



**IL PREANNUNCIO METEOROLOGICO
PER LA GESTIONE DELLE RETI VIARIE
IN CONDIZIONI DI EMERGENZA**

Andrea Benedetto

Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile - Università di Roma Tre
Via Vito Volterra 60, 00146 Roma
Tel: +39 06.55173316 - Fax: +39.06.55173441
E-mail: benedet@dsic.uniroma3.it

Claudio Cosentino

Azienda Comunale Energia e Ambiente – ACEA Roma
Piazzale Ostiense, 00100 Roma
Tel: +39 06.57996154 - Fax: +39.06.55173441
E-mail: c.cosentino@aceaspa.it

IL PREANNUNCIO METEOROLOGICO PER LA GESTIONE DELLE RETI VIARIE IN CONDIZIONI DI EMERGENZA

ANDREA BENEDETTO - Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile – Roma Tre
CLAUDIO COSENTINO - Azienda Comunale Energia e Ambiente – Roma

SOMMARIO

Nel settore della protezione civile sono sempre più diffusi strumenti dedicati al preannuncio di eventi meteorici intensi. Questi strumenti trovano grande applicazione nell'ambito dei piani di governo delle emergenze dei centri abitati, piuttosto rari sono invece i casi in cui i modelli di preannuncio meteorologico sono utilizzati per la gestione delle reti infrastrutturali. D'altra parte l'applicazione in questo settore appare strategica per la prevenzione dei rischi connessi alle strade, tra i quali le inondazioni e gli eventi legati all'instabilità geomorfologica; infatti, nel caso delle strade, un fenomeno perturbativo localizzato può provocare situazioni di emergenza e malfunzionamenti generalmente estesi anche ad aree molto vaste.

Considerata la grande estensione della rete stradale, al fine di porre in essere una procedura efficiente, in configurazione operativa, per l'allerta ed il controllo, è indispensabile una preliminare analisi delle criticità strutturali, connesse alla tipologia di infrastruttura e alle caratteristiche costruttive (p.es. la densità e la tipologia delle opere d'arte), ambientali o di contorno (p.es. la conformazione geologica dell'area o i caratteri climatici) e di esercizio (p.es. la tipologia e le densità dei flussi di traffico). Tale analisi consente di gerarchizzare i tronchi della rete nei termini delle probabilità di accadimento e della gravità della manifestazione di un evento. Questo approccio giustifica la delimitazione dei domini spaziali su cui operare il preannuncio e definire i piani di emergenza.

Nel presente lavoro si delineano i principi per la redazione delle mappe di rischio per le reti stradali, identificandone qualitativamente e quantitativamente i principali indicatori. Quindi si porranno in evidenza i margini applicativi dei modelli di preannuncio meteorologico, attualmente disponibili, nel caso della gestione delle reti viarie in circostanze critiche. Infine si tratteranno le linee guida per i piani di emergenza, considerando i casi alternativi di assenza o presenza di un sistema di preannuncio in configurazione operativa.

Un attento esame merita il tema dell'affidabilità del sistema, ovvero del rischio di falso allarme. Tale aspetto non è marginale: infatti l'esecuzione di un piano di emergenza, allorquando non fosse necessario, al di là dei costi operativi prodotti, può essere causa di sfiducia nella popolazione con conseguente perdita di efficacia dei piani stessi.

ABSTRACT

In the field of risk and emergency management meteorological models for storm forecast are increasingly developed and implemented. These tools are widely adopted within emergency response planning for the protection of residential and industrial settlements, but their integration in road network hazard management systems is still quite rare. On the contrary the application in this field appears crucially strategic to cope with risks such as floods and geomorphologic instabilities that may severely affect land

transportation; in fact, in the case of the road networks, a local perturbation may induce emergency and crisis situation over wide areas. Due to the extent of the road network, an analysis of the structural, environmental, boundary and operational critical factors is required to put in place an efficient emergency management process based on an advance warning system. This analysis is aimed at defining a hierarchy of the road network stretches evaluating the level of risk of hazards as the composition the probability and severity of each possible critical event. Risks zoning through this approach allows the identification of the spatial domains over which implement an early warning system and establish emergency plans.

