

## **PROTER, UNO STRUMENTO SOFTWARE PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DEL TERRITORIO**

Autori: P. Fargione, L. Ferroni, M. Matricardi  
Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione, DINCE, Università di Roma "La Sapienza",  
Corso Vittorio Emanuele 244, 00186 Roma.

### **0. SOMMARIO**

PROTER è uno strumento software, realizzato anche grazie ad un contributo del Gruppo Nazionale Difesa Rischi Chimici Industriali ed Ecologici del CNR, volto ad una valutazione semplificata della vulnerabilità del territorio in conseguenza della sovrapposizione di rischi di origine naturale ed antropica, con riferimento specifico ad eventi incidentali legati a produzione, stoccaggio e manipolazione di sostanze pericolose.

L'innovazione introdotta da PROTER consiste propriamente nella possibilità di verificare, per mezzo di un unico strumento, la presenza su un determinato territorio di potenziali rischi di diversa natura, da un lato rischi di origine naturale, quali il sisma, le inondazioni e le frane, dall'altro rischi legati alla presenza sul territorio di ingenti quantità di sostanze pericolose.

PROTER è in grado di svolgere, mediante una interfaccia guidata e facilmente utilizzabile anche da non esperti, le seguenti azioni:

- ❖ rappresentare su supporto cartografico l'area di impatto di un evento incidentale in uno o più "impianti ad alto rischio"; tale valutazione può essere effettuata mediante l'applicazione del metodo speditivo della Protezione Civile oppure, per i liquidi facilmente infiammabili e/o tossici, mediante l'applicazione del metodo speditivo proposto nel D.M. 20 ottobre '98. Il programma, oltre a verificare gli obblighi di legge dei gestori delle attività soggette, è anche in grado di verificare l'entità delle conseguenze, in termini di impatto sul territorio, di possibili effetti domino;
- ❖ per la stessa area, consente di verificare se la zona è a rischio sismico; in particolare, il programma consente di valutare la probabilità che un sisma provochi effetti disastrosi in un impianto ad alto rischio e, in caso affermativo, di valutare l'area di impatto del potenziale incidente dovuto al rilascio di sostanze pericolose e/o di energia conseguente al sisma stesso;
- ❖ ancora, consente di verificare se un'area è stata storicamente soggetta a rischi di esondazioni o frane (dati ripresi dalla "banca dati frane" e dalla "banca dati piene" del Servizio Idrogeologico Nazionale). Il programma fornisce inoltre dei modelli speditivi per la valutazione dei danni a strutture causati da onde di piena o smottamenti del terreno.

### **1. CRITERI DI PROGETTO DEL CODICE PROTER**

L'obiettivo principale che ha guidato la progettazione del codice PROTER è stato quello di offrire una prima risposta a quelle che sono le principali esigenze operative che caratterizzano l'attività di pianificazione territoriale, nello specifico la necessità di avere a disposizione molteplici banche dati relativamente a tutti i potenziali rischi per il territorio e, parallelamente, la necessità di dover pervenire, in tempi anche brevissimi, ad una visione immediata dell'entità dei diversi fattori di rischio, ovvero delle conseguenze di possibili eventi incidentali.

A tal fine, e principalmente per venire incontro all'esigenza di sintesi e rapidità operativa, si è previsto di realizzare un codice che consentisse di scandagliare, per mezzo appunto di un unico strumento, tutti i rischi potenziali del territorio, sia di origine antropica che naturale, consentendo delle elaborazioni semplificate ("speditive") che permettessero, praticamente in tempo reale, di avere un panorama abbastanza affidabile del rischio generale dell'area in esame, in particolare del "rischio complesso" inteso come sovrapposizione dei rischi naturali ai rischi antropici.

Con le sopracitate aspettative, nella realizzazione del codice PROTER sono stati adottati i seguenti criteri generali di progetto:

- ⇒ per consentire una estesa applicazione del codice anche in seno ad organi periferici di controllo e pianificazione territoriale:
  - realizzazione di uno strumento di facile accesso ed uso anche per persone non particolarmente esperte nel settore degli alti rischi e della programmazione territoriale;
  - realizzazione di uno strumento «leggero» che, pur nell'ambito della enorme complessità delle tematiche, potesse risultare non solo di facile gestione a livello software, ma anche di contenuto impegno hardware;
- ⇒ utilizzo di modelli di analisi semplificati sia per quanto riguarda la simulazione dell'effetto dei singoli agenti di rischio che, e tanto più, per i modelli di sovrapposizione degli effetti al fine, tra l'altro, di rendere più "user friendly" sia la preparazione dell'input dei dati che l'interpretazione dei risultati;
- ⇒ realizzazione uno strumento accessibile e fruibile via INTERNET per facilitare l'interscambio di dati ed informazioni tra utenti periferici.
- ⇒ realizzazione uno strumento non vincolato all'uso di un GIS, ma più semplicemente correlabile ad una cartografia specifica utilizzata come "sfondo" delle simulazioni: questo con l'obiettivo di mettere in condizione qualunque utente, anche se dispone semplicemente di una carta geografica digitalizzata - o digitalizzabile, ma comunque non vettorializzata - di pervenire a valutazioni di vulnerabilità rappresentate direttamente sul territorio.

Per ottemperare a tutti i suddetti criteri si è previsto lo sviluppo di uno strumento software dedicato che consentisse, tra l'altro, di generare mappe territoriali rappresentative dei «livelli locali di rischio tecnologico» e/o dei «livelli di rischio composto».

