

IDROGEOLOGIA E RETE STRADALE NELLA GESTIONE DEL RISCHIO A ENNA

di Salvatore Cafiso, Gabriele Cutrona, Giuseppe Mussumeci

Nell'articolo che segue si affronta il complesso multidisciplinare del rischio idrogeologico nell'ambito di un territorio sismico con una complessa configurazione geomorfologica. In tale contesto la funzionalità delle vie di accesso potrebbe, in caso di eventi calamitosi, pregiudicare la tempestività e l'efficacia delle operazioni di soccorso delle forze di Protezione Civile. Si affronta quindi un'analisi preventiva delle caratteristiche di pericolosità del sito e di vulnerabilità delle infrastrutture, al fine di individuarne le criticità e gli interventi da adottare.

L'interesse per la difesa del territorio dai dissesti idrogeologici è certamente aumentato, negli ultimi anni, a causa dei tragici eventi di cronaca e per la diffusa convinzione che spesso lo sviluppo urbanistico è caratterizzato da una sfida all'ambiente e all'evoluzione dei fenomeni naturali che finisce per mettere a rischio le opere infrastrutturali stesse e, soprattutto, le vite umane. Se numerosi e frequenti sono i dissesti che interessano le infrastrutture viarie, è evidente che una corretta pianificazione degli interventi sul territorio, alle diverse scale di analisi, richiede un piano di protezione basato in particolare sui seguenti aspetti:

- identificazione degli scenari di pericolosità attesi e valutazione del rischio;
- delimitazione delle aree a rischio e adozione di misure di salvaguardia che ne impediscano l'aggravamento;
- potenziamento dei sistemi di monitoraggio meteo-idropluviometrici per il preavviso, il preallarme, e l'allarme;
- adozione di piani di emergenza da parte dei diversi soggetti coinvolti nella gestione del territorio.

Le operazioni di soccorso, ovvero l'insieme degli interventi atti ad assicurare alle popolazioni colpite l'assistenza primaria e il superamento dell'emergenza, devono anch'esse fare affidamento su strumenti evoluti di gestione delle informazioni. Ciò al fine di coordinare gli organi istituzionali competenti nell'attuazione delle iniziative necessarie, garantendone tempestività ed efficacia.

Essenziale per la gestione dell'emergenza è comunque l'efficienza dei servizi, ma soprattutto della rete dei trasporti e delle sue infrastrutture. Tale problematica viene affrontata dall'ingegneria delle lifeline, sistemi a rete che si sviluppano sul territorio, in superficie, in elevazione o nel sottosuolo e collegano i vari sistemi spaziali, garantendo i servizi indispensabili per la società: trasporto, distribuzione delle risorse energetiche (gas, elettricità), funzionamento dei servizi igienici e sanitari, telecomunicazioni, ecc.

FIGURA 1 Principi su cui si fonda un sistema di gestione dell'emergenza



IL SISTEMA DI GESTIONE DELL'EMERGENZA

La grande mole di dati da trattare rende necessario attivare, alle diverse scale di indagine e di responsabilità amministrativa, sistemi informativi territoriali (SIT) con i quali gestire i dati in modo dinamico, rendendoli di reale supporto alle decisioni. La realizzazione di un sistema informativo territoriale completo, efficace e dinamico è il punto di partenza per la realizzazione di una serie di operazioni fortemente condizionate dal fattore tempo. La raccolta dei dati è alla base di una buona organizzazione operativa, consentendo la stima delle risorse disponibili in termini di uomini e mezzi da porre in campo in caso di emergenza e la loro implementazione in un SIT consente la gestione dei soccorsi e l'accelerazione del ritorno alle normali condizioni di vita dei cittadini. Un efficace sistema di gestione dell'emergenza per essere efficace deve essere fondato su un modello come quello presentato in figura 1 dove:

Modellazione: i dati, implementati e continuamente aggiornati, vanno opportunamente elaborati all'interno di modelli efficaci per la simulazione dei fenomeni (ad esempio, per l'identificazione dei percorsi di fuga in funzione dei tempi di percorrenza e delle capacità delle strade).

Previsione: l'individuazione e lo studio delle cause dei fenomeni calamitosi, insieme all'identificazione dei rischi e delle zone interessate, fornisce elementi utili sia per l'attuazione di misure di prevenzione che per la gestione dei soccorsi.

Monitoraggio: è necessario garantire la qualità degli aggiornamenti e verificare periodicamente la funzionalità del sistema in caso di evento calamitoso.

Aggiornamento: il territorio è in continuo divenire, quindi è necessario aggiornare frequentemente i dati, affinché il sistema sia sempre rispondente allo stato di fatto.

Routine: perché il monitoraggio e gli aggiornamenti siano efficaci, essi vanno effettuati con costanza, meglio se programmati a intervalli di tempo definiti.

Tramite questa serie di operazioni è possibile giungere all'individuazione degli "Hazard Analysis and Critical Centre Point" (HACCP), ossia dei punti dove è più urgente l'intervento perché il rischio è più alto. La fase successiva alla raccolta ed elaborazione dei dati deve essere, infatti, la prevenzione, effettuata secondo una scala di priorità stabilita in funzione del rischio. La gestione dei soccorsi è invece affidata alle strutture della Protezione Civile, articolate in sale operative, unità di crisi, centri di coordinamento, che costituiscono la punta emergente dei processi di analisi, controllo e comando, che - per assumere decisioni responsabili e in "tempo reale" - necessitano di basi informative estese e affidabili, anche di fonte diversa, ma integrabili e atte a fornire: analisi dello stato di fatto e delle risorse disponibili per affrontare la crisi; simulazioni "what-if"; modellistica a supporto delle decisioni per l'intervento e il ripristino delle condizioni di funzionalità del "sistema" colpito dall'evento.

IL CONTESTO TERRITORIALE

Enna si colloca nella parte centrale del territorio siciliano, a una quota di oltre 900 m, sulla sommità di una zona montuosa. Pur essendo questa una posizione strategica, solo da quando è stata ultimata l'autostrada A19 la città ha avuto un significativo sviluppo. Il centro abitato sorge sui Monti Erei, con quota massima in prossimità del castello di Lombardia (988.5 m s.l.m.) per poi scendere rapidamente a una quota media di 650 m nella zona residenziale "Enna Bassa". Il terreno, orograficamente accidentato, presenta valori di pendenza anche superiori al 35%, con diffusi problemi di stabilità, a eccezione del versante sud-est. L'analisi morfologica del territorio è stata effettuata in ambiente GIS utilizzando la carta tecnica comunale in scala 1:2000 (figura 2).