In this paper the key principles for the identification of the risk maps for road network are investigated, through some quali-quantitative indicators, in an hazard analysis context. The operational limits of the existent meteorological forecast models are highlighted in the framework of road network emergency system. Finally the guidelines for the planning of emergency protocols are proposed, considering the availability of an early warning forecast system.

An interesting problem refers the reliability of the forecast issues. This aspect is not marginal: the erroneous activation of an emergency response plan may induce mistrust in people and not negligible costs.

1. INTRODUZIONE

Una questione di particolare interesse nel nostro paese riguarda il controllo dei rischi connessi alle strade, con riferimento alle conseguenze che possono derivare da fenomeni di crisi localizzata o diffusa sulla rete infrastrutturale. In genere è possibile distinguere alcune categorie di rischi riferendosi alle cause prevalenti. Tra queste categorie le più rilevanti riguardano i rischi conseguenti eventi naturali (terremoti, frane, alluvioni, etc.), i rischi dovuti a invecchiamento di strutture e sovrastrutture (crollo di strutture, cedimenti delle pavimentazioni, etc.) e i rischi legati direttamente o indirettamente ad interventi antropici (sversamenti accidentali di sostanze inquinanti, etc.). In questo scenario assai complesso si è affermata nel nostro paese con sempre maggior urgenza la necessità di un controllo dei rischi dovuti ad eventi naturali, sia in chiave preventiva che in relazione alla gestione dell'emergenza. Una strategia di grande efficacia risiede nel coniugare le azioni di sicurezza attiva finalizzate a ridurre le probabilità di accadimento dell'evento con le azioni di sicurezza passiva orientate piuttosto a ridurre la gravità dell'evento stesso. Tale strategia trova giusta sede operativa nell'ambito dei piani di protezione civile e nei protocolli di gestione dell'emergenza [12].

La sicurezza attiva prevede l'individuazione del rischio e la messa a punto di sistemi di protezione, esempi di questo tipo possono essere individuati nelle stabilizzazioni di movimenti gravitativi potenziali od in atto, ovvero nella realizzazione di opere di contenimento delle piene fluviali a protezione del corpo stradale.

La sicurezza passiva riguarda invece la definizione di idonee procedure per render minime le conseguenze di un rischio, ad esempio riducendo il numero di veicoli potenzialmente coinvolti. In questo senso si dimostrano di significativa importanza le potenzialità dei moderni sistemi di preannuncio idrometeorologico per la gestione di eventi connessi a precipitazioni meteoriche intense, quali le alluvioni, le frane o la formazione di lame d'acqua sulle piattaforme stradali.

L'efficacia di un sistema di preannuncio, asservito a piani di protezione civile e gestione delle infrastrutture, può essere incrementata in misura rilevante attraverso la gestione del complesso sistema di reti stradali, individuando lo spettro degli itinerari

disponibili tra origine e destinazione, classificandoli in funzione delle capacità di deflusso e di alcune principali caratteristiche, in modo da governare organicamente le risorse effettivamente disponibili. Ciò richiede un avanzato lavoro di integrazione tra i meccanismi e le potenzialità dei sistemi di preannuncio e l'analisi di natura strettamente stradale dei collegamenti viari e della struttura della domanda.

La ricerca si è da tempo interessata dello studio di metodologie e modelli per la simulazione e la previsione degli eventi naturali calamitosi, con approccio di tipo sia stocastico sia fisicamente basato. Gli sviluppi ottenuti, oltre ad interessare il campo scientifico, già consentono di avviare una fase pilota in modalità operativa [2] con riguardo alle applicazioni finalizzate ai sistemi di preallarme e gestione delle emergenze.

Le strategie possibili riguardano in primo luogo la messa in opera di sistemi dedicati al controllo ed esercizio di infrastrutture specifiche per le quali siano stati identificati rischi intrinseci (ponti, gallerie stradali o ferroviarie, etc.) oppure siano soggetti a pericoli esogeni in relazione alle caratteristiche del territorio (complessi viari sottoposti a possibili eventi locali di frana o invasione dalle acque, etc.). In questo caso sistemi di preannuncio sono direttamente legati alla misura e monitoraggio in tempo reale degli indicatori di evoluzione delle condizioni di sicurezza: cedimenti, spostamenti, livelli idrici, etc.. Complessivamente questo approccio può essere adottato per manufatti di grande rilievo o per situazioni critiche in atto in cui risulta opportuno un specifico controllo dedicato.