## **2. L'APPROCCIO AL RISCHIO INDUSTRIALE**

Coerentemente con gli obiettivi generali del programma di ricerca, fin dall'inizio dell'attività (anno 1997) ci si è indirizzati verso l'individuazione di una metodologia semplificata atta a definire qualitativa e quantitativa l'impatto sul territorio conseguente ad incidenti presso installazioni industriali a rischio di incidente rilevante ai sensi dell'allora vigente D.P.R. 175/88.

A tal fine, la prima routine implementata nel codice per la valutazione del rischio tecnologico è stata basata sul metodo speditivo per la "pianificazione di emergenza esterna per impianti industriali a rischio di incidente rilevante", metodo proposto nel 1994 dal Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri.

Il metodo semplificato consente, solo sulla base della conoscenza della tipologia e della quantità delle sostanze pericolose gestite nello stabilimento e della tipologia del processo, di calcolare, per mezzo di una sorta di metodo ad indici, le aree di impatto conseguenti ad esplosioni, incendi o rilasci di prodotti tossici, individuando l'ampiezza e la forma delle zone colpite in funzione del livello di rischio per le popolazioni e i manufatti. In particolare, il modello consente di calcolare la distanza standard di pianificazione corrispondente alla "elevata probabilità di letalità" per la popolazione, ed una seconda distanza di danno, esterna alla prima, e corrispondente all'insorgenza di "danni gravi".

Negli anni successivi è stato implementato il più recente "metodo speditivo per l'analisi e la valutazione degli eventi incidentali associabili ai depositi di liquidi facilmente infiammabili e/o tossici", tratto dall'appendice III del D.M. 20/10/98, metodo del tutto analogo, concettualmente e strutturalmente, a quello della Protezione Civile

Attualmente, dunque, nel codice PROTER convivono ambedue i metodi speditivi; la scelta nell'uso dell'uno o dell'altro è lasciata all'estensore dell'analisi in relazione alla peculiarità del caso in esame.

Con l'uscita del nuovo Decreto Legislativo del 17/8/1999 n. 334, recepimento italiano della Direttiva comunitaria 96/82/CEE detta "Seveso 2", anche la sezione del codice riguardante la verifica degli obblighi di

legge per gli esercenti le attività soggette è stata aggiornata in relazione alla nuova classificazione degli stabilimenti ad alto rischio.

Sempre conformemente alle esplicite richieste del D.Lgs 334, è stata affrontata la problematica dell'effetto domino che, come è noto, può aggravare notevolmente l'evoluzione di un incidentale in corso se, all'interno della zona di impatto sicuro della prima struttura, ricadono altre apparecchiature di processo o serbatoi contenenti sostanze con caratteristiche di infiammabilità o esplosività.

La verifica dell'effetto domino, non potendo essere trattata come un automatismo interno al codice, è stata impostata come una opzione a discrezione dell'estensore dell'analisi: è evidente, infatti, che al di là della valutazione obiettiva legata alle distanze che separano strutture a rischio, l'effetto di eventuali presidi impiantistici che possono mitigare o impedire il manifestarsi di tale fenomeno (primi tra tutti la presenza di barriere fisiche tra le strutture, l'esistenza di impianti di raffreddamento, di impianti antincendio, etc.) non poteva essere lasciata alla valutazione automatica del codice.

### 3. L'APPROCCIO AL RISCHIO SISMICO

L'oggetto del lavoro è stato la definizione della probabilità di collasso delle strutture di contenimento di sostanze pericolose in impianti ad alto rischio in conseguenza di sollecitazioni di natura sismica (rottura di tubazioni, rottura di serbatoi, crollo di strutture, etc.), con lo scopo ultimo di stimare le masse di sostanze pericolose eventualmente rilasciate e quindi, applicando i metodi speditivi per la valutazione delle aree d'impatto, verificare le conseguenze dell'incidente sul territorio.

A tal fine, sono stati implementati nel codice PROTER i seguenti strumenti:

- il Data Base delle mappe di sismicità di tutti i comuni italiani;
- una metodologia di valutazione di tipo "speditivo" che fornisce, tramite "matrici di rischio", le percentuali di danneggiamento per componenti civili ed industriali colpiti da sisma in relazione all'intensità del sisma stesso.

Conformemente alle più recenti tendenze nel settore della valutazione degli effetti dei sismi sulle strutture, ed in particolare su edifici, componenti ed impianti pertinenti ad industrie ad alto rischio, ci si è indirizzati verso la ricerca di metodi di verifica basati su criteri probabilistici: L'unica metodologia che è sembrata ben adeguarsi alle aspettative della ricerca è stata quella dell' ATC<sup>1</sup>, tratta dal manuale "Earthquake damage evaluation data for California".

Il lavoro dell'ATC ha condotto alla produzione di un set di matrici di danno dalle quali, per circa 60 strutture diverse ed in funzione della magnitudo del sisma, si può evincere la percentuale di danneggiamento fornita in funzione di classi di danno precostituite.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei terremoti, questa è stata effettuata da ATC adottando la scala di intensità Mercalli Modificata (sismi dal VI° al XII° grado).

Le famiglie di strutture implementate nel codice PROTER, giudicate di maggior interesse per il lavoro in oggetto, sono le seguenti: 31 tipologie di edifici con struttura in metallo leggera, in acciaio, in mattoni o in cemento; 2 tipologie di pipelines; 6 tipologie di serbatoi; 3 tipologie di ciminiere.