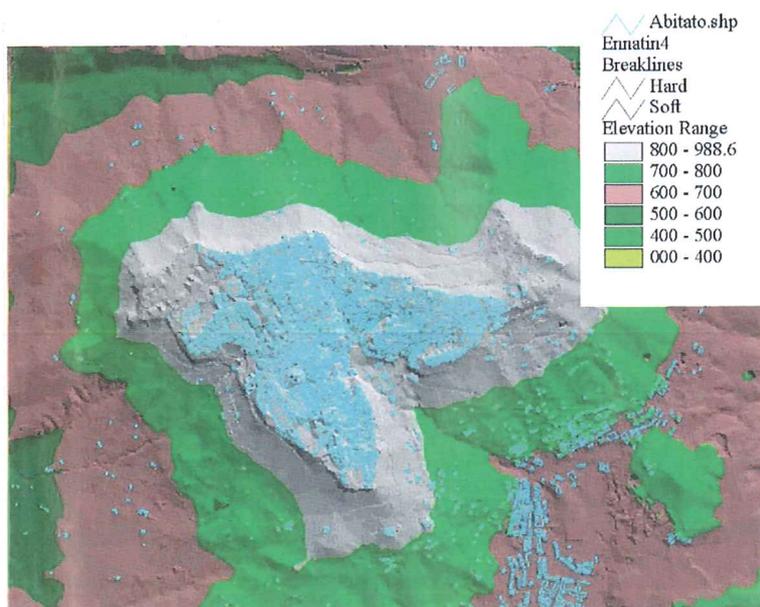
Frane ed erosioni

Si fa riferimento ai dissesti, intesi come situazioni d'equilibrio instabile che interessano sia le parti più superficiali sia le parti più profonde del suolo, comprendendo fenomeni d'intensa erosione e fenomeni che implicano veri e propri movimenti di massa, oltre alle frane causate dai sismi. Infatti, in particolari condizioni geomorfologiche e idrogeologiche, l'accelerazione del suolo può riattivare un dissesto già avvenuto, o innescarne uno nuovo.

Idrografia

Il territorio, di tipo montuoso, presenta diversi impluvi di natura erosiva, ma di portata limitata. L'asta idrografica che merita maggiore attenzione è il torrente Torcicoda, che raccoglie le acque piovane e reflue della città, confluendo nel fiume Salso. Storicamente i torrenti non hanno evidenziato problemi di tracimazione, ma lungo le strade che collegano la città di Enna si manifestano fenomeni di ruscellamento superficiale, con valori di portata in grado di compromettere la funzionalità della rete stradale.

FIGURA 2 Il TIN di Enna realizzato con il supporto di Arcview

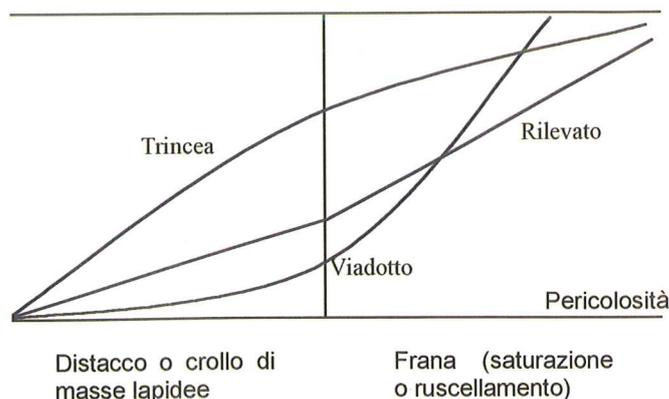


CARATTERISTICHE DELLA RETE STRADALE

Le strade principali che garantiscono l'accesso alla città sono la SP 28, la SP 2 e la SS 121 sul versante Nord, la SS 127 bis, la SP 1 e la SP 51 sul versante Est, la SS Monte Cantina e la SP 29 sul versante Sud, la SP 81 sul versante Ovest.

La rete stradale di interesse è stata analizzata sulla base delle caratteristiche geometriche dei tracciati e delle relative sezioni stradali. Le informazioni metriche sono state desunte dai supporti cartografici disponibili e integrate con rilevamenti diretti. In particolare, sono state rilevate le dimensioni delle corsie, delle banchine, dei marciapiedi e dell'intera sezione. A tal fine si è rivelata proficua la tecnica GPS, anche in modalità cinematica, per acquisire utili informazioni sulla geometria delle aree instabili (perimetrazione, fratture, fronte di avanzamento, dislivelli, ecc.) e delle opere infrastrutturali. Utilizzando i numerosi capisaldi di livellazione presenti lungo gli assi stradali nella cartografia tecnica comunale 1:2000, sono state determinate le pendenze medie nei vari tratti.

FIGURA 3 Andamento Danno-Pericolosità



ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA INFORMATIVO

Il materiale raccolto presso il comune di Enna e su internet [8][9] è servito per la realizzazione dei temi di base del sistema informativo territoriale sui quali si è lavorato per effettuare l'analisi del rischio.

In tabella 1 si fornisce una rapida descrizione delle informazioni disponibili interrogando i diversi shape.

TABELLA 1 Organizzazione del sistema informativo

Shape file Contenuti

Enna Evidenzia se l'elemento è un edificio (edificato) o una curva di livello (provincia di Enna). Le informazioni relative alle quote delle curve di livello sono state utilizzate per elaborare il TIN di Enna cui si è già fatto riferimento (fig. 2).

Sezioni E' il tema relativo alle strade analizzate e contiene informazioni sulla tipologia di sezione (mezza costa, trincea, rilevato e ponte), l'eventuale presenza di barriere di protezione o di reti e il nome della infrastruttura (es. SS114). Tramite elaborazioni di cui si dirà in seguito, a questo tema sono state aggiunte informazioni circa la vulnerabilità e l'esposizione del tratto stradale.