Un approccio più generale per la gestione dell'allerta e delle emergenze sul reticolo dei trasporti è però oggi perseguibile attraverso l'impiego delle capacità predittive di modelli di simulazione meteorologica alla scala regionale e nazionale già esistenti presso i Servizi Tecnici Nazionali, le Agenzie Regionali per l'Ambiente e altre istituzioni di ricerca. Gli eventi di precipitazione intensa o prolungata che costituiscono l'innescò fondamentale di fenomeni di dissesto quali esondazioni, frane, debris flow possono essere identificati e anticipati con tempi di preavviso adeguati all'attivazione dei protocolli di allerta ed, eventualmente, di emergenza, e con gradi di affidabilità sempre crescente.

In generale è possibile ipotizzare, come illustrato in dettaglio al paragrafo 3, una struttura di previsione delle occorrenze - valutazione degli impatti previsti - allarme degli organi decisionali - attivazione dei piani di emergenza che coinvolga in forma coordinata i Servizi Tecnici od altre istituzioni preposte al controllo del territorio, le Società gestrici dell'infrastruttura viaria e la Protezione Civile.

2. ANALISI DELLE CRITICITÀ STRUTTURALI ED INFRASTRUTTURALI

Di cruciale importanza risulta l'individuazione delle aree potenzialmente critiche sotto il profilo della protezione civile, infatti l'efficienza dei sistemi di gestione dell'emergenza cresce al decrescere delle dimensioni areali o lineari delle zone controllate. In altri termini, se fosse possibile localizzare univocamente il punto di crisi, sarebbe pressoché possibile annullare la gravità degli eventi indotti, anche in assenza di preannuncio. Pertanto, considerata la grande estensione della rete stradale, al fine di porre in essere una procedura efficiente, delimitando le aree di intervento, in configurazione operativa, per l'allerta ed il controllo, è indispensabile una preliminare analisi delle criticità strutturali, ambientali o di contorno e di esercizio. Le prime due concorrono a definire la probabilità di accadimento di un evento, mentre la terza ne determina la gravità.

Per quanto attiene le criticità strutturali, l'analisi di vulnerabilità deve considerare la densità, la tipologia e le caratteristiche delle opere d'arte al fine di identificare degli indicatori aggregati che consentano di verificare speditamente la propensione dell'infrastruttura a fenomeni di crisi localizzate. In questo senso, in relazione esclusivamente al rischio sismico, è stata già predisposta una check list semplificata e finalizzata ad un'indagine speditiva, che consente di gerarchizzare i tronchi della rete nei termini delle probabilità di accadimento, fornendo anche elementi utili alla valutazione della gravità della manifestazione di un evento di crisi [11]. Fermo restando che in relazione a cause di differente natura è necessario ridefinire i termini della check list, il riferimento citato rappresenta un utile supporto metodologico. Pertanto, a titolo esemplificativo, si riporta lo schema della check list proposta, rimandando al riferimento bibliografico per un maggior dettaglio, che in questa sede risulterebbe di eccessivo appesantimento.