Per ogni tipologia di struttura l'ATC ha elaborato una matrice di danno del tipo di quella riportata in Tab. 1; nel dettaglio, la struttura delle matrici è composta dai seguenti campi di variabili:

- ✓ l'intensità del sisma espressa in base alla scala Mercalli Modificata;
- ✓ Il "fattore di danno medio", che rappresenta una quantificazione dello stato di danneggiamento della struttura/componente secondo lo schema riportato in Tab. 2;

---

<sup>1</sup> ATC, Applied Technology Council fondata dalla FEMA, Federal Emergency Management Agency.

- ✓ i valori di danno percentuale subiti dalle strutture, che rappresentano la probabilità che la struttura in esame, sottoposta ad un certo sisma, subisca un danno rapportabile ad un certo “fattore di danno medio” (vengono trascurate le probabilità di danno inferiori a  $10^{-4}$  eventi/anno).

Le matrici di probabilità di danno possono essere interpretate come segue: si consideri (rif. Tab. 1) il componente di classe di i-esisma soggetto ad un terremoto di VIII° grado: le possibilità che, per il componente, si manifestino danni equivalenti agli stati di danneggiamento 2, 3 e 4 (v. Tab. 2) sono pari, rispettivamente, al 1,6 %, 94,9% e 3,5%; ciò equivale a dire che, se nell’area colpita dal terremoto ci fossero 100 strutture di tipo i-esimo (per esempio ciminiera in acciaio) probabilmente 1 o 2 subirebbero danni lievi, circa 95 subirebbero danni leggeri e 3 o 4, subirebbero danni moderati.

**Tab. 1**  
Fac simile di una matrice di danno da sisma

Classe del componente: i-esisma							
Fattore di danno medio %	Scala Mercalli modificata						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	16,1	-	-	-	-	-	-
0,5	63	7,5	1,6	-	-	-	-
5	20,9	92,1	94,9	12,3	13,5	-	-
20	-	0,4	3,5	79,0	75,2	14,2	5,3
45	-	-	-	8,7	11,3	59,2	66,0
80	-	-	-	-	-	26,6	28,7
100	-	-	-	-	-	-	-

**Tab. 2**  
Corrispondenza tra il fattore di danno medio e lo stato di danneggiamento di un componente soggetto a sisma

Stato di danneggiamento	Quota di danneggiamento, DFR (%)	Fattore di danno medio, CDF (%)
Nessuno (1)	0	0
Lieve (2)	0 – 1	0,5
Leggero (3)	1 – 10	5
Moderato (4)	10 – 30	15
Importante (5)	30 – 60	45
Distruttivo (6)	60 – 100	80
Catastrofico (7)	100	100

1. Nessun danneggiamento.
2. Danni locali minori che non richiedono la fermata del componente per riparazioni.
3. Danni localizzati significativi di componenti che però, generalmente, non richiedono la fermata dell’impianto.
4. Danni localizzati significativi di componenti che richiedono la fermata dell’impianto.
5. Danni estesi che richiedono la fermata dei componenti per interventi di ripristino di funzionalità.
6. Danni estesi così significativi che possono richiedere la sostituzione del componente danneggiato.
7. Come sopra, ma con danni estesi alla maggioranza dei componenti dell’impianto.

Per rendere più rispondente il modello ATC alle particolari esigenze del codice PROTER (principalmente dal punto di vista della probabilità di sviluppo di incidenti rilevanti), sono state aggiunte delle particolari, ulteriori elaborazioni rispetto alle probabilità di danno.

Il primo problema è stato quello di collegare la probabilità di danno di una struttura contenente sostanze pericolose con la probabilità di sviluppo di un incidente rilevante. In base ad una serie di valutazioni ingegneristiche incentrate sulle tipologie di rilascio dai più comuni componenti industriali, si è deciso di fissare la soglia di incidente di default per un valore di CDF pari o superiore al 45%. Con ciò si intende che, se per un componente il valore di CDF risulta uguale o superiore al 45% (classe di danno che corrisponde a danni estesi che richiedono l'interruzione dell'esercizio del componente per interventi di ripristino di funzionalità), automaticamente il programma "attiva" il componente in oggetto che viene considerato sede di un incidente rilevante coinvolgente l'intero suo contenuto. Va comunque sottolineato che è stata lasciata all'estensore dell'analisi la possibilità di variare da input tale parametro di soglia, in relazione alla specificità della particolare applicazione.

Successivamente, si è affrontato il problema di come utilizzare le matrici di danno in modo che i risultati potessero essere utilizzabili anche con un preciso riferimento alla disposizione spaziale dei componenti di impianto. Per risolvere tale problema è stata prevista una procedura di verifica basata sulla generazione di numeri casuali. La procedura può essere esemplificata come segue: con riferimento al sopracitato parco di serbatoi, il metodo delle matrici di danno viene applicato, invece che a un solo serbatoio rappresentativo dell'intero parco, a ciascun serbatoio e alla sua posizione, determinandone la probabilità di danneggiamento mediante un calcolo probabilistico basato sulla generazione di numeri casuali. Tale metodo consente, all'interno di un parco di strutture anche uguali, di definire quelle che, in quella specifica simulazione, possono diventare sede di incidente rilevante. È evidente che, con un simile approccio, effettuando più simulazioni sullo stesso sito si ottengono inevitabilmente risultati diversi: si è verificato, però, che tale disuniformità dei risultati comporta differenze poco significative in termini di numero assoluto di strutture "attivate" (ovvero, il numero complessivo di strutture sede di incidente rilevante varia poco di simulazione in simulazione, e tanto meno quanto maggiore è il numero di strutture in esame); può comportare, invece, modifiche più significative in termini di estensione e posizione sul territorio delle aree di impatto. A tal fine, per dare all'estensore dell'analisi una indicazione sulla valenza dello scenario emergente dalla singola simulazione, è stato inserito, come conclusione delle elaborazioni statistiche, il calcolo della probabilità di accadimento della singola simulazione.

