale con rischio aggiuntivo dovuto a mareggiate. Mancano studi di dettaglio per la definizione delle quote di sommersione.
VE, VI-30	Zone costiere soggette a inondazione centennale con rischio aggiuntivo dovuto a mareggiate. Sono disponibili studi di dettaglio per la definizione delle quote di sommersione
B, C, X	Zone ricadenti nelle fasce a rischio moderato (fascia 100-500 anni) o minimo (oltre 500 anni) che tuttavia sono suscettibili di inondazioni per piogge intense e inadeguato funzionamento delle reti di drenaggio locale (fognature o sistemi di bonifica)
D	Zone per le quali non sono stati redatti studi ma dove si è a conoscenza della possibilità di alluvione

Per le zone ricadenti nelle categorie sopra elencate le Comunità Locali devono provvedere a redigere appositi piani di gestione (piani urbanistici, piani delle tipologie costruttive, programmazione della stipula di polizze assicurative) nonché programmi di riduzione del rischio attraverso interventi non strutturali quali azioni normative, monitoraggio, piani di allerta e evacuazione e strutturali come aree di espansione, arginature, serbatoi per la laminazione.

LA SITUAZIONE FRANCESE

Il contesto normativo francese risale ai primi anni del 1800 con leggi mirate essenzialmente alla gestione delle acque in termini di sfruttamento delle risorse e degli interventi connessi. Un inquadramento legislativo più generale e organico è contenuto nella Legge 16 dicembre 1964 ove si istituisce la gestione delle acque alla scala del bacino idrografico, introducendo aspetti normativi connessi alla tutela della risorsa e alla classificazione dei corsi d'acqua. In materia di inondazioni occorre arrivare al Decreto n. 95-1042 del 24 settembre 1992, ove vengono individuate le direttive rivolte ad arrestare l'urbanizzazione nelle aree inondabili, ad accrescere il livello di sicurezza delle zone a rischio già urbanizzate, alla salvaguardia ambientale. Di particolare interesse sono le disposizioni relative al controllo dei tempi di corrivazione, con riferimento ai fattori connessi all'uso del suolo, alle pratiche agricole, alle reti di drenaggio urbano, nonché quelle relative alla riduzione del danno e alla manutenzione dei corsi d'acqua.

In particolare, questo ultimo aspetto è messo in evidenza in tutti i documenti di pianificazione come la prima misura da adottare per la riduzione del rischio di inondazione, ed è espressamente ripreso e ribadito dalla Circolare del 27 gennaio 1994 della Commissione Interministeriale dell'Acqua nel documento contenente il

Programma Pluriennale di Prevenzione dalle Inondazioni. Una legge specifica (L. n. 95-101 del 12 febbraio 1995) regola la manutenzione della vegetazione arborea delle sponde e degli argini, nonché l'uso agricolo dei terreni rivieraschi.

Metodi analitici

GENERALITÀ

Il problema della individuazione e perimetrazione analitica delle aree a pericolosità idraulica per assegnata frequenza può essere affrontato a partire da diversi punti di vista. La questione, da un punto di vista scientifico, non è univocamente determinata ed implica una serie di passaggi concettuali e tecnici che proviamo brevemente a discutere. Paradossalmente, secondo una sequenza abbastanza inusuale nella modellazione delle piene, è l'idraulica che detta le condizioni per il tipo di modellazione idrologica da prendere in considerazione. Esistono difatti, in generale, diversi approcci idraulici al problema della individuazione e perimetrazione delle aree a pericolosità. Tra questi, al di là di metodi statici basati sulla topografia locale, poniamo l'attenzione su due classi di metodologie.

La prima ipotizza che il letto del fiume e le fasce perifluviali si comportino come un unico macroalveo nel quale la corrente di piena, anche una volta esondata dal letto fluviale, conserva un assetto ragionevolmente monodimensionale. Sotto tale ipotesi è possibile descrivere il problema con un modello di moto stazionario, applicato all'insieme dell'alveo e della fascia adiacente, considerando la portata di assegnata frequenza che sollecita il sistema in moto permanente.

Lo schema è semplice, sia per quanto riguarda l'idrologia che l'idraulica. È difatti indipendente dall'idrogramma e, in particolare, dal volume di piena che non interviene a determinare le aree inondabili. La sola portata di piena, eventualmente derivata da modelli regionali, è sufficiente a definire la forzante meteorologica. Allo stesso modo non richiede la definizione di schemi idraulici di tracimazione arginale né procedure per la descrizione del meccanismo bidimensionale di inondazione. È anzi possibile derivare facilmente le velocità ed i livelli idraulici sul territorio dalle caratteristiche della corrente sulle sezioni.

Questo approccio richiede una accurata descrizione della fascia perifluviale attraverso accurati rilievi. Lo schema monodimensionale della corrente mal si presta a descrivere l'inondazione di aree pianeggianti, con alvei pensili o fortemente arginati e la presenza di edificato continuo o elementi infrastrutturali.

In alternativa si può utilizzare un modello completo. Si parte da un idrogramma di piena opportunamente valutato per la frequenza prefissata. Un codice di calcolo in moto vario provvede a descrivere il flusso alveato con i relativi afflussi dovuti agli apporti laterali. La tracimazione, una volta che la capacità di smaltimento di un tronco è saturata, viene descritta con opportuni schemi idraulici di stramazzo. Il volume derivato dall'alveo viene propagato nelle fasce perifluviali attraverso modelli a diverso livello di concettualizzazione.

Questa seconda visione del problema è senz'altro più accurata e, se vogliamo, realistica. Richiede tuttavia la formulazione di molte ipotesi sui meccanismi che governano i diversi elementi della catena concettuale che concorre alla definizione del modello.

La stima delle portate di piena viene normalmente condotta mediante tecniche di regionalizzazione che utilizzano i dati idrometrici e pluviometrici rilevati in regioni idrologicamente omogenee. In questo modo si possono ottenere stimatori efficienti dei valori massimi e delle probabilità di superamento delle portate, soprattutto nei siti sprovvisti di dati storici. Tale approccio è stato adottato nel progetto *VAPI* (Valutazione

delle Piene in Italia), svolto nell'ambito del Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del CNR, alla cui bibliografia si rimanda per ulteriori approfondimenti.³⁹

I CODICI IN MOTO STAZIONARIO

Si è detto che lo schema di moto unidimensionale permanente rappresenta uno dei possibili strumenti di analisi. Vale la pena di ricordare, a questo proposito, la disponibilità *shareware* del codice di calcolo *HEC-RAS 2 e 3*, sviluppati dall'US Army Corps of Engineers (1991). Modelli in moto non stazionario sono stati sviluppati e commercializzati dal Danish Hydraulic Institute come il *MIKE 11*, ove le equazioni di base sono risolte mediante uno schema implicito alle differenze finite sia per correnti subcritiche che supercritiche, e più recentemente, dall'US Army Corps of Engineering (2001) con il codice *HEC-RAS* che prevede tra l'altro la possibilità di utilizzo dell'applicativo *HEC-GeoRAS* (2000) in ambiente *ArcView*, finalizzato alla predisposizione dei dati territoriali di input quali sezioni idriche e aree di esondazione.