Cause che determinano limitazioni di transitabilità della strada per effetto interno	Elementi critici	Parametri di vulnerabilità propria	Classe di vulnerabilità		
			Basso	Medio	Alto
A Cedimenti strutturali delle opere d'arte	A ₁ viadotti	tipologia strutturale	struttura scatolare, telai	trave continua, struttura ad arco	trave appoggiata
		se verificato sismicamente	se il territorio è classificato sismico all'epoca della costruzione del ponte		
		lunghezza dell'opera	L<=50m	50m<L<300m	L>=300m
		altezza massima delle pile	h<=25m	25m<h<50m	h>=50m
		tipo di materiale	c.a., p., c.a.	acciaio, acciaio-clt	muratura
	A ₂ galleria profonda	stato di degrado	basso	medio	elevato
		presenza di faglie	assenti presenti		
		numero di canne	autostrade, raccordi autostr. e strade a due canne	autostrade, raccordi autostradali e strade statali a singola canna	stade locali, strade comunali e strade provinciali a singola canna
	A ₃ galleria superficiale naturale	stato di degrado	basso	medio	elevato
		stato di degrado	basso	medio	elevato
	A ₃ galleria superficiale artificiale	tipologia strutturale	sezione ad arco	sezione rettangolare	
		numero di canne	autostrade, raccordi autostr. e strade a due canne	autostrade, raccordi autostradali e strade statali a singola canna	stade locali, strade comunali e strade provinciali a singola canna
		stato di degrado	basso	medio	elevato
		Tipo di fondazione	fondazioni dirette		fondazioni profonde
	A ₄ opere di sostegno e opere minori	altezza dell'opera	h<=3m	3m<h<6m	h>=6m
acclività del terreno sostenuto		in funzione della litologia			
stato di degrado		basso	medio	elevato	
tipo di materiale		c.a.	muratura di mattoni, pietrame squadrato,	pietrame non squadrato, altro...	
acclività del sedime		i<=15%	15%<i<30%	i>=30%	
B Cedimenti e/o deformazioni del corpo stradale	B ₁ rilevato	altezza del piano stradale dal p.c.	h<=3m	3m<h<8m	h>=8m
		natura dei sedimi	stabile	mediamente stabile	instabile
		larghezza del piano stradale	due carreggiate	unica carreggiata	
	pendenza dei terreni d'impianto	i<=15%	15%<i<30%	i>=30%	
	B ₂ trincea	altezza del piano stradale dal p.c.	h<=3m	3m<h<8m	h>=8m
		natura dei sedimi	stabile	mediamente stabile	instabile
larghezza del piano stradale		due carreggiate	unica carreggiata		
C Difetti di sovrastrutture	C ₁ pavimentazioni	stato di degrado	basso	medio	elevato

Fig. 1 – Check list semplificata per l'analisi del rischio sismico [11]

Con riferimento alle criticità di tipo ambientale o di contorno ci si vuole qui riferire specificamente ai fenomeni di instabilità geomorfologica e alle piene fluviali, in ragione del fatto che per tali eventi è possibile applicare sistemi di preannuncio ed allerta. L'analisi di vulnerabilità deve pertanto correlare dati relativi alla propensione che gli eventi hanno a manifestarsi in specifiche zone attraversate dalle infrastrutture (p.es. mappe delle pendenze, geolitologiche, etc.) con le cause che determinano l'incremento della probabilità di accadimento (p.es. pluviometria, etc.). In questo senso la sovrapposizione delle cartografie di rischio idrogeologico con le reti di infrastrutture consente una preliminare identificazione delle aree di rischio. Ad esse è associabile, in linea generale, un tempo di ritorno dell'evento atteso, grandezza questa che riferisce delle probabilità di accadimento.

Infine, con riferimento ai caratteri funzionali delle strade, è possibile riferirsi ai grafi dei flussi di traffico e ai più complessi modelli strutturali della domanda di mobilità e trasporto. Questa informazione consente di stimare i livelli di gravità di un eventuale evento di crisi, in stretta relazione con l'esercizio dell'infrastruttura, nonché il potenziale numero di utenti coinvolti.

Questo approccio integrato che, attraverso l'analisi dei caratteri strutturali della rete e delle mappe di rischio, definisce le probabilità degli eventi e, attraverso l'analisi dei caratteri funzionali, definisce i livelli di gravità del potenziale rischio, giustifica la delimitazione dei domini spaziali su cui operare il preannuncio e definire i piani di emergenza [13].