#### **4. L'APPROCCIO AL RISCHIO IDROGEOLOGICO**

Per quanto riguarda la valutazione del rischio idrogeologico e le sue possibili sovrapposizioni con il rischio industriale si è, naturalmente, voluto procedere in maniera analoga a quanto fatto per il rischio sismico; il livello di difficoltà incontrato è stato, però, ben superiore a quello atteso, sia per quanto riguarda la ricerca di modelli speditivi, sia la ricerca dei parametri necessari ad effettuare le simulazioni.

La realtà dei fatti è che il rischio idrogeologico, almeno dal punto di vista della previsione degli eventi e delle relative conseguenze, presenta difficoltà di caratterizzazione ben maggiori del rischio sismico: si tratta, infatti, di fenomeni di più difficile generalizzazione perché legati a specifiche realtà locali anzi, per meglio dire, legati a realtà dipendenti da caratteristiche fisiche ed antropiche del territorio del tutto puntuali.

Nonostante le difficoltà sopra accennate, si è comunque riusciti ad impostare la sezione di verifica del rischio idrogeologico del codice PROTER secondo il seguente schema:

- consultazione di una Banca Dati Idrogeologica contenente dati desunti dalla Banche Dati "Frane" e "Piene" del Servizio Idrogeologico Nazionale, in grado di fornire agli utenti di PROTER informazioni utili ad una valutazione, eventualmente di "tipo ingegneristico", del livello di rischio di esondazione e/o di frane nella zona in esame;
- disponibilità di modelli per la valutazione speditiva del rischio di danni alle strutture in funzione delle onde di piena o di smottamenti del terreno;
- calcolo del rischio complesso dovuto alla sovrapposizione dei rischi sismico, idrogeologico (onde di piena e smottamenti del terreno) ed industriale.

##### **4.1 La banca dati idrogeologica di PROTER**

Per fornire agli utenti di PROTER informazioni idrogeologiche di interesse nella forma che risultasse di più facile accesso e compatibilità con quanto già implementato nel codice, è stato necessario realizzare un

“accesso guidato” alla Banca Dati del Servizio Idrogeologico Nazionale; tale accesso guidato consente, tra l’altro, una selezione mirata dei campi di informazione presenti nei files originali.

In tal modo è stata creata una Banca Dati virtuale di PROTER , nelle due sezioni “eventi franosi” ed “esondazioni”; le chiavi di ricerca attraverso le quali l’utente seleziona gli eventi di interesse sono, nell’ordine: sezione, frane o piene<sup>2</sup>; provincia e quindi comune oggetto di verifica.

In base a tale organizzazione dei dati, da PROTER, per ogni comune, si possono evincere le seguenti informazioni:

<b>Sezione Esondazioni</b>	<b>Sezione Frane</b>
❖ Codice ISTAT Comune	❖ Codice ISTAT Comune
❖ Classificazione sismica del Comune	❖ Classificazione sismica del Comune
❖ Per ogni evento di piena registrato	❖ Per ogni evento franoso registrato:
▪ Dati identificativi della piena	▪ Dati di identificazione della frana
– Numero Piena	– Numero frana
– Data evento	– Data
▪ Cartografia IGM	▪ Cartografia IGM
▪ Corsi d’acqua coinvolti	▪ Cause innescanti (erosione, precipitazioni, ecc)
▪ Informazioni idrogeologiche	▪ Tipologia del movimento del terreno (Crolli, scorrimenti, ecc)
▪ Cause (Causa principale, Causa secondaria 1, Causa secondaria 2)	▪ Fattori predisponenti della frana (Acclività, litologia, ecc.)
▪ Danni ai beni (Tipo del bene, Oggetto, Intensità del danno)	▪ Danni ai beni (Tipo del bene, Oggetto, Intensità del danno)
▪ Provvedimenti presi	▪ Provvedimenti presi

#### 4.2 Il modello relativo agli eventi franosi

Nella logica di continuare a perseguire l’adozione di modelli di simulazione semplificati (modelli speditivi), anche per la modellistica relativa agli eventi franosi ci si è riferiti, in mancanza di altri riferimenti idonei, agli algoritmi proposti dall’ATC nel lavoro “Earthquake damage evaluation data”. La ATC ha affrontato il tema delle frane nell’ambito dell’attività di valutazione del rischio sismico in quanto è dimostrato che l’evento frana è una tipica conseguenza secondaria dei terremoti; in tali evenienze, comunque, il sisma è spesso solamente la causa scatenante di una situazione di rischio preesistente, nel senso che la frana si sarebbe potuta manifestare anche indipendentemente dall’evento sismico, seppure in tempi diversi.

L’utilizzazione del modello dell’ATC ha richiesto qualche adattamento alle esigenze del codice PROTER: in particolare, si sono tralasciati gli algoritmi di collegamento delle frane ai sismi, sia per rendere più generalizzabile l’applicazione, sia perché quegli algoritmi richiedevano in input parametri di analisi di non facile reperibilità .