Geomorfologia e geomorfologia1 La tavola geomorfologica è stata importata su Arcview(r), e costituisce due shape: uno in cui si individuano le caratteristiche geomorfologiche del terreno (su poligoni) e l'altro (ad archi) in cui si individuano le forme e i processi dei versanti.

Vegetazione e uso del suolo Il tema è tratto dalla carta di vegetazione e uso del suolo, disponibile in rete [9], e individua le aree boschive, le colture arboree ed erbacee oltre l'edificato.

Pericolosità geologica Il tema contiene i 6 campi di pericolosità geologica individuati dai geologi nel territorio ennese.

Zonizzazione Riporta la divisione di Enna alta in cinque aree, effettuata in funzione dei principali punti di accesso alla città e sulla perimetrazione delle abitazioni che possono essere servite in caso di evacuazione o di necessità di soccorso. Interrogando il database del tema si possono ottenere informazioni circa le sezioni appartenenti a ogni area, il numero e la percentuale di votanti per area, le unità in più determinate per ogni area sulla base dei minori presenti a Enna, il totale di abitanti per area e l'indice di esposizione ottenuto al nodo (vedi paragrafo relativo all'esposizione).

Strutture di emergenza Contiene le strutture di emergenza (caserma dei carabinieri, vigili del fuoco, polizia, ecc.)

Edifici pubblici Contiene gli edifici pubblici (scuole e uffici) presenti nel territorio ennese.

Portate Contiene informazioni circa le coordinate del tombino cui si fa riferimento, il valore di portata stimato per un tempo di ritorno di 50, 100 e 200 anni, il nome dell'infrastruttura su cui si trova, un numero progressivo per ogni tombino appartenente alla strada, crescente all'allontanarsi da Enna, la tipologia di tombino (di cui si parlerà più avanti), la portata massima che il tombino può smaltire e i valori di vulnerabilità, esposizione, danno e rischio determinati.

Bacini Il tema è relativo ai bacini imbriferi, determinati utilizzando le procedure di analisi idrologica realizzabili tramite l'uso dell'estensione di Arcview(r) "spatial analyst". Il tema dei bacini limitati ai punti di interesse è stato determinato tramite lo script AS11465, disponibile sul sito della ESRI [7].

Bacini di scorrimento E' il tema che contiene le aree comprese tra due bacini afferenti ai tombini delle strade esaminate e il tronco di strada intermedio. Su tale shape sono state effettuate successive elaborazioni che hanno fornito i valori di portate massime nell'arco dei 50, 100 e 200 anni.

Frane e dissesti Tale tema è stato ottenuto utilizzando le funzioni del "Geoprocessing wizard" di Arcview(r), intersecando il tema "sezioni", che contiene informazioni circa la vulnerabilità e l'esposizione, e il tema "pericolosità geologica" che fornisce le informazioni relative alla pericolosità. Con le successive elaborazioni GIS si sono ottenuti i valori di danno e rischio per i due scenari.

Rischio invasione E' stato ottenuto con l'ausilio delle funzioni GIS, tramite il comando Intersect tra lo shape sezioni (che fornisce i valori di esposizione e pericolosità) e il tema dei bacini di scorrimento che ha fornito i tratti di strada interessati dallo scenario di rischio di invasione della sede stradale. Contiene quindi anche i valori di danno e rischio per lo scenario suddetto.

ANALISI DEL RISCHIO

Il processo di valutazione del rischio, dovuto a un evento naturale, comincia con la definizione della pericolosità del sito, ovvero la probabilità che si verifichi un evento naturale dannoso di una determinata entità territoriale e in un dato intervallo di tempo. In genere, si suole distinguere tra una pericolosità diretta, conseguente al verificarsi dell'evento e alle sue caratteristiche proprie, e una pericolosità indotta, alla quale si associano i fenomeni, ad esempio di natura geologica, che possono innescarsi.

Tale indicatore viene in genere valutato come "previsione" dell'evento e dei suoi effetti, in maniera probabilistica sulla base di alcuni indicatori fondamentali: le notizie storiche relative all'area in esame, la natura geologica dei terreni, ecc. L'estensione delle aree coinvolte e dei sistemi antropici territoriali che possono subire danni o alterazioni, per effetto dell'evento di riferimento, sono oggetto dell'analisi dell'esposizione. La propensione di persone, beni o attività a subire danni o comunque modificazioni in occasione dell'evento è oggetto delle valutazioni di vulnerabilità. L'analisi si completa con la determinazione del rischio, inteso come misura del danno che può essere subito e delle conseguenze ad esso associate. La valutazione può avvenire in termini di vite umane, ossia del numero di persone che si prevede possano rimanere uccise o ferite, oppure di stime economiche sull'ammontare complessivo dei danni attesi. Una valutazione in termini assoluti dei danni determinati (ad es. in relazione ai morti, ai feriti o alla quantità di edifici distrutti) risulta spesso poco attendibile e scarsamente significativa. Si tende quindi a fare riferimento al rischio relativo, in modo da individuare una scala di priorità di intervento, sulla base degli elementi che presentano valori più elevati.

PERICOLOSITÀ

La valutazione della pericolosità di un'area è generalmente basata sullo studio delle caratteristiche storiche, ossia sull'evoluzione temporale del fenomeno e sulle caratteristiche geomorfologiche e geologiche dell'area in esame. Nel presente studio sono stati individuati due scenari di pericolosità:

- ① Il verificarsi di frane, determinato sulla base delle tavole geologiche, geomorfologiche e di pericolosità geologica fornite dall'amministrazione provinciale di Enna. Si è diversificato lo scenario in due ulteriori sottoscenari, uno relativo ai distacchi e/o crolli di massi e l'altro relativo alle frane vere e proprie.
- ② Il verificarsi di alluvioni che possano determinare soliflussi generalizzati o allagamenti della carreggiata stradale. Tale scenario è stato a sua volta suddiviso in due ulteriori classi, che consentono di individuare una pericolosità agli eventi di piena, che può mettere in crisi singoli manufatti idraulici (ponti e tombini), e una pericolosità di invasione della sede stradale.