L'applicativo richiede la disponibilità di un modello digitale del terreno di tipo *TIN* (Triangulated Irregular Network, Delaunay, 1936) in grado di rappresentare sia l'alveo inciso sia le aree adiacenti il corso d'acqua. *HEC-GeoRAS*, sulla base di tale informazione territoriale, genera le sezioni trasversali del corso d'acqua da adottare nelle simulazioni idrauliche. Di qui la necessità di disporre di *DTM* di adeguata risoluzione. Tali dati devono ovviamente essere integrati con le sezioni in corrispondenza di eventuali opere trasversali quali ponti, tombini o traverse.

A seguito delle elaborazioni idrauliche, che possono essere svolte con il codice *HEC-RAS* versione 2.2 o superiori, il programma fornisce, tra i dati di output, la superficie dei livelli idrici e la visualizzazione delle velocità. Le aree inondate vengono definite attraverso una poligonale risultante dall'intersezione della superficie liquida e la superficie del terreno

Nell'ambito delle attività del Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche – Linea 3, è stato messo a punto il codice di calcolo *FRESCURE* (1996) per il tracciamento dei profili di rigurgito in alvei naturali e per la perimetrazione delle aree inondabili. Il codice integra l'equazione del moto permanente di una corrente unidimensionale a superficie libera in corrente lenta e veloce, individuando in automatico le sezioni di controllo e i risalti idraulici. Il solutore numerico consiste in uno schema alle differenze finite.

Il codice consente inoltre il calcolo della profondità di erosione conseguente al passaggio dell'onda di piena, individuando l'abbassamento delle varie sezioni dell'alveo in funzione degli squilibri di massa derivati dall'equazione di continuità e di un valore di massimo scavo predefinito dall'operatore.

La perimetrazione delle aree inondabili viene effettuata in automatico in ambiente *AutoCad* e consiste nella delimitazione delle zone ove transita la portata considerata, oppure l'80% di tale valore. Qualora la portata determini condizioni di deflusso al di sopra delle sommità arginali, la procedura di perimetrazione si limita a comprendere l'area tra i profili arginali, lasciando all'operatore la delimitazione delle aree inondabili a tergo degli argini. A tale proposito il codice di calcolo è in grado di simulare la riduzione delle portate per effetto delle esondazioni laterali attraverso un metodo iterativo di chiusura dell'equazione di continuità sul tronco.

I volumi fuoriusciti dalle sommità arginali, in mancanza di evidenti linee di compluvio, si diffondono sul territorio con dinamiche di natura bidimensionale determinate dalle caratteristiche morfologiche e infrastrutturali delle aree interessate.

³⁹ Si veda, ad esempio, Versace *et Al.* 1989, Cao *et Al.* 1991, Villani *et Al.*, 1993, Rossi e Villani, 1994; Brath, 1995; Brath *et Al.* 1997; Maione e Tomirotti, 1998, Villi, 1998

LA MODELLISTICA DI TIPO BIDIMENSIONALE

La modellistica di tipo bidimensionale è tuttora oggetto di ricerca, soprattutto in relazione ai complessi fenomeni di interazione tra i deflussi di piena e la morfologia del territorio urbanizzato. Una schematizzazione di tipo quasi bidimensionale è stata proposta da Cunge (1975) mediante una rappresentazione separata del fiume e delle aree inondabili, e utilizzando un modello di moto vario unidimensionale accoppiato ad uno schema di celle interconnesse in cui il livello idrico è calcolato usando la sola equazione di continuità.

Braschi et Al. (1994) risolvono le equazioni di De Saint-Venant in forma bidimensionale. Lo schema è validato su esperienze di laboratorio generando onde improvvise di sommersione mediante l'apertura istantanea di una paratoia. Si mostra tra l'altro, la maggiore velocità di propagazione del fronte su superficie inizialmente asciutta rispetto ad una con un piccolo livello d'acqua iniziale. Un'applicazione del modello riguarda in particolare l'inondazione del centro urbano di Firenze durante l'evento del novembre 1966.

D'Alpaos e Defina (1994), attraverso un modello bidimensionale risolvono le equazioni di De Saint-Verant in forma numerica evidenziando gli effetti delle irregolarità del terreno sulla modalità di propagazione dell'onda di sommersione. In particolare, si mostra come la velocità di propagazione del fronte d'onda può assumere valori estremamente variabili, compresi tra 0.2 m/s a 2.8 m/s.

Il problema della corretta rappresentazione del terreno è affrontato da Amighetti et Al. (1994), mentre nel lavoro di Blade et Al. (1994) si evidenzia l'inadeguatezza di un modello tipo *flood storage area* per il calcolo delle aree inondate in quanto l'assunzione di livello costante in tali aree, anche se non partecipanti all'equazione dinamica ma comprese nella equazione di continuità, non è realistica.

De Martino et Al. (2000) adottano un modello bidimensionale per la simulazione della propagazione delle onde di sommersione nell'ipotesi di acque basse, risolvendo le equazioni di base mediante la tecnica di integrazione ai volumi finiti. I risultati del modello sono stati confrontati dapprima con soluzioni analitiche (problema di Stoker per schema unidimensionale) e successivamente con esperienze di laboratorio consistenti nella generazione di un fronte di sommersione su fondo orizzontale inizialmente asciutto.

Nasello et Al. (2000) propongono un modello bidimensionale mediato sulla verticale e nell'ipotesi di modesti tiranti idrici, in grado di simulare la propagazione di onde di piena in presenza di terreni con morfologia irregolare e inizialmente asciutti. La stabilità del modello è raggiunta attraverso una scomposizione delle funzioni incognite in una componente cinematica e una componente diffusiva. Il modello è stato utilizzato per la simulazione dell'evento di piena del fiume Imera Meridionale che nel 12-13 ottobre 1991 ha inondato la piana di Licata. La maglia del modello digitale del terreno è costituita da circa 10000 elementi su circa 19 kmq di estensione (circa 6 punti quotati per ettaro)

Pagliara et Al (1998) utilizzano un modello bidimensionale sviluppato presso il Public Works Reserch Institute del Giappone, in cui le equazioni del moto sono risolte mediante un schema esplicito alle differenze finite, per lo studio della dinamica di inondazione conseguente alla rotta del fiume Versilia durante l'evento di piena del 19 giugno 1996.

Paris & Settesoldi (1998), in uno studio condotto per l'Autorità di Bacino del Fiume Arno, propongono un modello di moto vario unidimensionale finalizzato alla analisi di propagazione dell'onda di piena nell'asta principale del fiume Arno e alla valutazione del fenomeno di laminazione indotto dalle aree di espansione attuali e di progetto, sotto diversi scenari idrologici. La considerevole complessità del sistema fisico considerato,

sia dal punto di vista idrologico, che da quello idraulico e territoriale ha richiesto il ricorso a schemi di rappresentazione che, indipendentemente dal livello di approssimazione scelto, fossero adeguati a mettere in conto le principali caratteristiche fenomenologiche del sistema e ne consentissero una corretta simulazione nelle varie condizioni esaminate.