Ciò che invece è stato utilizzato della metodologia ATC, in quanto adatto ad una classificazione "speditiva" del fenomeno, è stata la classificazione delle frane in funzione dello spostamento assoluto del terreno (*ground displacement*). La classificazione che ne scaturisce è quella riportata in tab. 3.

---

<sup>2</sup> nella Banca Dati del Servizio Idrogeologico Nazionale i suddetti eventi sono catalogati secondo riferimenti numerici e non secondo il comune nel quale sono avvenuti.

**Tab. 3**  
Scala di intensità delle frane

<b>INTENSITÀ</b>	<b>SPOSTAMENTO</b>	<b>DESCRIZIONE</b>
Leggera	<b>s &lt; 0,5 cm</b>	Spostamenti trascurabili
Moderata	<b>0,5 cm &lt; s &lt; 5 cm</b>	Moderato cedimento del terreno, possibili fratture di piccole dimensioni
Alta	<b>5 cm &lt; s &lt; 50 cm</b>	Accentuato cedimento del terreno, possibili fratture
Severa	<b>50 cm &lt; s &lt; 500 cm</b>	Rottura del terreno, possibili grandi fratture e slittamenti
Catastrofica	<b>s &gt; 500</b>	Totale rottura del terreno, grandi slittamenti con trascinarsi di oggetti

In tabella 4, invece, si riportano le valutazioni che correlano il fattore di danno, in percento, alla severità dell'evento franoso di cui alla tab. 3.

Anche nel caso dei danneggiamenti da frana, così come fatto per i terremoti, si è definito, in base a considerazioni ingegneristiche, un valore di default del danno medio, ed in particolare  $MDF \geq 50\%$ , oltre il quale si prevede che il componente soggetto alla frana ceda e disperda completamente il suo contenuto nell'ambiente circostante provocando un incidente rilevante. Poiché, però, a parità di entità della frana, il danno prodotto dipende sostanzialmente dalla tipologia del manufatto, per consentire all'estensore dell'analisi di poter effettuare delle valutazioni specifiche, e comunque delle analisi di sensibilità, è stata prevista l'opzione di poter variare il valore di default fornendolo direttamente da input.

**Tab. 4**  
Relazione tra l'intensità delle frane  
e il fattore di danno

<b>Stato di danneggiamento</b>	<b>Fattore di danno medio, MDF (%)</b>
Leggero	0
Moderato	15
Alto	50
Severo	80
Catastrofico	100

Nonostante il modello sopra descritto rappresenti il massimo dell'esemplificazione fenomenologica, sussistono comunque problemi nella sua applicazione poiché anche il dato sul movimento del terreno è di difficile reperibilità: la stessa Banca Dati Idrogeologica non fornisce, in genere, dati sufficienti per caratterizzare la storia degli eventi franosi di una certa zona<sup>3</sup>. Di conseguenza, per poter utilizzare direttamente il modello, l'estensore dell'analisi può trovarsi nella condizione di dover effettuare delle valutazioni indipendenti di estremo dettaglio<sup>4</sup>; in alternativa il valutatore, applicando un opportuno range di

<sup>3</sup> Peraltro, l'eventuale dato, per essere rappresentativo, dovrebbe essere riferito ad una specifica località dell'ambito comunale trattandosi, come detto, di fenomeni strettamente puntuali.

<sup>4</sup> L'estensore dovrebbe ricorrere all'uso di complessi modelli di simulazione dove lo spostamento del terreno risulta funzione di molteplici parametri quali: la pendenza della parete, la geologia superficiale (coefficiente di coesione, densità, angolo di attrito interno, ecc.), la geometria dei piani di stratificazione, il grado di frattura, la presenza di depositi di origine franosa, il contenuto di acqua del terreno, etc..

valori di spostamento del terreno, può utilizzare il modello come strumento per elaborare una sufficiente serie di casi test (analisi di sensibilità) che gli garantiscano una rappresentazione abbastanza articolata e cautelativa del profilo di rischio per il territorio.

### 4.3 Il modello relativo alle esondazioni

Anche per quanto riguarda le esondazioni, il modello adottato è suggerito dalla ATC che ha affrontato il tema, nell'ambito dell'attività di valutazione del rischio sismico, analizzando l'esondazione come possibile conseguenza di frane indotte da terremoti.

In tabella 5 si riportano le valutazioni che correlano il fattore di danno delle strutture alla altezza dell'onda di piena conseguente l'esondazione. E' bene ribadire che i danni previsti non sono riferiti al massimo battente raggiunto dalla piena (piena che potrebbe essersi sviluppata anche in tempi lunghi e, quindi, senza creare pericolose sollecitazioni alle strutture), bensì solo all'altezza dall'eventuale onda di piena che impatta sulle strutture ad elevata velocità.

Anche in questo caso, all'interno di PROTER è stato definito un valore di default del danno medio, ed in particolare  $MDF \geq 80\%$ , oltre il quale si prevede che il componente, investito dall'onda di piena, ceda e disperda completamente il suo contenuto nell'ambiente circostante causando un incidente rilevante. E' stata comunque prevista l'opzione di poter variare il valore di default fornendolo da input.

Anche per l'applicazione del modello di valutazione del danno da onda di piena vale quanto sopra riportato per il rischio indotto da eventi franosi. Laddove non siano reperibili valori di riferimento bibliografici, il modello potrà comunque essere utilizzato per lo svolgimento di analisi di sensibilità sulla resistenza delle strutture.