Per la redazione delle tavole geomorfologiche è stato utilizzato il censimento delle frane avvenute nell'ultimo secolo, realizzato nell'ambito del progetto AVI [2]. Lo stesso progetto prevede un archivio delle piene, in cui sono indicate le cause e i danni provocati dalle acque o dal loro straripamento. Dai dati pluviometrici annui è stato possibile determinare un valore medio di 806 mm di pioggia. L'anno di riferimento utilizzato ai fini dei calcoli è stato il 1991, caratterizzato da una piovosità di 805 mm.

Pericolosità geologica

La carta della pericolosità geologica assieme a quella geomorfologica [provincia di Enna] fornisce informazioni sui movimenti e sui potenziali dissesti attesi; essa riporta le classi di pericolosità sintetizzate in tabella 2.

Ogni classe individua tre livelli di pericolosità, bassa, alta o nulla. Il valore nullo è stato assegnato in corrispondenza delle aree soggette alla normale evoluzione geomorfologica (classe 7) e di quelle nelle quali la carta non riportava la specifica condizione di pericolosità.

La valutazione della vulnerabilità per eventi franosi, in funzione del tipo di sezione stradale, presenta andamenti differenti. Ci si aspetta che in aree soggette a pericolo di distacco e crollo di masse lapidee, il viadotto e il rilevato subiscano, all'aumentare della pericolosità, un danno minore rispetto alla trincea, che invece è maggiormente soggetta all'invasione di detriti. Rispetto all'evento frana, la vulnerabilità di un viadotto cresce rapidamente e tende a raggiungere presto il collasso, superando quindi la curva di vulnerabilità di una sezione in trincea; il viadotto, infatti, riesce a resistere meglio alle sollecitazioni di piccola entità, ma raggiunto un certo valore tende a collassare (figura 3).

TABELLA 2 Classi di pericolosità geologica

tipo di area	
1	Aree soggette a pericolo di distacco e crollo di masse lapidee (calcareniti gessi)
2	Aree di accumulo detritico su substrato argilloso e/o marnoso a rischio di frana per saturazione o ruscellamento diffuso
3	Aree in terreni argillosi e/o marnosi con elevata acclività a rischio di fenomeni di soliflusso della coltre superficiale per ruscellamento diffuso e/o concentrato
4	Aree in terreni argillosi e/o sabbiosi soggetti a fenomeni calanchivi e/o franosi per ruscellamento diffuso e/o concentrato
5	Aree in prossimità di alvei torrentizi a rischio di erosione di sponda
6	Pericolo di esondazione
7	Aree soggette a normale evoluzione geomorfologica

Pericolosità per eventi di piena

É la probabilità che accada un evento eccezionale che porti a esondazioni o interferenze tra i deflussi di massima piena e le infrastrutture viarie. Il valore di pericolosità (tabella 3) è associato alla portata direttamente affluente al tombino, alla quale è stata aggiunta quella affluente dalle cunette e dai fossi di guardia (qualora essi siano presenti).

TABELLA 3 Pericolosità per eventi in piena

portata (m³/s)				
< 1	1-5	5-10	10-15	>15
T	B	M	A	MA

T = TRASCURABILE; B = BASSA; M = MEDIA; A = ALTA; MA = MOLTO ALTA.

Pericolosità di invasione della sede stradale - In generale, tra due bacini contigui intersecati da una strada si individua un'area entro la quale le particelle d'acqua non confluiscono nell'impluvio e scorrono verso la sede stradale, avendo traiettorie più basse rispetto all'imbocco del tombino (figura 4). In assenza di idonee opere di canalizzazione, le acque di ruscellamento superficiale, con i relativi detriti di trasporto, tendono a invadere la sede stradale, compromettendone le condizioni di percorribilità. Tali aree sono state individuate tramite l'intersezione dello shape dei bacini ottenuto dalle elaborazioni di Arcview(r) e l'intersezione con lo shape della viabilità.

Per evidenziare i tratti maggiormente esposti a tale fenomeno si è definito il seguente indice di occupazione della sede:

$$I_o = Q/L$$

con:

Q = Portata di acqua che si riversa sulla sede stradale;

L = Lunghezza del tratto di strada che sottintende il pendio.

Tale coefficiente consente di confrontare e gerarchizzare, in termini quantitativi, la pericolosità dei diversi tronchi stradali soggetti al fenomeno.

Nel caso in esame sono state individuate tre classi di pericolosità (tabella 4, figura 5). Tale suddivisione può anche essere variata, operando eventuali ulteriori o differenti frazionamenti.

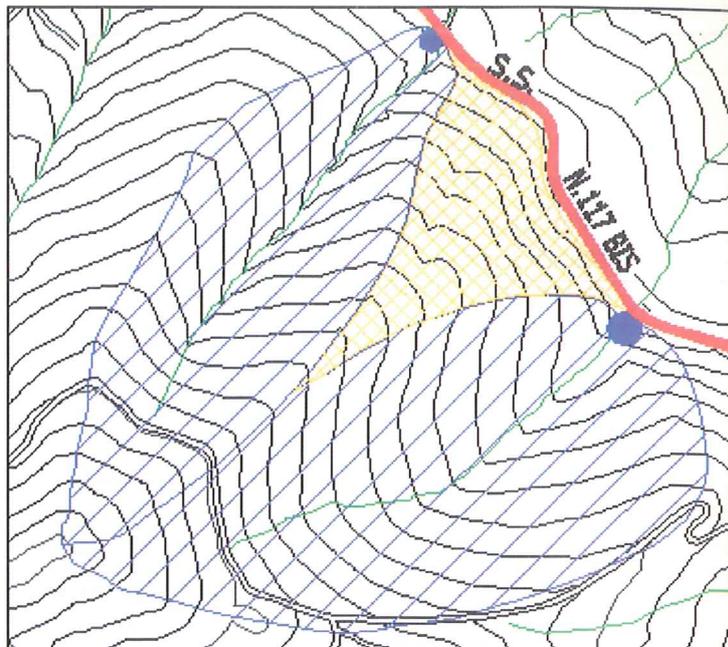


FIGURA 4 Esempio di individuazione di un "bacino di scorrimento"