Paris *et Al* (1999), in un successivo studio commissionato dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno, ha proposto una schematizzazione quasi bidimensionale per la perimetrazione delle aree inondabili lungo l'asta principale del fiume Arno, del tipo proposta da Cunge (1975). La metodologia utilizzata associa ad un modello idraulico non stazionario, analogo a quello adottato nello studio precedente, una rappresentazione *a celle di accumulo* delle aree inondabili adiacenti il corso d'acqua, opportunamente schematizzate e connesse idraulicamente. L'individuazione di tali celle è tale da riprodurre la reale topografia del terreno, mentre la propagazione dei livelli idrici nelle celle avviene attraverso la sola legge di continuità. A tale scopo è necessario considerare il volume accumulato nella singola cella e le sue variazioni dovute agli scambi di portata con le celle circostanti. Pertanto, ad ogni passo temporale l'equazione di continuità impone il bilancio tra i volumi netti transitati attraverso la cella e la variazione di volume locale, sotto le ipotesi che il volume accumulato in ciascuna cella è univocamente correlato all'altezza idrica nella cella, e le portate scambiate sono funzione dei livelli a monte e a valle delle connessioni idrauliche. Una descrizione più dettagliata di tale metodologia verrà svolta nel capitolo successivo.

ULTERIORI MODELLI

La notevole complessità dei fenomeni idrologici e idraulici alla scala territoriale ha indotto l'Università della Basilicata ad avviare un programma di ricerca presso il *LA.T.I.B.I* (Laboratorio di Tecnologie Informative nella pianificazione dei Bacini Idrografici), finalizzato alla gestione delle risorse idriche e al sistema degli invasi artificiali in funzione delle attività di difesa del suolo e della pianificazione territoriale. In particolare, tra le diverse linee di ricerca, la *linea 6* prevede lo studio dei processi di inondazione delle aree perfluviali. La linea si divide in tre aree con il comune obiettivo della redazione delle mappe di inondazione a fronte di un evento di piena naturale o artificiale. In particolare, per le *aree urbane* viene impiegato il già citato modello unidimensionale *MIKE 11* accoppiato con il modulo *MIKE GIS* per l'analisi della dinamica fuori alveo e la valutazione dell'inondazione in ambiente urbano. Per il modulo *MIKE GIS* occorre generare un DTM rappresentante la morfologia urbana con i relativi dettagli di strade e costruzioni di vario genere. Per le *aree vallive* viene ancora adottato il modello *MIKE 11*. E' già disponibile un'applicazione al bacino del Basento, con superficie di circa 1500 kmq, che ai fini della simulazione è stato suddiviso in due zone, a monte la zona di simulazione idrologica, a valle quella idraulica per un tratto di 85 km. Tale tratto è stato caratterizzato geometricamente mediante 88 sezioni ricavate da un modello digitale del terreno con maglia 5 metri, generato da immagini telerilevate. Noti i livelli idrici, vengono poi tracciate le poligonali delle aree allagate.

LO STUDIO IDRAULICO PER IL PIANO STRAORDINARIO EX DL 180/98

La redazione del Piano Straordinario fu affrontata dall'Autorità attraverso la unione di criteri diversi per le aree connesse con l'asta principale e per quelle connesse con gli affluenti.

Per quanto riguarda l'asta principale e i principali affluenti (Greve, Bisenzio, Ombrone, Pesa, Elsa, Era) nel loro tratto di rigurgito, le aree a pericolosità idraulica *molto elevata* sono state individuate e perimetrate con riferimento all'evento trentennale attraverso uno studio idrologico e idraulico condotto dalla Autorità nel 1999. Il suddetto studio, ai fini della successiva redazione del *PAI* è stato esteso ad eventi con tempi di ritorno pari

a 30, 100, 200 e 500 anni. La parte idrologica si basa sui risultati delle valutazioni condotte della Regione Toscana per la Regionalizzazione delle Portate di Piena nel territorio Toscano (1997), con un adattamento delle procedure informatiche al fine di consentire la valutazione degli ingessi idrologici al modello idraulico.

Il modello idrologico prevede in particolare la possibilità di ricostruire le portate che, dai sottobacini affluiscono all'asta principale, utilizzando la tecnica dell'idrogramma unitario istantaneo di tipo geomorfologico associato a eventi di diversa durata e diverso tempo di ritorno con l'adozione di coefficienti di ragguaglio variabili per ciascun affluente in funzione della durata dell'evento e dell'area globalmente sottesa a valle della confluenza. Questo al fine di garantire da monte verso valle delle portate nell'asta principale critiche per ciascun tratto e nello stesso tempo compatibili con la dimensione complessiva del bacino sotteso.

Il modello idraulico prevede una schematizzazione del moto alveato di tipo monodimensionale vario e una schematizzazione delle aree laterali non direttamente connesse al corso d'acqua con un classico sistema a celle. Le celle laterali definite in funzione delle opere che le delimitano (argini o rilevati) e caratterizzate ciascuna da una specifica legge di invaso, sono connesse tra di loro e con l'alveo attraverso elementi idraulici tipo stramazzo o luce a battente. Le aree inondabili sono perimetrate in alveo sulla base dei livelli forniti dal modello di moto vario e nelle aree laterali sulla base dei livelli nelle celle su cartografia di base in scala 1:10000.

Pericolosità da fenomeni franosi

GENERALITÀ

Il WP/WLI (1993) definisce il termine *frana (landslide)* come *movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante* (Cruden, 1991)⁴⁰. Il "Glossario Internazionale delle Frane"⁴¹ è riportato in appendice, e ad esso si fa riferimento per ogni ulteriore definizione dei termini diretti alla classificazione delle varie tipologie di frana, alla loro caratterizzazione morfometrica e al loro inquadramento dal punto di vista dell'attività. Una esauriente trattazione delle metodologie di censimento delle frane è nel lavoro di Amanti *et Al.* (1996).

Le frane rappresentano uno dei fenomeni naturali più calamitosi sul territorio, essendo ogni anno causa di danni a persone e beni. Secondo quanto riportato dal Catalogo AVI⁴² sono almeno 17.000 gli eventi franosi che hanno interessato il territorio nazionale nel periodo intercorrente fra il 1918 e il 1998 (Cipolla *et Al.*, 1999). Di questi, 2.620 hanno prodotto la compromissione totale del bene oggetto del danno, mentre 1.352 hanno provocato vittime o feriti. È per questo motivo che gli organi amministrativi centrali sono impegnati verso un più razionale utilizzo del territorio, mediante l'acquisizione di conoscenze di base derivanti dalla mappatura dei processi di dinamica di versante e delle loro interazioni con insediamenti e infrastrutture.

Il bacino dell'Arno non immune da questo tipo di fenomeni. Gli eventi occorsi durante l'autunno del 2000, ad esempio, hanno colpito in particolare le Province di Lucca e Pistoia oltre a numerosi siti in tutto il bacino, testimoniando elevati livelli di pericolosità

⁴⁰ Analogamente a quanto suggerito dallo stesso autore preferiamo tradurre il termine *landslide* semplicemente con *frana*, anziché con *fenomeno franoso* o *movimento di versante*, in modo da agevolare la comprensione degli utilizzatori non tecnici.