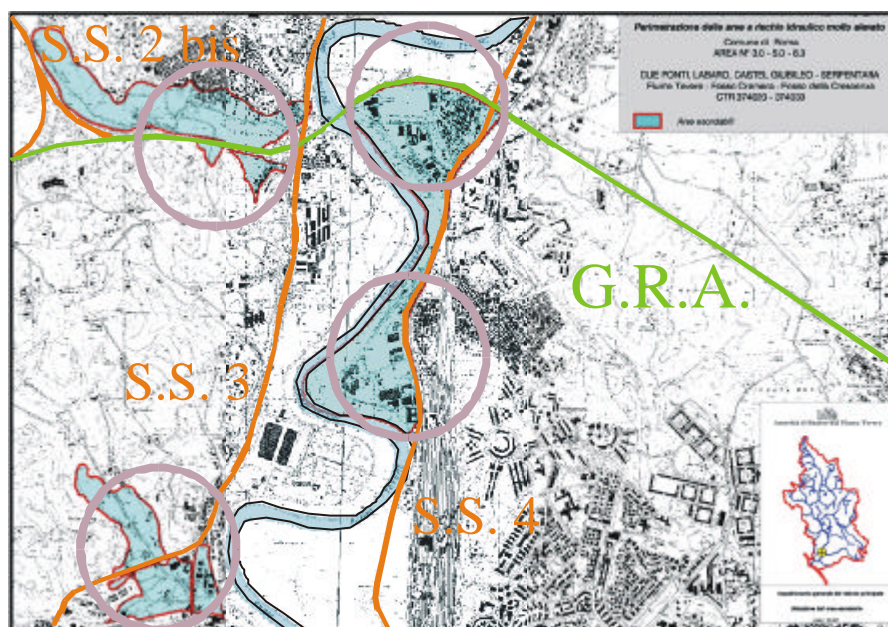


Fig. 2 – Sovrapposizione della rete infrastrutturale alle aree di rischio idrogeologico

3. IL PREANNUNCIO PER LA GESTIONE DELLE EMERGENZE

La complessità morfologica e orografica della penisola italiana rende spesso molto breve il tempo di risposta idrogeologica alle sollecitazioni pluviometriche. Ciò induce la necessità di disporre di un metodo previsionale delle precipitazioni affidabile e caratterizzato da un sufficiente anticipo, per dare luogo al tempestivo allertamento degli organi decisionali e l'attivazione dei piani di protezione civile. Differenti approcci, a confronto nella tavola sinottica (tab. 1), sono stati presentati in letteratura ma solo quelli basati su modelli meteorologici numerici sembrano al momento in grado di assicurare tempi di preannuncio oltre le 6 ore che possono essere significativi ai fini della protezione civile su scala regionale.

Tab. 1 – Modelli di preannuncio

Classe	Fondamenti	Affidabilità
Tecniche di cloud tracking	basati sull'impiego di sensori remoti, satelliti e radar, attraverso il riconoscimento e la predizione della traiettoria dei corpi nuvolosi	fino a 1-2 ore [3, 6, 10]
Modelli parametrici alla scala di nube	basati sull'equazione globale di conservazione del contenuto di acqua all'interno del volume di atmosfera sull'area di studio	fino a 3 ore [7, 8]
Metodi statistici	basati sulla correlazione temporale delle serie di precipitazioni	fino a 4 ore [4]
Modelli meteorologici numerici	integrano le equazioni fondamentali di conservazione del momento, della massa e dell'energia su griglia spazio-temporale	oltre le 6 ore

In questo senso, i modelli meteorologici numerici rappresentano la strada più promettente grazie alla loro capacità di modellare i caratteri di intermittenza e disomogeneità delle piogge [5]. Questi modelli descrivono i moti dell'atmosfera attraverso la soluzione delle equazioni fondamentali della fluidodinamica - conservazione del momento, della massa e dell'energia - integrate numericamente su una griglia spazio-temporale. I modelli di circolazione globale (GCM) risolvono le equazioni primitive su una griglia estesa su tutta la terra, prevedendo l'evoluzione dei campi di pressione, temperatura, velocità del vento ed umidità specifica, a partire da assegnate condizioni iniziali. I modelli ad area limitata (LAM) integrano le medesime equazioni su un dominio limitato, di dimensioni sufficienti a comprendere interi fenomeni meteorologici a scala sinottica, utilizzando come condizioni al contorno ed iniziali l'analisi e le previsioni di un modello GCM. Le griglie di calcolo di questi ultimi modelli possono spingersi fino a una risoluzione orizzontale massima di 10 km, oltre la quale non è più accettabile l'ipotesi di idrostaticità che viene assunta nella semplificazione del sistema delle equazioni da risolvere.