**Tab. 5**  
Relazione tra l'altezza dell'onda di piena  
e il fattore di danno

Altezza dell'onda di piena (m)	Fattore di danno medio (1), MDF (%)
1	10
2	20
3	50
4	80
5	100

(1) Si applica solo a strutture alte meno di 10 m; per strutture più alte si deve usare il 50% dei valori riportati in tabella.

### 4.4 Il modello della sovrapposizione degli effetti

Nel caso di consequenzialità di più di uno degli eventi naturali analizzati, sisma e frana e/o inondazione, in base ai modelli impostati dall'ATC il fattore di danno medio può essere ottenuto come semplice somma dei fattori di danno medio dovuti ai singoli eventi.

In tal caso, il danno medio cumulato sarà confrontato con il valore di soglia inizialmente definito per il danno industriale: nel caso in cui il valore cumulato uguagli o superi quello di soglia, quindi nel caso di cedimento delle strutture, il codice verificherà l'area di impatto dell'incidente conseguente secondo i modelli dell'analisi di rischio tecnologico.

## 5. CASO APPLICATIVO

Per illustrare le potenzialità raggiunte da PROTER si riporta un breve stralcio, tratto da un più ampio caso test, allo scopo di evidenziare gli aspetti più salienti del codice segnatamente alle problematiche di sovrapposizione degli effetti naturali su insediamenti ad alto rischio; in particolare, il caso applicativo si riferisce ad uno scenario che vede un evento sismico, seguito da un evento franoso, interessare un deposito di prodotti petroliferi.

Lo stabilimento industriale oggetto di verifica è un deposito di benzine dove è installato un parco di cinque serbatoi verticali fuori terra di cui: 3 da 11.500 t (serbatoi n.1, 2 e 3), uno da 15.400 t (serbatoio n.4) ed uno da 7.700 t (serbatoio n.5). I serbatoi, come normale prassi costruttiva nei depositi petroliferi, sono del tipo a tetto galleggiante e conformi allo standard API 650

Come si nota dalla fig.1, il deposito sorge in un'area in cui sono presenti, a breve distanza dallo stesso, insediamenti civili e vie di comunicazione su ruote (lato sud-ovest), una ferrovia (ad est) e, quindi, un corso d'acqua che separa il deposito oggetto di studio da un altro deposito di combustibili di diversa proprietà (lato sud-ovest).

L'area in oggetto non è classificata sismica e quindi nessuna costruzione, di tipo industriale o civile, risulta essere costruita secondo criteri asismici.

La carta geografica utilizzata come supporto grafico è stata ottenuta dalla digitalizzazione di un originale cartaceo; in particolare, sono state mantenute sulla carta le distanze della prima e seconda zona di pianificazione riportate dal fabbricante nel Rapporto di Sicurezza (ottenute applicando il modello di simulazione dell'incendio di benzina da pozza), al fine di poter confrontare tali risultati con quelli ottenuti nella simulazione.

La simulazione è stata effettuata utilizzando integralmente i modelli implementati nel codice PROTER; in particolare, per la pianificazione di emergenza, è stato utilizzato il metodo speditivo proposto nel Decreto del Ministero dell'Ambiente del 20 ottobre 1998. Le condizioni meteorologiche utilizzate nelle simulazioni sono quelle utilizzate nei metodi speditivi come caratteristiche delle ore diurne, ovvero classe di stabilità D e velocità del vento 5 m/s. Le strutture utilizzate nella simulazione sismica sono quelle relative ai "serbatoi a terra con stoccaggio di liquidi".

Per quanto riguarda i criteri metodologici adottati nel condurre il caso test vale quanto segue:

- la soglia di danno utilizzata nella simulazione del rischio complesso è del 45 %, ciò equivale a dire che ogni serbatoio la cui entità di danno complessivo (sisma più eventi secondari) risulti uguale o superiore alla soglia sarà considerato danneggiato al punto tale da causare il rilascio dell'intera massa di sostanza pericolosa stoccata;
- all'eventuale rilascio di benzina dal singolo serbatoio seguirà un incendio;
- in funzione delle distanze dagli altri serbatoi, ogni incendio potrà causare effetti domino a catena.

Nel test si prevede che il comprensorio sia sede di un sisma di IX grado della scala Mercalli Modificata; in ragione del fatto che le strutture non sono asismiche, la verifica a sisma è stata effettuata applicando nel modello una classe di sisma superiore a quella di riferimento, ovvero un sisma di X° grado.

Il risultato della simulazione ha fornito i risultati riassunti nella seconda colonna della tab 6. Come si nota, dalla simulazione sismica statistica risulta che i fattori di danno medio dei serbatoi sono tutti inferiori al valore di soglia; non si prevede, dunque, lo sviluppo di alcun incidente in conseguenza del solo evento sismico.

Si ipotizza poi che, come conseguenza diretta del sisma, e con riferimento alle particolari caratteristiche geomorfologiche del terreno, si generi un evento franoso nella zona limitrofa al confine est dello stabilimento. L'ipotesi di lavoro è che la frana provochi uno smottamento di terreno valutabile in qualche decina di centimetri al di sotto del serbatoio n. 4, con un interessamento marginale dei serbatoi 3 e 5 per i quali è prevedibile uno smottamento certamente inferiore ai 5 cm.