⁴¹ @Immettere riferimento del glossario

⁴² Censimento delle Aree Vulnerate Italiane realizzato a cura del CNR-GNDCI

e rischio cui sono soggette molte porzioni del territorio. Un'idea della tipologia delle frane e del livello di rischio connesso si può evincere dall'istogramma di Figura 1 relativo ai fenomeni censiti per la redazione dei Piani Straordinari redatti ai sensi della L. 226/99. L'inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI) relativo al Bacino dell'Arno, conta circa 900 dissesti, mentre l'estensione delle aree a pericolosità da frana *elevata* e *molto elevata* (PF3 e PF4), nella cartografia allegata al PAI, misura nell'ordine di 47000 ettari.

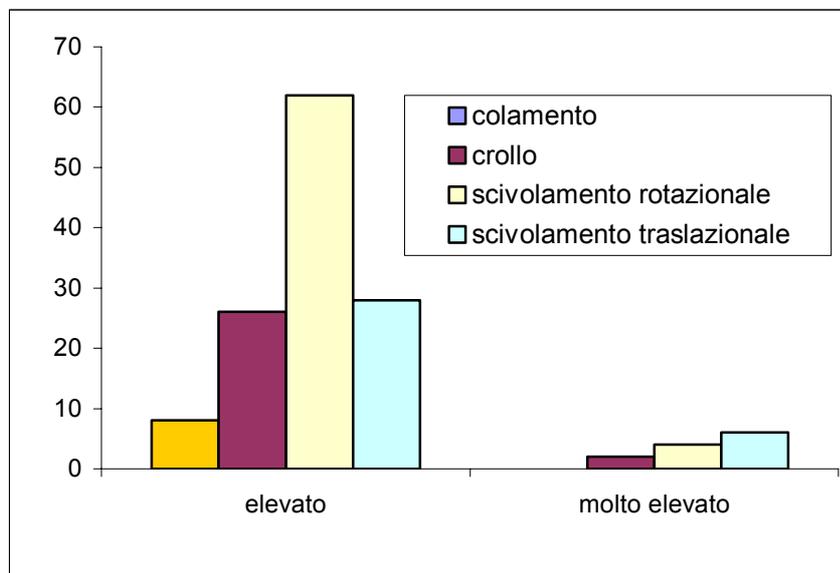


Figura 1 - Le tipologie di frane classificate in classi di rischio R3 e R4 ai sensi della 267/98 e ricadenti nel bacino dell'Arno. Il valore in ordinate è relativo al numero di dissesti osservati.

L'inventario dei dissesti legati ai fenomeni franosi e la raccolta dei relativi dati caratteristici, fornisce indicazioni la cui accuratezza ed attendibilità è direttamente proporzionale alle modalità operative. È un dato utile e, il più delle volte imprescindibile. Non permette tuttavia una efficiente stima della suscettibilità del territorio al verificarsi dei dissesti, in particolare in quelle aree in cui il censimento è deficitario o in cui, ad esempio, non si sono registrati da lungo tempo eventi pluviometrici particolarmente intensi. Sebbene molte frane siano determinate dalla riattivazione di processi quiescenti, è facile comprendere che la naturale dinamica dei versanti implichi l'occorrere di fenomeni di neoformazione che non necessariamente andranno ad ubicarsi in corrispondenza di eventi pregressi. Il movimento franoso implica, fra l'altro, un abbassamento del livello energetico della corpo di frana comportando la trasformazione di energia potenziale in cinetica, prima, e la relativa dissipazione per attrito o urto anelastico, poi. È dunque ragionevole che la nuova configurazione successiva al dissesto possa, in generale, essere più stabile e dunque meno suscettibile, almeno in linea di principio, di ulteriori movimentazioni.

Da qui l'interesse allo sviluppo di tecniche e metodologie adatte alla determinazione della pericolosità e della suscettibilità da frana che possano dare indicazioni attendibili anche in quelle aree non direttamente interessate da fenomeni di dissesto conosciuti.

Metodologie per la determinazione della pericolosità e della suscettibilità da frana

INTRODUZIONE

Una esauriente analisi delle tecniche di valutazione della pericolosità si ritrova nei lavori di Hartlèn e Viberg (1988), Carrara *et Al.*, (1990; 1991), Canuti *et Al.*, (1999), Guzzetti *et Al.*, (1999), Regione Lombardia (2000). Una rigorosa e completa valutazione della pericolosità, in generale, non può prescindere da un'analisi probabilistica, sulla base della combinazione di più elementi (Canuti e Casagli, 1996). Tra questi ricordiamo la previsione *spaziale*, quella *temporale*, quella *tipologica*, quella dell'*intensità*, dell'*evoluzione* e della *pericolosità indotta* dal fenomeno.

La valutazione della pericolosità da frana è materia che, al di là dell'impostazione concettuale, trova il suo presupposto nella qualità dei dati di base sul territorio. I primi esempi di carte di pericolosità, pubblicate dalla comunità scientifica e dagli uffici preposti alla difesa del suolo, sono in realtà *carte inventario* dei fenomeni franosi arricchite di alcuni elementi derivanti da ulteriori carte tematiche. Spesso, dal punto di vista del rilevamento geomorfologico di dettaglio, si tratta di ottimi elaborati. La trasposizione delle informazioni in termini di pericolosità è tuttavia ottenuta attraverso valutazioni soggettive, basate sull'esperienza di ogni singolo rilevatore. Un forte vincolo alla capacità di analisi di questi processi, è imposto dalla scala di rilevamento delle carte geologiche e dalla accuratezza dei modelli altimetrici del terreno utilizzati. Questi modelli devono essere adeguati sia all'estensione del corpo di frana, sia al grado di dettaglio della zonazione che si intende perseguire. Una rassegna delle metodologie di letteratura è presentata da Bosi (1978), Varnes & Jaeger (1984), Brabb (1984), Hansen (1984)

Un più recente approccio al problema è dato dalla produzione di cartografie di sintesi. Questa deriva dall'adozione di schematizzazioni che, con vari livelli di approfondimento privilegiano, di volta in volta, singole fasi del processo metodologico per la stima della pericolosità. In questo filone di indagini si inseriscono gli studi sulla valutazione della suscettibilità da frana a partire dalla stima di fattori predisponenti legati alle condizioni geologiche, geotecniche, di uso del suolo e geomorfologiche locali. Conviene osservare che la suscettibilità ottenuta secondo le metodologie appena ricordate corrisponde, nella sostanza, ad una previsione di tipo *spaziale*.