Va comunque sottolineato che, anche nel caso dei modelli meteorologici numerici non tutte le difficoltà sono state completamente risolte. Oltre all'incertezza insita nella previsione meteorologica, la loro utilizzazione passa attraverso il non banale accoppiamento con i modelli geomeccanici ed idrologici per la simulazione dei fenomeni alluvionali e franosi che impattano con le infrastrutture antropiche [1]. In particolare sussiste la necessità di colmare il divario tra le scale spazio-temporali che caratterizzano i modelli infiltrazione distribuiti (dai 50 ai 500 m) e la risoluzione ottenibile con i sistemi meteorologici attualmente operativi (dai 10 ai 50 km).

In generale lo schema concettuale di preannuncio proposto, rappresentato in figura 3, descrive una procedura che, a partire dalle previsioni meteorologiche fornisce stime quantitative di scorrimento superficiale e infiltrazione in un'area di riferimento e quindi, mediante un sistema di supporto decisionale, indica dei livelli crescenti di attenzione nelle sezioni stradali individuate come critiche. Ne risulta la possibilità di attuazione dei piani di emergenza sulla base del modello di viabilità e gestione del traffico. Il procedimento si articola attraverso quattro fasi distinte:

1. Fase di previsione meteorologica.
La previsione di precipitazione del modello a scala globale (GCM) del Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio-termine, inizializzato sulla base dei dati osservativi, è raffinato mediante un modello meteorologico ad area limitata (LAM), le cui condizioni iniziali ed al contorno sono fornite, mediante un processo di annidamento, dal modello GCM
2. Fase di accoppiamento del modello meteorologico con quello idrologico-idraulico-geomeccanico.
In questa fase le previsioni di precipitazione vengono pre-elaborate prima di essere trasferite come dati di ingresso al modello di simulazione, anche mediante l'integrazione con le osservazioni ottenute in tempo reale da reti di rilevamento (pluviometri, radar, satellite, etc.). Le motivazioni di queste operazioni risiedono nella necessità di superare le problematiche di differenza di scala e di calibrazione.
3. Fase di simulazione idrogeologica attraverso l'applicazione sul sistema naturale in esame di un modello numerico.

In questa fase sono valutati gli effetti della precipitazione in termini di deflussi, livelli idrici, cedimenti ed altri parametri che indicano l'entrata in crisi di una sezione stradale sotto controllo.

4. Fase di avvio delle procedure di emergenza sulla base del modello della rete stradale.

Il modello permette l'individuazione degli itinerari alternativi per il dirottamento del traffico, ovvero l'attivazione di misure di protezione temporanea (argini mobili, scolmatori) e di soccorso.

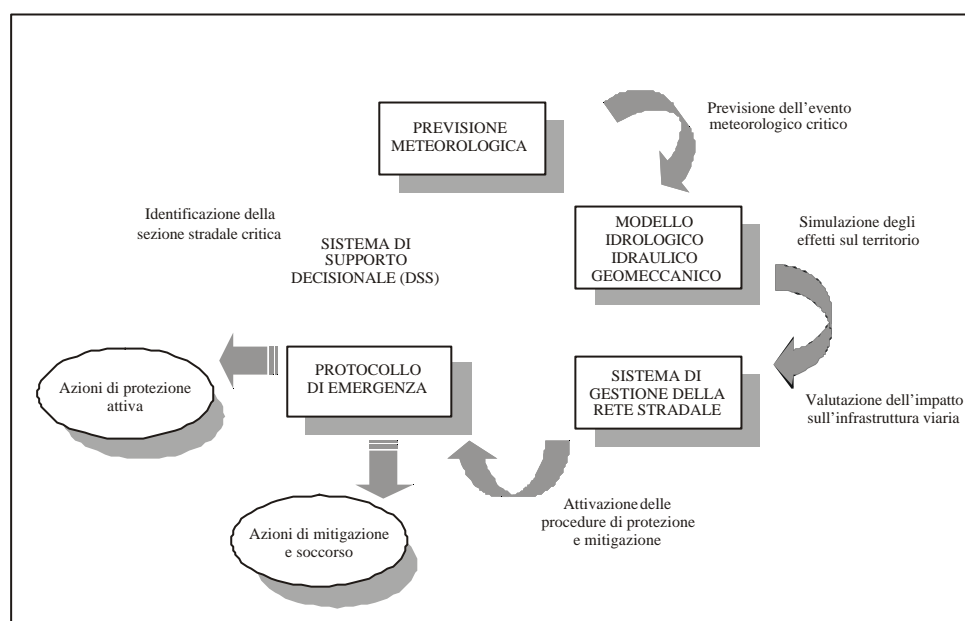


Fig. 3 – Schema logico della catena previsionale (DSS)