Dalle tabelle 3 e 4 risulta che, per smottamenti entro i 5 cm, il fattore di danno medio è pari al 15%, mentre per smottamenti di alcune decine di centimetri, fino a 50 cm, è del 50%. Allora, applicando la formula di sovrapposizione lineare del danno proposta da ATC, ne deriva che il fattore di danno medio dei serbatoi 3 e 5 rimane al di sotto del valore di soglia mentre, per il serbatoio n. 4, tale valore viene superato largamente, così come risulta dalla quarta colonna della tab. 6,

**Tab. 6**  
Riepilogo del danneggiamento subito dalle strutture

Serbatoi	Fattore di danno medio, MDF, per la simulazione sismica statistica	Fattore di danno medio , MDF, per l'evento franoso	Fattore complesso di danno medio (valore di soglia: 45%)
1	5	0	5
2	20	0	20
3	20	15	35
4	20	50	70
5	20	15	35

Si prefigura, dunque, la completa perdita di contenimento del serbatoio n. 4: in fig. 1 si riporta l'ampiezza dell'area di impatto calcolata per l'incendio che si potrebbe verificare presso tale serbatoio in presenza di innesco.

Dall'analisi della figura, nell'ottica dell'ente di controllo si possono evincere le seguenti considerazioni:

- si nota immediatamente che le distanze di prima e seconda pianificazione calcolate dal gestore (seppur nell'ipotesi di solo rischio tecnologico ma che, peraltro, è del tutto equivalente a livello di conseguenze per il territorio) sono conservative rispetto a quelle verificate col metodo speditivo da PROTER;
- si nota, inoltre, che i serbatoi n.3 e 5, ricadendo nell'area di impatto sicuro del serbatoio n. 4, potrebbero essere interessati dall'incendio per effetto domino.

Passando quindi alla verifica dell'effetto domino (effettuata dal codice solo su richiesta dell'utente), PROTER attiva automaticamente i serbatoi 3 e 5 perché ricadenti direttamente nell'area di impatto sicuro del serbatoio n. 4 e, conseguentemente, analizza le aree di impatto degli incendi ivi sviluppatasi. La routine di verifica dell'effetto domino si completerà solo quando, nelle aree di primo impatto degli n serbatoi man mano attivati, non ricadrà più alcuna altra struttura a rischio.

Nel caso specifico le conclusioni dell'elaborazione, riportate in fig. 2, evidenziano la possibilità che l'incendio, iniziato nel serbatoio 4 ed estesosi inizialmente ai serbatoi 3 e 5, si estenda ulteriormente, sempre per effetto domino, dal serbatoio n. 3 al serbatoio n. 2 e, da qui, al serbatoio n. 1. In tali condizioni la situazione potrebbe risultare particolarmente grave in quanto, come si nota chiaramente dalla fig. 1, sia l'abitato che parte della provinciale (lato sud-ovest) ricadrebbero nella seconda zona di pianificazione di emergenza (zona con sfondo verde).

Considerato che lo svolgimento di un caso test siffatto richiede, tra elaborazione dell'input e le fasi di calcolo (escluse le eventuali fasi di digitalizzazione della mappa) solo alcuni minuti, appare evidente l'utilità di PROTER quale strumento verifica ed, in particolare, di redazione di analisi di sensibilità volte a scandagliare gli effetti sul territorio di tutti i potenziali eventi che possono essere causa diretta o concausa di incidenti presso impianti ad alto rischio.

Fig. 1  
Mappa di pianificazione in conseguenza dello scenario incidentale causato, presso lo stabilimento n. 1, dall'evento sismico del IX° grado e dall'evento franoso che interessa il serbatoio 4