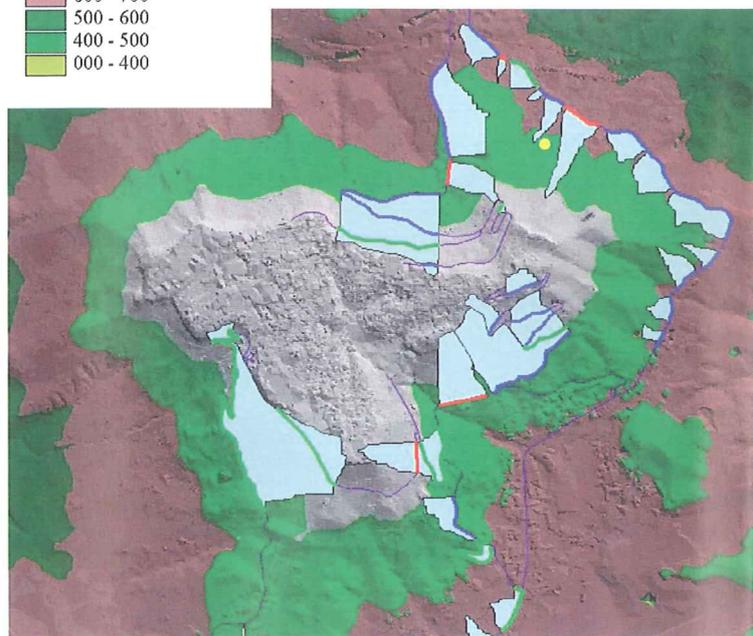
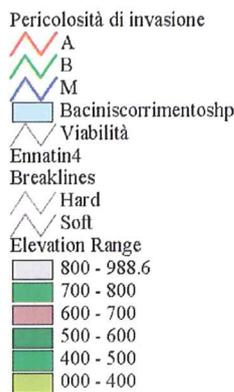


FIGURA 5 Pericolosità di invasione della sede stradale

TABELLA 4 Indice di occupazione

indice di occupazione	classe	descrizione
0 - 0.40	1	Bassa
0.40 - 0.80	2	Media
> 0.80	3	Alta

ESPOSIZIONE

L'esposizione è la quantità e l'estensione di tutti gli elementi antropici "a rischio" che, ricadendo in un ambito territoriale di accertata pericolosità, sono suscettibili a danneggiamento a causa del verificarsi dell'evento. Gli elementi a rischio considerati nell'analisi dell'esposizione sono le persone che possono rimanere coinvolte durante il disastro.

Attenzione è stata rivolta anche ai manufatti, quali edifici (considerando soprattutto quelli con compiti strategici, fondamentali in situazioni di emergenza per garantire soccorsi e servizi di assistenza: complessi ospedalieri e sanitari, strutture della protezione civile, ecc.), al sistema infrastrutturale di trasporto (strade, ferrovie, aeroporti, ecc.) e ai singoli elementi che lo compongono (ponti, viadotti, gallerie, ecc.), oltre che a tutti gli altri sistemi a rete (condotte del gas, tubazioni dell'acqua, rete elettrica, ecc.).

Le zone sono state individuate solo nel centro abitato di Enna alta, poiché si è inteso valutare il rischio delle arterie che ne permettono il collegamento con il territorio circostante. La divisione di Enna alta in aree è stata effettuata in funzione dei cinque principali punti di accesso alla città, sulla base delle abitazioni che possono essere servite in caso di evacuazione o di necessità di soccorso (figura 6). Suddiviso il centro abitato in aree differenti, si è quantificato il numero di abitanti per area in base alle sezioni elettorali 2001 (tabella 5). E' stato quindi calcolato un indice di esposizione relativo alla popolazione (Ea), rapportando i valori di popolazione per ogni area ad una scala da 1 a 5 (tabella 6).

TABELLA 5 Distribuzione degli abitanti nel territorio ennese

zone	n.abitanti	
Enna Alta	17.984	al 31/12/2000
Enna Bassa	9.574	al 31/12/2000
Pergusa	1.452	al 31/12/2000
Varie	978	al 31/12/2000
Totale	29.988	dato CED
N. Minori 0 - 17 anni	5.653	al 26/02/2001

TABELLA 6 Classi di esposizione

classi	popolazione
1	0-1291
2	1291-2582
3	2582-3873
4	3873-5163
5	5163-6454

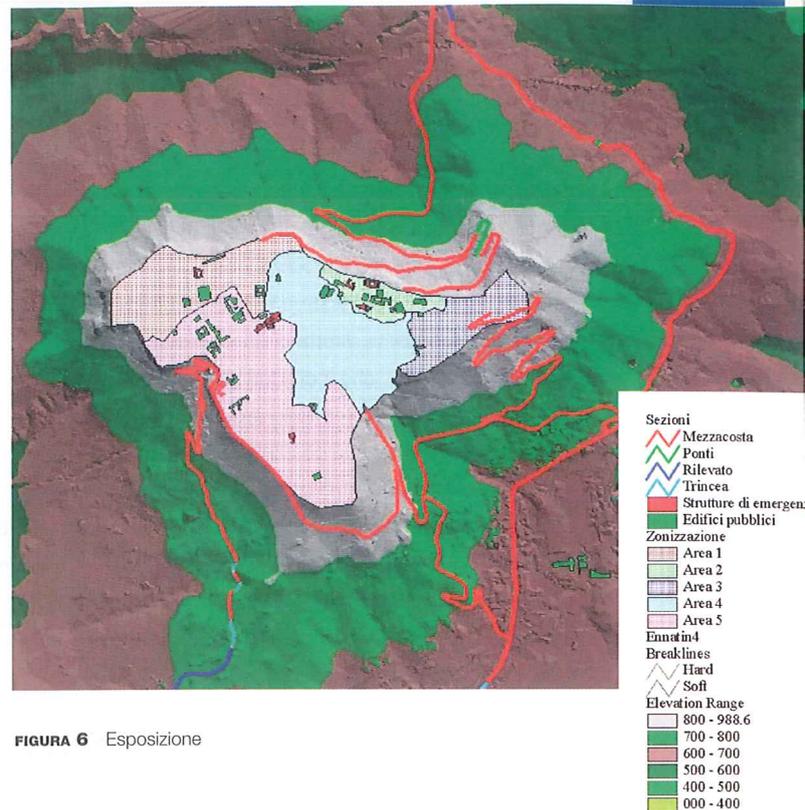


FIGURA 6 Esposizione

Uno studio più dettagliato andrebbe effettuato considerando anche la concentrazione della popolazione nelle diverse fasce orarie. È intuitivo come le aree con una maggiore concentrazione di edifici pubblici risultino maggiormente popolate nei giorni feriali (durante i normali orari di lavoro), mentre le zone residenziali lo sono durante la notte. Le aree di svago o i locali notturni presentano, di contro, una maggiore concentrazione di persone nei giorni festivi.