Le tecniche più comunemente utilizzate per la valutazione della suscettibilità prevedono l'individuazione di una porzione di terreno di riferimento, *unità di mappatura* o *dominio omogeneo*, definibile sulla base di determinate caratteristiche fisiche che la differenziano dall'unità adiacente secondo limiti ben definiti (Hansen, 1984). La letteratura propone diversi metodi per la suddivisione in tali domini omogenei (Meijerink, 1988; Carrara *et Al.*, 1995; Guzzetti *et Al.*, 1999): tra questi si segnalano criteri geomorfologici, geometrici, e criteri basati sul concetto di *Unità Territoriale Omogenea*. Secondo quest'ultimo concetto, ogni fattore di instabilità viene descritto mediante poche classi sufficienti ad esprimerne la variabilità. Vengono poi prodotte carte tematiche relative a ciascun fattore; l'intersezione tra i diversi tematismi consente di evidenziare diverse porzioni di territorio (*UTO* caratterizzate, ciascuna, da una specifica combinazione). È possibile correlare tali combinazioni con l'evidenza di dissesti osservati nei siti relativi ed evincere, secondo differenti metodologie, una indicazione sulla propensione al dissesto.

Il sistema informativo territoriale costituisce lo strumento naturale per operare sui domini omogenei e pesare i parametri di instabilità e assegnare diversi livelli di suscettibilità. Questo specifico obiettivo può essere raggiunto attraverso vari percorsi

(Brabb, 1984; Hansen, 1984; Carrara 1989; Van Westen, 1993) suddivisibili grossolanamente in due gruppi, *metodi qualitativi e metodi quantitativi*.

In via preliminare, indipendentemente dalla metodologia prescelta, si opera attraverso le seguenti fasi:

1. Realizzazione di una carta inventario dei fenomeni franosi sulla regione in studio o in un sottoinsieme di essa;
2. Preparazione di carte tematiche per quei parametri geomorfologici che sono ritenuti direttamente o indirettamente correlati con l'instabilità dei versanti;
3. Valutazione del contributo di ogni parametro all'instabilità del versante;
4. Classificazione della regione in studio in domini di diverso grado di suscettibilità da frana.

METODI QUALITATIVI

In generale i metodi qualitativi (detti anche metodi *euristici* o *diretti*) si basano sul giudizio soggettivo di chi conduce la valutazione della suscettibilità. I dati sono acquisiti da osservazioni di campagna, generalmente sostenute da interpretazione di foto aeree.

Il metodo *geomorfologico* è quello più semplice, anche se operativamente richiede una notevole spesa in termini di raccolta dei dati. L'accertamento della suscettibilità e la sua zonazione sono condotti da un operatore sulla base di osservazioni di campagna. L'operatore, confidando nella propria esperienza e con l'aiuto di una carta geomorfologica produce, con regole solo parzialmente formalizzate, la carta di suscettibilità per la regione oggetto di studio. Il metodo consente di condurre uno studio relativamente accurato, includendo un insieme di parametri ampio.

I principali svantaggi sono la soggettività nella selezione dei dati e dei loro pesi nel produrre la zonazione, nella difficoltà a comparare carte prodotte da operatori diversi, nella difficoltà da parte di terzi di analizzare criticamente i risultati. Inoltre è concettualmente difficoltosa la procedura di aggiornamento delle cartografie qualora siano disponibili dati più recenti o attendibili.

Numerosi sono gli esempi di carte di pericolosità da frana realizzate su base essenzialmente geologica o geomorfologica (Papani & Tellini, 1973; Radbruch-Hall & Crowther, 1973; Malgot *Et Al.*, 1973; Kienholtz, 1978; Rodriguez Ortis *Et Al.*, 1978; Nilsen *Et Al.*, 1979; Mahr & Malgot, 1979).

Nel metodo della *sovrapposizione di carte tematiche indicizzate* l'operatore seleziona i parametri predisponenti e sceglie a priori i fattori discriminanti, in base alla propria esperienza. Suddivide poi o raggruppa (a seconda che si tratti di parametri continui o discreti) ogni parametro in un numero opportuno di classi, attribuisce un peso ad ogni classe, sovrappone le carte indicizzate, produce una carta di suscettibilità.

In tale metodologia, che ha subito nel tempo alcune modifiche non sostanziali (Amadesi *Et Al.*, 1997, 1985), i fattori ritenuti responsabili dell'instabilità sono generalmente la litologia, la pendenza dei versanti, la giacitura, l'uso del suolo ed altri ancora. Nell'ambito di ciascun fattore vengono attribuiti diversi pesi, costituiti da numeri interi, in base all'esperienza personale degli Autori, acquisita mediante osservazioni di campagna o deduzioni bibliografiche. I vantaggi di questo metodo sono l'uso di regole esplicite e la possibilità di standardizzare le tecniche di manipolazione dei dati. Permane il problema della soggettività nella scelta dei parametri, della loro suddivisione in classi e dell'attribuzione di un peso, della difficoltà ad estrapolare il modello sviluppato per una particolare area ad altri siti.

Litologia, pendenza, uso del suolo, sono solitamente i parametri presi in considerazione in gran parte delle trattazioni di questo tipo. Con essi vengono

intersecati altri fattori più specifici della porzione di territorio considerata. Uno dei primi studi in questo filone è quello sviluppato da Stevenson (1977) e basato sull'indicizzazione di fattori geomorfologici quali l'inclinazione e la complessità morfologica del pendio, geotecnici quali l'indice di plasticità e la profondità della superficie piezometrica, e relativi all'utilizzo del suolo. All'interno del panorama della letteratura nazionale si ricordano i lavori di Amadesi *et Al.* (1977) ed Amadesi e Vianello (1978) che hanno proposto la metodologia adottata dalla Regione Emilia-Romagna per la realizzazione della "Carta della propensione al dissesto idrogeologico". Il metodo prende in considerazione quattro tematismi, litologia (divisa in 10 classi), pendenza dei versanti (5 classi), struttura e giacitura (9 classi), uso del suolo (4 classi). La zonazione deriva direttamente dalla somma algebrica dei pesi relativi ai quattro tematismi. Opportune correzioni ed aggiustamenti vengono effettuati successivamente, per confronto con gli elementi geomorfologici, sismici e climatici presenti nell'area.

Appare ragionevole supporre che, in generale, i diversi fattori considerati concorrano in maniera non lineare a determinare il parametro di stabilità. I metodi appena descritti, almeno in linea di principio non escludono la possibilità di considerare combinazioni complesse dei parametri. L'utilizzo di GIS risulta di fatto imprescindibile per conseguire, tra l'altro, procedure certe e tempi ragionevoli.

Alcune varianti rispetto a questi metodi prevedono, per ciascuna unità omogenea, la stima della percentuale di area interessata da fenomeni franosi. La metodologia è pertanto oggettiva e riproducibile. Uno dei primi esempi di tale metodologia è proposto da Brabb *et Al.* (1972) per la redazione della carta della suscettibilità ai fenomeni franosi nella San Mateo County (California). La percentuale di area in frana è impiegata anche da Radbruch-Hall *et Al.* (1976) per la carta della franosità degli Stati Uniti alla scala 1: 7.500.000.

La densità dei fenomeni franosi può essere rappresentata mediante *isoplete* (Campbell, 1973; Wright *et Al.*, 1974) ovvero con curve di ugual percentuale di area in frana. Tale metodologia è stata adottata da Canuti *et Al.* (1985a) e De Graff & Canuti (1988) per l'analisi della stabilità dei versanti nei depositi marini pliocenici della Toscana. Una metodologia più completa per l'analisi della distribuzione delle aree in frana, è stata proposta da Bosi (1978) e Bosi *et Al.* (1985).