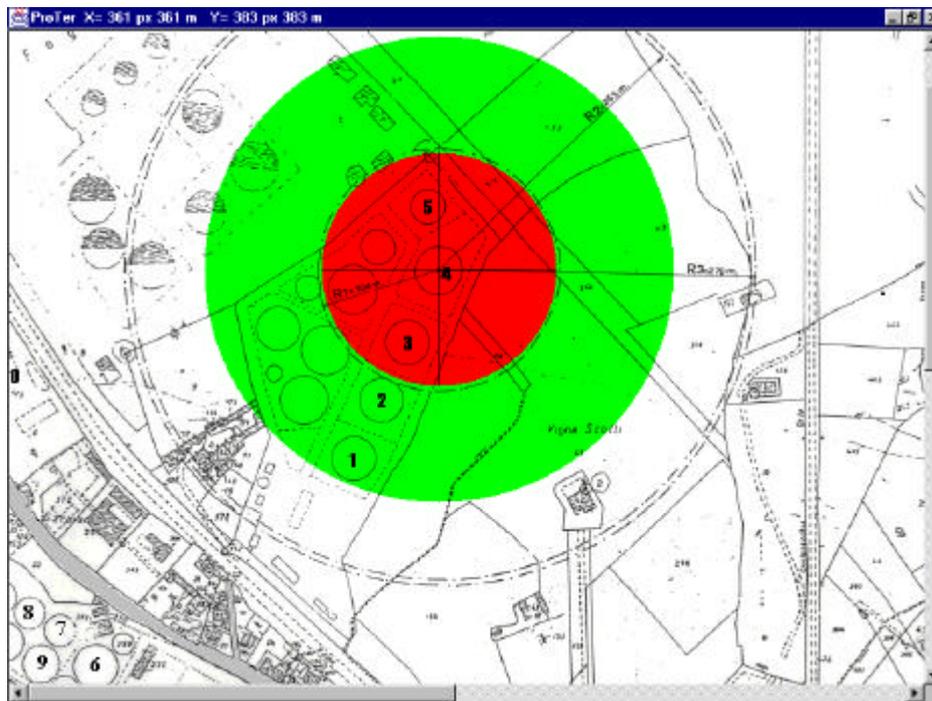
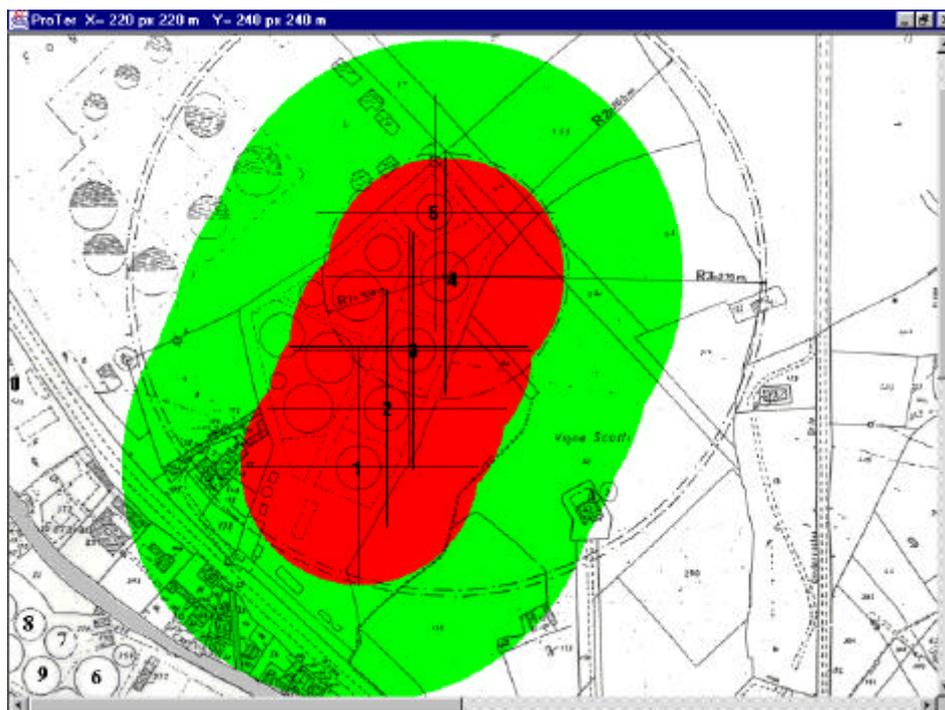


Fig. 2  
Mappa di pianificazione in conseguenza dello scenario incidentale causato, presso lo stabilimento n. 1, dall'evento sismico del IX° grado e dall'evento franoso che interessa il serbatoio 4; sviluppo dell'effetto domino sulla restante parte del deposito



## 6. CONCLUSIONI

PROTER rappresenta una applicazione prototipica che consente di affrontare in maniera integrata i rischi conseguenti alla sovrapposizione di agenti di origine diversa.

Le funzioni di sovrapposizione sono state implementate in maniera semplificata, allo scopo di ottenere uno strumento semplice, ma anche e soprattutto per dimostrare la fattibilità della metodologia.

La fattibilità è stata pienamente dimostrata, in quanto:

- ❖ si è riusciti a rendere operativo un algoritmo speditivo che dà conto della sovrapposizione degli effetti di un sisma su insediamenti industriali ad alto rischio;
- ❖ nella sezione di verifica idrogeologica si è implementato un modello speditivo che, previa eventuali valutazioni di carattere ingegneristico da parte del valutatore, consente comunque una valutazione tentativa dell'effetto di sovrapposizione;
- ❖ dal punto di vista della fruibilità dello strumento, PROTER ben risponde alle specifiche di progetto sia sotto il profilo della facile accessibilità d'uso sia, e soprattutto, sotto il profilo della rapidità di risposta in termini di valutazione di vulnerabilità del territorio.

Un altro elemento rilevante del lavoro svolto, sul quale non ci si è soffermati all'interno dell'articolo, è consistito nella scelta dell'ambiente di sviluppo. PROTER è stato sviluppato in ambiente Java, col vantaggio sia della completa indipendenza da qualsiasi software di tipo commerciale, che della possibilità di accedere al programma e alle relative Banche Dati via INTERNET, indipendentemente dalla piattaforma di partenza.

La strada tracciata con PROTER si annuncia certamente suscettibile di miglioramenti, ma anche di interessanti, ulteriori sviluppi. Si ribadisce, infatti, che dal punto di vista delle metodologie di sovrapposizione dei rischi, tema centrale del lavoro, i modelli utilizzati sono validati su realtà statunitensi; sarebbe auspicabile una vasta campagna di test per verificare la completa sovrapponibilità di tali modelli alla specificità delle situazioni italiane, soprattutto per quanto riguarda le soglie di default ipotizzate per definire la perdita di contenimento che porta al potenziale incidente; tali soglie, peraltro modificabili dall'utente, sono attualmente di primo tentativo, basate su semplici considerazioni ingegneristiche e non su dati statistici reali. Su questa linea si possono quindi prefigurare diverse attività per ottimizzare l'affidabilità del codice; altre attività di interesse potrebbero riguardare l'estensione del codice ad altri fattori di rischio quali, tipicamente, il trasporto di sostanze pericolose.

Si ritiene comunque che, già nella configurazione attuale, la possibilità di fruire di uno strumento di simulazione snello, veloce ed innovativo nei contenuti metodologici quale è PROTER possa risultare un utile supporto a tutti coloro che sono impegnati nei gravosi compiti della programmazione del territorio e della definizione dei piani di emergenza esterni.