I valori di abitanti determinati sono stati utilizzati per assegnare il valore dell'esposizione alle strade afferenti ai nodi con i seguenti criteri:

- Il tratto stradale che arriva direttamente al nodo assume un valore di esposizione pari a quello dell'area cui il nodo fa capo;
- le ramificazioni successive portano a una ripartizione dell'esposizione in parti uguali: se la strada principale si ramifica in due tratti, la popolazione viene ripartita egualmente sui due tratti;

Il principio su cui si basa tale assegnazione è quello secondo cui, qualora si verifichi un'interruzione su una delle due ramificazioni, il flusso di traffico proveniente dalla strada principale potrebbe essere deviato sull'altro ramo e viceversa. Non si è tenuto conto del flusso di traffico usuale di tali strade, in quanto si è ritenuto che in una situazione di emergenza le condizioni normali di circolazione verrebbero a essere stravolte.

VULNERABILITÀ

La vulnerabilità, intesa come "misura" della perdita o della riduzione di efficienza nello svolgere le funzioni normalmente esplicitate, è una caratteristica intrinseca di ogni manufatto, del tutto indipendente da qualsiasi fattore esterno.

Può essere articolata nelle seguenti componenti:

- **Vulnerabilità diretta**, cioè propensione di un singolo elemento a subire danni o a crollare a seguito di un evento (si può parlare di vulnerabilità diretta di un viadotto).
- **Vulnerabilità indotta**, che individua gli effetti della crisi dell'organizzazione del territorio provocati dal collasso di uno o più elementi che lo costituiscono (ad esempio, l'impraticabilità di una strada mette in crisi il sistema viario).
- **Vulnerabilità differita**, che indica gli effetti che si manifestano nelle fasi successive all'evento, tali da modificare le abitudini ed il comportamento delle popolazioni insediate (ad esempio, l'utilizzazione temporanea di alloggi di emergenza, quali scuole, tendopoli, ospedali, ecc.).

VULNERABILITÀ AI DISSESTI (CROLLI E FRANE)

Si è valutata la propensione a subire danni da parte del singolo ramo, in relazione ai fenomeni legati ai dissesti presenti nel territorio studiato. In tale scenario gli elementi della vulnerabilità dei tratti stradali corrispondono a:

- Tipo sezione stradale: ponte, rilevato, trincea, mezza costa.
- Presenza di protezione lungo le scarpate: reti, barriere paramassi.

Si è definito un indice di influenza che tiene conto delle caratteristiche degli elementi e definisce la loro incidenza sulla vulnerabilità del ramo (tabella 7). Ove necessario, a causa della diversità delle sezioni stradali, la singola arteria è stata suddivisa in più tratti omogenei.

La vulnerabilità è minore o maggiore a seconda che le sezioni in trincea o a mezza costa presentino protezioni di barriere, reti o ne siano sprovvisti.

Questi valori di vulnerabilità sono stati poi ripartiti sui singoli tratti stradali di pericolosità omogenea, assegnando a ognuno di essi un valore di danno, derivato dalla matrice pericolosità-vulnerabilità.

TABELLA 7 Individuazione degli indici di influenza

	Tipologia FRANE	Protezione DISTACCHI o CROLLI
I MIN	B Ponte	B Max (Barriere)
	M Rilevato	M Min (reti)
I MAX	A Mezzacosta, Trincea	A Nessuna

TABELLA 8 Indici di valutazione della vulnerabilità per invasione della sede stradale

	OPERE IDRAULICHE	SEZIONE TIPO
I MIN	B Fossi di guardia, Cunetta a regola d'arte	B Rilevato h < 1m
	M Cunetta	
I MAX	A Assenti	A Trincea, Mezzacosta

VULNERABILITÀ AGLI EVENTI DI PIENA

La presenza di tombini di sezione non idonea allo smaltimento delle acque provenienti dagli impluvi può portare a un allagamento della sezione stradale, se non addirittura a un suo danneggiamento, qualora l'acqua presenti elevata energia cinetica. In questo caso si parla di vulnerabilità puntuale del ramo, in quanto si procede alla verifica puntuale dei tombini stradali. La vulnerabilità del tombino è definita mediante il valore di portata massima che lo stesso è in grado di smaltire. Si è quindi effettuata una verifica idraulica del manufatto, accettando l'ipotesi semplificativa del moto uniforme.

VULNERABILITÀ PER INVASIONE DELLA SEDE STRADALE

Si tiene conto del fatto che la sede stradale, in assenza di contromisure idonee, può essere invasa da acqua o materiale detritico. I fossi di guardia e le cunette costituiscono la protezione della sezione stradale; la loro assenza o inadeguatezza incidono sulla vulnerabilità del ramo. Anche la tipologia della sezione gioca un ruolo importante, dal momento che, sicuramente, i tratti in trincea e a mezzacosta sono più vulnerabili a tale scenario, rispetto a quelli in rilevato o in viadotto, ed è più facile che, in presenza di una non idonea progettazione delle opere di smaltimento idraulico, i detriti invadano la sede stradale. (tabella 8). In base ai valori degli indici di vulnerabilità per la presenza di opere idrauliche e in funzione della sezione stradale dei singoli tronchi (tabella 8), si è ottenuta una classificazione della vulnerabilità del ramo per invasione della sede stradale (tabella 9).