METODI QUANTITATIVI

Questi metodi hanno per scopo la stima, appunto, quantitativa dei parametri predisponenti il dissesto. Questa operazione può avvenire secondo vari livelli di complessità, sulla base del modello utilizzato. L'attribuzione di pesi su base soggettiva ai numerosi parametri che governano la stabilità dei versanti è la principale limitazione ai metodi qualitativi, visti nella precedente sezione. Tale handicap può essere superato tramite l'applicazione di tecniche di statistica tradizionale, eventualmente sostituite dalla messa a punto di reti neurali. Fra i metodi quantitativi vanno annoverate anche le analisi deterministiche, particolarmente applicabili nel descrivere il grado di stabilità a scala di versante, ma che possono essere utilizzate anche in analisi distribuite a scala di bacino. Tra i principali filoni cui possono essere ricondotti i metodi quantitativi di letteratura consideriamo qui i *metodi statistici*, le *Reti Neurali Artificiali* e i *metodi deterministici*.

METODI STATISTICI

Nei *metodi statistici* si confrontano direttamente i parametri rappresentati nelle carte tematiche con la distribuzione delle frane osservate. La forza di questo approccio dipende direttamente dalla qualità e quantità dei dati a disposizione. Essendo

fortemente dipendente dai dati acquisiti su una specifica regione, non può essere facilmente estrapolabile ad altre regioni, ancorché vicine.

L'analisi statistica di indicatori morfologici, geologici, idrogeologici, geotecnici, vegetazionali ed idrografici consente di ottenere modelli per la zonazione relativa della pericolosità.

Esistono numerosi esempi di analisi statistica dei fattori della stabilità dei versanti, spesso associati all'utilizzo di sistemi informativi territoriali (Jones *Et Al.*, 1961; Neuland, 1976; Newman *Et Al.*, 1978; Carrara *Et Al.*, 1978, 1985, 1990, 1991; Carrara 1983, 1984; Brabb, 1984; Bernknopf *Et Al.*, 1988; Yin & Yan, 1988; Siddle *Et Al.*, 1991; Chung *Et Al.*, 1995). Tali metodologie sono anche raccomandate dal Servizio Geologico per la realizzazione delle carte di pericolosità alla scala 1:50.000 (Amanti *et Al.*, 1992).

In generale i metodi di analisi statistica si basano sul seguente schema operativo:

- a) suddivisione del territorio in domini elementari omogenei, delimitati da confini geometrici (*celle*), morfologici (*sotto-bacini, versanti*) o geomorfologici (*land units* o unità di terreno omogenee per morfologia, litologia, uso del suolo o altro ancora);
- b) attribuzione ai domini elementari degli attributi di ogni fattore dell'instabilità mediante opportune variabili. Tra queste lo stato di dissesto, l'acclività locale, la classe litologica, la classe di uso del suolo;
- c) elaborazione statistica dei dati mediante modelli multivariati regressivi o discriminanti;
- d) rappresentazione cartografica di un indice numerico di pericolosità relativa.

Nella sostanza si tratta di correlare diverse associazioni di fattori predisponenti il dissesto con l'occorrenza di frane osservate, eventualmente distinte per tipologia. Da tale analisi statistica si inferisce la probabilità di occorrenza di frane di neoformazione sulle diverse unità territoriali.

RETI NEURALI ARTIFICIALI

Una *Rete Neurale Artificiale (RNA)* è, in sostanza, un sistema discreto in grado di acquisire, immagazzinare e utilizzare, conoscenza basandosi sull'esperienza (Sarle, 1997). Le *RNA* sono costituite, nella maggior parte dei casi, da un certo numero di *neuroni*, semplici elementi di calcolo a funzione di trasferimento non necessariamente lineare, interconnessi tra loro tramite pesi sinaptici. L'uso di una *RNA*, nella modellazione di fenomeni fisici, può essere giustificato in base a due argomentazioni sostanziali. La prima, di carattere metodologico, è che la *RNA* consente di modellare il fenomeno in esame partendo direttamente dalle variabili che lo caratterizzano, senza ricorrere a schematizzazioni rigide, ad esempio, forzatamente lineari. La seconda, di carattere computazionale, è che la Rete Neurale permette il confronto, in una stessa analisi multivariata, di variabili discrete con variabili numeriche continue. Questo è un problema molto diffuso in Geologia Applicata e in particolare nel contesto della zonazione della suscettibilità da frana, in cui vanno confrontate insieme variabili come la pendenza dei versanti, esprimibile tramite un numero reale, con variabili come la litologia del substrato, che invece può essere espressa solo come un codice di classe. Alcuni autori (Aleotti *et Al.*, 1996; Mayoraz *et al.*, 1996) hanno tentato l'applicazione di Reti Neurali proprio alla soluzione di questo tipo di tematiche, rinunciando ad una completa comprensione della meccanica e cinematica di una frana, troppo onerosa da effettuare su vasta scala, ma aggirando gli elevati livelli di soggettività che sono insiti nelle tecniche tradizionali.

La motivazione dell'uso delle reti neurali come approccio al problema della realizzazione della Cartografia Tematica in generale, risiede soprattutto nei punti che, nel seguito, brevemente accenniamo.

I dati necessari alle valutazioni di pericolosità sono, in generale, *fuzzy* o *sfocati*. Nel problema della valutazione della suscettibilità, ad esempio, prendiamo in considerazione caratteri del territorio quali la litologia, l'uso del suolo, la pendenza che reputiamo essere i fattori predisponenti. Questi fattori nella loro classificazione e caratterizzazione presentano in realtà ampi margini di discrezionalità e richiedono ipotesi drasticamente semplificative improntate ad forti elementi di soggettività. Il dato di pendenza media, per esempio, che sembra essere affetto dal solo errore aleatorio insito in qualunque misura, in realtà dipende fortemente, ad esempio, dalla scelta della scala di acquisizione dell'elemento orografico. Una delle abilità riconosciute alle reti neurali è quella di individuare associazioni di variabili o *pattern* nei dati necessari ai modelli che, alle volte, non risultano altrettanto evidenziate dai tradizionali metodi statistici. Ove dunque vi sia difficoltà di modellazione matematica esplicita o incertezza nella identificazione dei parametri, la *RNA* consente un approccio alternativo, tanto ai metodi deterministici che a quelli statistici tradizionali (Perus & Krainc, 1996).

METODI DETERMINISTICI

I metodi puramente *deterministici* si basano generalmente sul calcolo del fattore di sicurezza, o di parametri derivati da esso, dei pendii mediante analisi di stabilità all'equilibrio limite. Il fattore di sicurezza, una volta individuato un opportuno volume di roccia ed una superficie di frattura, è definito come rapporto

$$F = \frac{C}{D}$$

fra la sommatoria delle forze resistenti *C* quella delle forze destabilizzanti *D*.