TABELLA 9 Definizione della vulnerabilità per invasione della sede stradale

SEZIONE TIPO	OPERE IDRAULICHE		
	B	M	A
A	M	M	A
M	B	M	A
B	B	M	M

RISCHIO IDROGEOLOGICO DELLA RETE STRADALE

Da una prima combinazione tra i dati ottenuti sulla pericolosità e sulla vulnerabilità, è possibile pervenire a una valutazione del *danno prevedibile* sulla struttura in esame. È evidente che, a parità di pericolosità del sito (P), una vulnerabilità (V) più elevata fa prevedere una maggiore probabilità di danno (D) sullo stesso. L'introduzione dell'esposizione (E), che rappresenta la componente antropica coinvolta nella valutazione, porta alla definizione del rischio indiretto (R). La problematica, molto complessa, è stata separatamente affrontata per singolo scenario di pericolosità. Generalmente, la relazione usata per il calcolo del rischio dei singoli tratti stradali, è del tipo :

$$R_T = P \times V \times E = D \times E$$

Si è proceduto prima all'individuazione di un vettore del danno (anch'esso costituito da tre elementi B, M, A) tramite l'intersezione tra i vettori di pericolosità e di vulnerabilità. Successivamente entra in gioco l'esposizione per individuare la matrice del rischio.

Nell'individuare il vettore del danno, essendo chiara la realizzazione della diagonale della matrice dei prodotti ($A \times A = A$, $M \times M = M$ e $B \times B = B$) si è deciso di assegnare priorità al fattore di pericolosità, in quanto si ritiene che un elemento debole può resistere se non esposto alle avversità della natura, ma un elemento anche più resistente, se molto sollecitato, tende a danneggiarsi.

Secondo quanto detto precedentemente, la matrice di danno sarà la seguente (tabella 10): Il rischio, per i vari scenari definiti, è determinato dalla composizione dei valori di pericolosità, esposizione e vulnerabilità, ovvero sia dal prodotto tra il vettore del danno (tre dimensioni) e quello dell'esposizione (cinque dimensioni). La definizione del rischio viene quindi effettuata da un punto di vista qualitativo, ottenendo per ogni scenario aree a rischio basso, medio e alto. In questo caso nella costruzione della matrice di rischio si è dato maggior peso al fattore esposizione in modo da esaltare l'importanza del fattore umano (danni alle persone) rispetto a quello economico (danni alle cose).

TABELLA 10 Matrice di danno

	PERICOLOSITÀ		
	B	M	A
VULNERABILI			
A	M	M	A
M	B	M	A
B	B	M	M

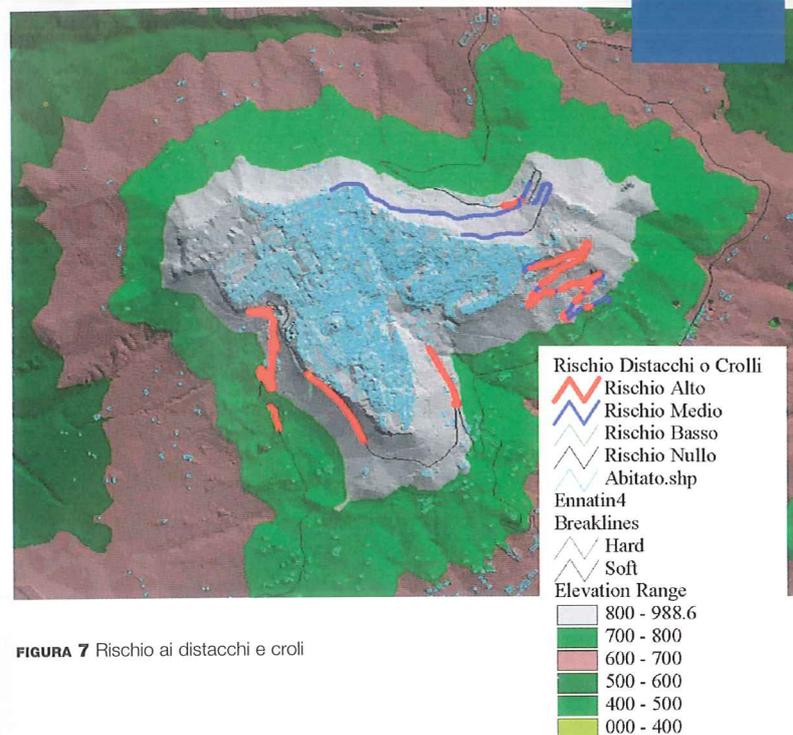


FIGURA 7 Rischio ai distacchi e crolli

RISCHIO SUL DISSESTO GEOLOGICO DELLE STRADE

Sovrapponendo la carta del potenziale dissesto geologico con il tematismo relativo alla vulnerabilità si ottiene il valore di danno. Avendo definito una vulnerabilità alle frane e una ai distacchi o crolli di massi, si ottiene un vettore del danno per ognuno degli scenari. Intersecando tali vettori con l'esposizione si ottiene il vettore relativo al dissesto geologico per frane o distacchi e crolli di massi (figura 7).

RISCHIO DELLA RETE STRADALE AGLI EVENTI DI PIENA

La valutazione del rischio secondo questo scenario è di tipo puntuale. È stata effettuata un'analisi delle massime portate di piena prevedibili con tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni, e delle sezioni idrauliche dei tombini e ponti che sottendono i bacini. Lo studio della pericolosità ha restituito il valore delle portate raccolte dai bacini degli impluvi studiati, mentre l'analisi della vulnerabilità ha fornito indicazioni circa la verifica idraulica delle sezioni dei tombini e dei ponti (figura 8). L'esposizione è in questo caso solo quella diretta, valutata in relazione al numero di utenti che potrebbero essere presenti sull'arteria in occorrenza dell'evento. L'analisi del rischio, dunque, individua i tratti in cui si possono verificare situazioni di pericolo per l'utente, in occasione di portate eccezionali. Il 46% dei tombini esaminati restituisce valori di rischio puntuale alto, con tre tombini la cui sezione idraulica non è idonea.