Considerando la resistenza del terreno mobilitata a rottura S_m e applicando un criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb, si ottiene la relazione

$$S_m = \frac{c'}{F} + \frac{P' \tan \varphi'}{F}$$

ove c' [Pa] è la coesione, P' [Pa] la tensione normale, φ' [-] l'angolo di attrito. Quando il pendio è in condizioni di equilibrio limite, F risulta pari all'unità; valori di F maggiori di uno indicano condizioni di equilibrio stabile e, per valori inferiori all'unità, si hanno condizioni instabili.

Un'analisi puramente deterministica della pericolosità può essere effettuata solo per singoli versanti o per zone di limitata estensione, laddove si disponga di una conoscenza geotecnica del sottosuolo sufficientemente approfondita. Metodi di zonazione della pericolosità, che prevedono criteri di estrapolazione del fattore di sicurezza determinato su singoli pendii, sono stati proposti da Klugman & Chung (1976), Mulder (1991).

Il fattore di sicurezza permette una valutazione sul grado di stabilità del versante ed un confronto oggettivo fra la stabilità di versanti diversi. Tuttavia, proprio per l'intrinseco carattere deterministico, non consente di stimare la probabilità di occorrenza del movimento. Uno schema per la valutazione della pericolosità relativa in base al valore del fattore di sicurezza è proposto da Ward (1976).

In letteratura stanno stando un certo interesse ulteriori metodi deterministici che mettono in relazione i parametri meccanici dei terreni con le caratteristiche idrologiche (Montgomery & Dietrich, 1994, Menduni *et Al.*, 2000); questi metodi permettono tra l'altro la valutazione della stabilità dei versanti in funzione della precipitazione, con il

vantaggio di individuare delle soglie oltre le quali il pendio risulta instabile, con la possibilità ultima di valutare la pericolosità non solo spazialmente ma anche in funzione della frequenza degli eventi meteorologici.

Il maggior problema legato ai metodi puramente deterministici è legato all'incertezza sui parametri necessari per il calcolo quali, ad esempio, la resistenza al taglio ed il regime delle pressioni interstiziali. Nella determinazione dei parametri di resistenza o del regime delle pressioni interstiziali, spesso entrano in gioco elementi di analisi a posteriori (*back-analysis*) di rotture già avvenute, per cui può essere opportuno abbinare all'analisi in termini di fattore di sicurezza un controllo geomorfologico basato sull'osservazione del comportamento dei pendii in zone litotecniche omogenee.

Tabella 3: Classi di pericolosità in funzione del fattore di sicurezza F (WARD, 1976).

Pericolosità	F
Alta	< 1.2
Media	1.2 – 1.7
Bassa	> 1.7

METODOLOGIA ENEA-MINAMB

La metodologia è stata elaborata nell'ambito dell'Accordo di Programma Enea-Ministero Ambiente, linea "il risanamento del territorio, delle aree urbane e delle acque" che prevede la stesura di linee guida per la zonazione del rischio da frana (Abbattista *et Al.*, in stampa). Consiste in un approccio integrato tra rilevamenti geomorfologico, geologico, litotecnico, idrogeologico e di uso del suolo, relativamente a distinte tipologie di frana che, partendo dall'osservazione, conduce alla valutazione della suscettibilità anche di quelle aree non interessate in passato da dissesti franosi.

A tale scopo sono individuate 5 macroclassi di dissesti distinte in *crolli e ribaltamenti*, *scivolamenti rotazionali*, *scivolamenti traslazionali*, *colate lente*, *colate rapide*, sintetizzate dalle classificazioni esistenti (Varnes, 1984; Carrara *et Al.*, 1985; Canuti e Casagli, 1996, Cruden & Varnes, 1996; Dikau *et Al.*, 1996, WP/WLI, 1993).

La metodologia per la valutazione della suscettibilità proposta può essere intesa come una sintesi fra previsione spaziale e previsione tipologica. Tale metodologia è applicabile a scala locale e costituisce una fase propedeutica alle successive fasi di valutazione della pericolosità e del rischio. L'intero processo può essere distinto in due diverse sezioni, inerenti rispettivamente:

- l'analisi di sito, finalizzata alla standardizzazione delle metodologie e delle procedure per l'individuazione dei parametri discriminanti e predisponenti in aree già soggette a fenomeni franosi;
- l'analisi di macroarea, finalizzata alla verifica e specializzazione dei suddetti parametri all'interno di aree suscettibili di fenomeni di neoformazione, nonché all'individuazione di eventuali ulteriori parametri predisponenti di carattere locale ed eventuali elementi precursori.

La procedura inizia con l'acquisizione delle carte inventario dei fenomeni franosi, da considerarsi propedeutiche alle successive fasi di lavoro. La prima fase del processo prevede un'analisi di sito da effettuare sulle aree in frana censite, secondo un approccio multidisciplinare integrato che prevede i rilevamenti geomorfologico, geologico, litotecnico, idrogeologico e dell'uso del suolo. Lo studio prevede l'analisi della frana e del contesto ove questa è collocata. Quest'ultimo può essere definito come il bacino di ordine inferiore chiuso alla sezione della frana, qualora questa si trovi in un'area di impluvio ovvero come l'area compresa tra i due impluvi immediatamente adiacenti al dissesto, qualora questo avvenga nell'area di displuvio.

Il fine dell'analisi di sito è l'individuazione, per ogni processo rilevato, dei parametri *discriminanti*, e di quelli cosiddetti *predisponenti*. Questi ultimi sono definibili come l'insieme dei fattori di ordine geomorfologico, geologico, litotecnico, idrogeologico e di uso del suolo che concorrono, in varia misura, alla determinazione della suscettibilità al dissesto. I parametri *discriminanti* sono invece indicatori di ordine morfometrico e geologico costituiti, rispettivamente, dalla pendenza originaria del versante e dalla classe litologica in cui è impostata la superficie di scivolamento della frana. Sono definiti discriminanti poiché la concomitanza di determinate classi di pendenza e di determinati litotipi, costituisce condizione necessaria, ma non sufficiente, affinché il versante sia suscettibile ad una data classe di frana. Se un'area, ad esempio, è caratterizzata da calcare affiorante, assenza di coperture, e pendenze superiori a 70°, è possibile inferire che non esiste la condizione necessaria per la quale essa sia suscettibile a fenomeni di colata rapida, indipendentemente dalla presenza o meno di altri parametri predisponenti. Al contrario i valori suddetti costituiscono condizione necessaria, ma non sufficiente, affinché l'area sia suscettibile a fenomeni di crollo.

Qualora il censimento dei dissesti venga a indicare un numero di frane relativamente elevato, con estensione dell'ordine del 30% dell'area totale investigata, è possibile procedere in via speditiva riducendo l'analisi di sito ad un campione ritenuto significativo per ciascuna macroclasse di fenomeni. Tale campione deve dar conto delle variabili litologiche, sia del substrato che della copertura, e morfometriche, attraverso le classi di pendenza e presentare, subordinatamente, una distribuzione territoriale omogenea. Al contrario qualora il numero di frane dovesse risultare insufficiente al trattamento statistico per l'individuazione di intervalli di pendenze e litologia, è opportuno attenersi ai dati di letteratura.

Tramite elaborazione statistica basata sulla distribuzione di frequenza dei parametri predisponenti rilevati su ciascuna frana, vengono estrapolati i parametri predisponenti significativi per ciascuna classe di fenomeno. Alla determinazione delle macroaree, ossia di unità territoriali lito-morfometriche (UTLM), si giunge partendo da una semplice analisi dei parametri discriminanti, dai quali vengono dedotti gli intervalli di pendenza del versante originario in cui si sono impostate le nicchie di distacco per ogni tipologia di fenomeno e le classi litologiche in cui le superfici di scivolamento, di una determinata tipologia di fenomeno sono impostate.

La suddivisione del territorio in aree omogenee per parametri discriminanti avviene infine tramite l'elaborazione dei modelli digitali del terreno e delle carte litologiche digitalizzate, in funzione degli intervalli di pendenza e delle classi litologiche. La parcellizzazione del territorio richiede usualmente l'aggregazione delle *UTLM* in macroaree. All'interno di tali macroaree viene condotta la successiva fase di analisi di macroarea.

Anche questa seconda analisi si esplica attraverso i rilevamenti geomorfologico, geologico, litotecnico, idrogeologico e di uso del suolo, ed ha come obiettivi:

- la verifica della sussistenza o meno dei parametri predisponenti di vario ordine, individuati durante l'analisi di sito;
- l'individuazione di eventuali altri parametri predisponenti di carattere locale;
- l'individuazione di eventuali elementi precursori;
- la spazializzazione, mediante riporto in carta di tutti i parametri predisponenti rilevati all'interno delle macroaree.

Ogni parametro *predisponente* spazializzato, una volta digitalizzato, costituisce uno strato informativo. La semplice intersezione dei relativi poligoni genera una ulteriore suddivisione del territorio in *Unità Territoriali Omogenee* per parametri predisponenti

(UTO), che rappresentano quelle porzioni elementari di territorio in cui tali parametri, appunto, mantengono uniformi.

Per valutare il grado di suscettibilità di ciascuno di questi settori si procede attraverso le successive fasi di attribuzione dei pesi ai parametri predisponenti e individuazione di una funzione di suscettibilità.

L'attribuzione dei pesi ai parametri predisponenti è una fase fondamentale del processo, dal momento che in ogni UTO è differente l'influenza che ciascun parametro assume nel determinare la predisposizione al dissesto. Esistono varie metodologie per l'attribuzione dei pesi ai parametri predisponenti, che si distinguono per oggettività o soggettività dei criteri di attribuzione, ma che, comunque, sono sostanzialmente funzione della tipologia, qualità e quantità dei dati a disposizione, oltre che del numero dei fenomeni franosi rilevati. Proprio a causa di tali incertezze non è opportuno indicare una metodologia univoca per l'attribuzione dei pesi ai parametri predisponenti, anche considerando che le applicazioni di vari metodi sono ancora in una fase sperimentale. I più comunemente utilizzati sono quello *qualitativo geomorfologico* e quello *quantitativo statistico*, bivariato o multivariato.

L'individuazione delle funzioni di suscettibilità, in base alle quali vengono redatte le carte, è dipendente dal metodo utilizzato per l'attribuzione dei pesi, dalla qualità e quantità dei dati a disposizione, dal numero dei fenomeni franosi rilevati, e da altri fattori caratteristici dell'area in studio. Quest'ultimo aspetto comporta che la funzione di suscettibilità sia una caratteristica locale difficilmente esportabile. Di conseguenza possono essere applicate differenti funzioni di suscettibilità, che potranno variare dalla semplice sovrapposizione delle carte indicizzate all'applicazione di funzioni non lineari.

PERICOLOSITÀ DA COLATE RAPIDE IN COLTRI DETRITICHE SUPERFICIALI

Le frane che coinvolgono le coltri detritiche superficiali, a causa del ridotto volume di materiale coinvolto, vengono spesso considerate fenomeni a bassa pericolosità. Ciò nonostante, la difficile previsione spaziale del fenomeno e la rapidità di movimento rendono questi dissesti fenomeni ad elevato potenziale distruttivo.

Uno specifico modello atto all'analisi della stabilità in coltri detritiche superficiali è quello denominato *SHALSTAB* (Shallow Landslide Stability model) (Montgomery e Dietrich, 1994) che, sulla base di semplici elementi fisici, topografici ed idrologici, permette l'individuazione di aree potenzialmente suscettibili a frane superficiali. *SHALSTAB* si compone di un insieme di procedure realizzate come estensione del sistema informativo geografico ArcView. L'analisi si basa sulla combinazione di due modelli, l'uno di stabilità del pendio e l'altro di tipo idrologico. Il primo prende in considerazione le caratteristiche tecniche e geometriche del pendio, il secondo coinvolge grandezze quali la pioggia efficace sul terreno e la permeabilità del suolo.

L'analisi di stabilità, di tipo distribuito, si basa sull'ipotesi di *pendio illimitato* valida ove lo spessore del terreno sia molto minore della lunghezza del versante. Su ciascun elemento finito di versante si applica un modello di stabilità tipo Mohr-Coulomb. Il modello tiene conto della saturazione di ciascun elemento, determinata dal flusso subsuperficiale calcolato attraverso il modello idrologico (O' Loughlin, 1994). Una volta fissati i parametri geotecnici di ciascun elemento vengono evidenziati quattro campi distinti di stabilità. Due di essi riguardano le condizioni estreme di stabilità ed instabilità, in via indipendente dalla saturazione. Gli altri descrivono i casi in cui l'altezza piezometrica nel terreno viene a condizionare l'equilibrio dell'elemento.

L'indice di stabilità viene, in sostanza, valutato in funzione di un parametro idrologico, dato dal rapporto tra la precipitazione efficace e la trasmissività dell'acquifero, e di un parametro topografico locale che da conto della attitudine morfologica del bacino a monte a concentrare il flusso nella sezione considerata.

Shalstab è un modello di stabilità stazionario e fisicamente basato. Si basa sull'ipotesi che l'influenza principale della topografia sull'evoluzione locale di una falda freatica permette al modello statico di emulare gli effetti di reazione dinamica alla pioggia. Attraverso il modello è possibile determinare il minimo valore di precipitazione necessario per causare instabilità. È possibile dunque elaborare una mappa delle precipitazioni critiche in funzione dei parametri fisici, meccanici e idrologici del terreno.

Il limite del modello è dovuto al fatto che l'unità di riferimento per il calcolo delle condizioni di stabilità viene comunque rappresentata come un'unità idrologica elementare, entro la quale i parametri fisici, meccanici e idrologici devono necessariamente rimanere costanti. Per quanto detto risulta necessario effettuare alcune approssimazioni relativamente a spessore della coltre, angolo di attrito, coesione e trasmissività, anche se l'unità elementare di riferimento può assumere dimensioni tali da non comportare errori significativi.

Inoltre, trattandosi di un modello previsionale di tipo deterministico, è necessario conoscere un discreto numero di parametri del terreno, nonché la loro distribuzione all'interno del bacino considerato.