TABELLA 11 Tabelle del rischio

	ESPOSIZIONE				
	T	B	M	A	MA
DANNO					
A	M	M	M	A	A
M	B	B	M	A	A
B	B	B	M	M	M

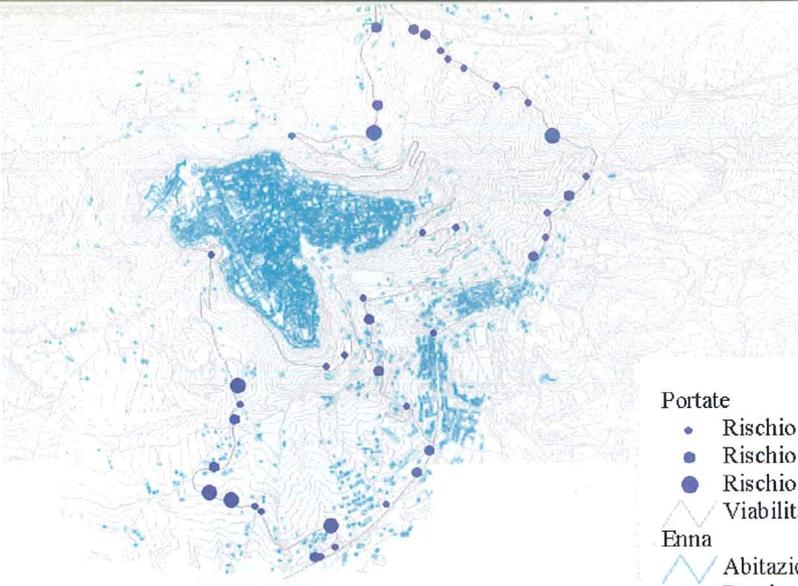


FIGURA 8 Rischio agli eventi in piena

RISCHIO D'INVASIONE DELLA SEDE STRADALE

Il rischio è stato anche in questo caso valutato in base agli scenari precedentemente definiti e, in particolare, relativamente ai bacini di scorrimento sottesi dalle arterie oggetto di analisi. La valutazione è stata condotta secondo i criteri esposti (tabella 10) considerando, comunque, che in assenza di bacino di scorrimento è stato associato al tratto un valore di rischio nullo (figura 9).

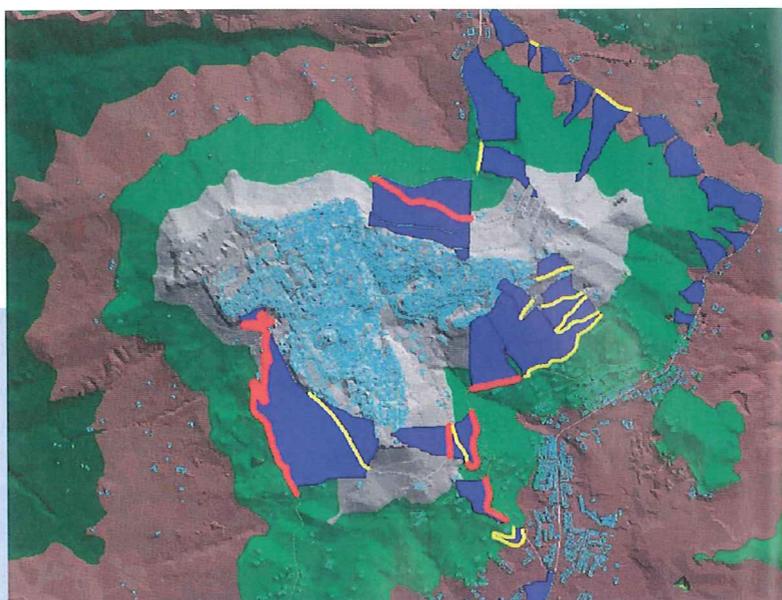
CONCLUSIONI

Tutti i sistemi di trasporto, e le strade in particolare, assumono una notevole importanza nella valutazione del rischio idrogeologico sul territorio. La disponibilità di infrastrutture viarie efficienti e funzionali dopo il verificarsi di eventi calamitosi è, infatti, indispensabile per garantire le operazioni di soccorso e un rapido accesso alle aree colpite. Sulla rete stradale, inoltre, si riversa ogni giorno una quota considerevole della popolazione e, quindi, non trascurabile è il rischio diretto cui sono esposti gli utenti in caso di eventi calamitosi. Con il presente lavoro, esaminate le particolari condizioni di accessibilità alla città di Enna, si propone un approccio metodologico di valutazione del rischio delle infrastrutture viarie in relazione ai diversi scenari di pericolosità di natura idrogeologica. Indispensabili si sono rivelate le funzionalità dell'ambiente GIS, grazie alle quali è stato possibile automatizzare le diverse fasi delle analisi e la produzione della conseguente cartografia tematica, oltre che effettuare le valutazioni quantitative utili per la gerarchizzazione delle condizioni di rischio e l'eventuale definizione delle priorità di intervento.

Salvatore Cafiso dcafiso@dica.unict.it
 Gabriele Cutrona gcutrona@dica.unict.it
 Giuseppe Mussumeci gmussume@dica.unict.it
 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
 Università di Catania
 Viale Andrea Doria, 6 95125 Catania, Italy
 Tel +39 095 7382213
 Fax +39 095 7382247



FIGURA 6 Rischio di nvasione della rete stradale



BIBLIOGRAFIA

[1] Cafiso S., Colombrita R., D'Andrea A., Mussumeci G., Colombrita F., Condorelli A. (2001), "Un modello di GIS per la valutazione del rischio sulle infrastrutture stradali nelle emergenze della protezione civile", S., XI Convegno Nazionale SIIV, Verona, novembre, 2001

[2] Cafiso S., D'Andrea A., Condorelli A. (1999) "Evaluation Of Seismic Risk On Road Infrastructures", PIARC XXI World Road Congress Kuala Lumpur, ottobre, 1999.

[3] Lo Bianco F. (1999), "Il monitoraggio dei dissesti geologici delle strade della provincia di Enna",.

[4] Mussumeci G., Condorelli A. (2001), "Gestione dell'emergenza incendio. Un GIS per la previsione dell'avanzamento del fronte di fuoco e la determinazione dei percorsi di avvicinamento ai fini delle operazioni di spegnimento", Documenti del Territorio 48/2001.

[5] MondoGIS, febbraio 2002

[6] <http://www.gndci.pg.cnr.it>

[7] <http://www.esri.com>

[8] <http://www.prefetturaenna.it>

[9] <http://www.provincia.enna.it>