4. LINEE GUIDA PER I PIANI DI EMERGENZA IN UN CONTESTO DI PREANNUNCIO OPERATIVO

I piani di emergenza rappresentano gli strumenti attraverso i quali si intende organizzare la gestione efficace di situazioni di crisi nell'esercizio delle infrastrutture viarie. Alla pianificazione degli interventi di mitigazione della severità degli eventi si aggiunge, nel caso di disponibilità di un sistema integrato di preallarme, anche la possibilità di operare eventuali installazioni di prevenzione e di gestire in tempo reale la deviazione dei flussi di traffico lungo percorsi alternativi.

In generale la predisposizione del piano delle misure di emergenza deve articolarsi secondo un processo di analisi delle condizioni di sicurezza lungo il reticolo stradale articolato secondo quattro principali capitoli:

1. identificazione delle principali sezioni critiche per importanza di snodo, pericolosità intrinseca (ponti, gallerie, singolarità costruttive o di tracciato, etc.) o soggezione a eventi naturali calamitosi;
2. valutazione dei livelli di rischio associati ad ogni possibile accadimento, secondo i criteri del hazard analysis, tenendo in considerazione tutti i fattori che influenzano la frequenza e la gravità degli eventi considerati: umani, strutturali, tecnologici e di traffico, come indicato nello schema di figura 4;

3. definizione degli strumenti necessari di protezione attiva e passiva che devono essere implementati ed i mezzi di soccorso opportuni, sulla base degli standard di rischio ritenuti accettabili in generale e caso per caso;
4. organizzazione dei protocolli di intervento, coordinamento e comunicazione per tutti i soggetti coinvolti: pubblica sicurezza, vigili del fuoco, protezione civile, operatori delle società di gestione ed altre autorità, assegnando responsabilità, compiti e tempistiche.

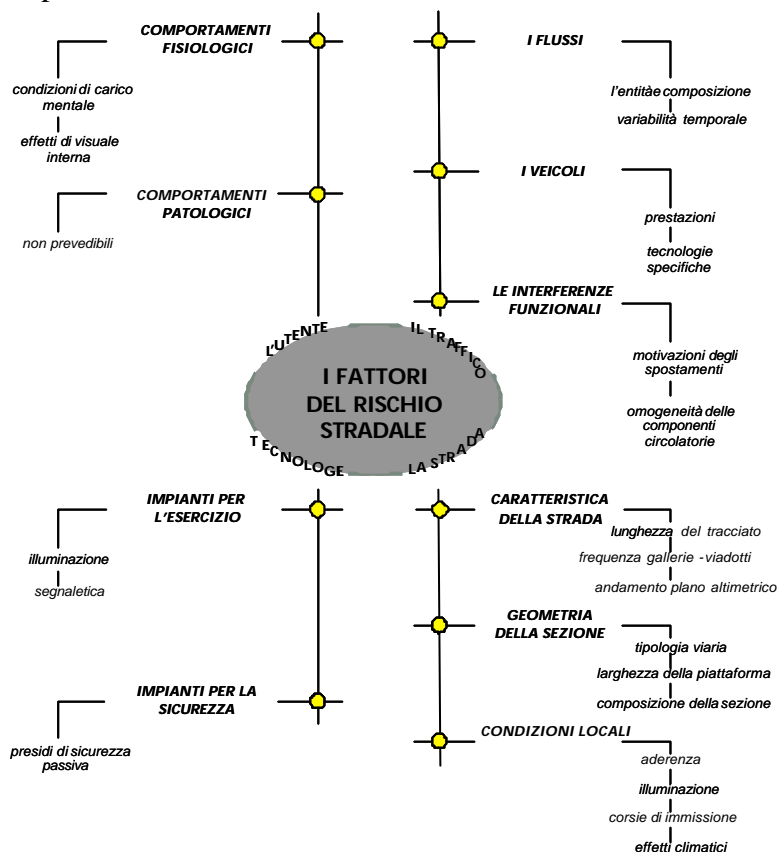


Fig. 4 – Modello concettuale per l'identificazione dei fattori di rischio

Nel contesto di un sistema di preannuncio l'approccio dell'hazards analysis risulta essenziale per l'organizzazione dei piani di emergenza. Il processo logico per le verifiche di sicurezza prevede nell'ordine:

- l'individuazione dei livelli di un rischio oggettivo definiti come prodotto della probabilità di manifestarsi dell'un evento per la gravità delle conseguenze che ne derivano secondo la classica formulazione:

$$R_i = P_i \times G_i$$

- la determinazione degli eventi più temibili che si intende tenere sotto controllo,
- la stima delle conseguenze ad essi imputabili espressa con un indicatore di volta in volta adeguato a definirne i livelli di gravità,
- la costruzione "dell'albero degli eventi" inteso come combinazione di cause e/o malfunzionamenti che determinano l'evento stesso,

- la stima su base statistica delle probabilità elementari attribuibili alle cause definite dall'albero degli eventi,
- la stima della probabilità composta imputabile ad ognuno degli eventi temuti e il conseguente calcolo della magnitudo.

In questo ambito risulta determinante la capacità di previsione dell'evenienza di crisi e dei flussi transitanti in diverse condizioni di esercizio. Ciò per diversi motivi, tra cui:

- il tempo di pre-allerta è essenziale per l'attivazione in tempo utile di operazioni preventive e di mitigazione;
- la variabilità dei flussi condiziona tramite la densità veicolare i modi d'uso dell'infrastruttura influenzandone sensibilmente l'esercizio;
- l'entità dei flussi incide fortemente sulle diverse condizioni di fruizione degli impianti per la sicurezza in situazioni di panico, quali possono determinarsi in particolari condizioni.

Un altro elemento fondamentale per l'organizzazione del piano di emergenza è rappresentato dalla corretta valutazione della durata delle operazioni di soccorso necessarie a seguito dell'evento, alle quali è connesso un rischio o una non corretta funzionalità dell'impianto (rilevazione dell'evento critico da parte del sistema di preallarme; attivazione dei sistemi per la deviazione e la gestione dei flussi; arrivo delle squadre di soccorso ed inizio delle operazioni di emergenza; rimozione dei mezzi danneggiati; drenaggio della coda di veicoli; ripristino delle condizioni di normale esercizio). Ovviamente i valori attesi delle durate devono essere stimati in riferimento alle capacità e all'affidabilità del sistema di preavviso, alla distanza delle centrali operative di pubblica sicurezza e presidi sanitari, nonché alle condizioni prevedibili per lo stato della circolazione sull'intera rete che potenzialmente è sottoposta a ripercussioni. Il numero dei veicoli in coda è una variabile aleatoria che dipende simultaneamente da numerosi parametri ed in particolare dalla velocità, dal punto ove si verifica l'evento e dal tempo di reazione del sistema di preallarme che devia il traffico verso percorsi alternativi. In particolare il numero dei veicoli che formano la coda è calcolabile attraverso la seguente espressione, nella quale il primo termine rappresenta la quota parte di veicoli presenti nel tronco critico nel momento in cui avviene l'evento, mentre il secondo termine indica il numero di veicoli che interviene ad evento accaduto per effetto dell'inerzia temporale del sistema:

$$n = (l\mathbf{d} + TQ)$$

in cui n è il numero dei veicoli in coda, l è la lunghezza del tronco in crisi, \mathbf{d} è la densità veicolare che dipende dalla velocità, T è il tempo di reazione del sistema di preallarme e $Q(v)$ è la portata veicolare. In questo caso, la probabilità che n superi un valore fissato N si valuta attraverso la seguente relazione:

$$P[n \geq N] = \int \int \int_{l T v} f(l)f(T)f(v)dldTdv$$

Un procedimento del tutto analogo vale per la stima della funzione di probabilità del tempo di drenaggio delle code, che dipende ovviamente dalla lunghezza della coda, nonché per la stima della funzione di probabilità delle altre durate temporali.

5. APPLICAZIONI OPERATIVE

Al di là del caso costituito da un singolo tronco stradale, si considera a seguire il caso generale della rete. Assunto per riferimento un'origine A ed una destinazione B, considerando le reti stradali esistenti, è in generale possibile individuare una serie di N itinerari I_j con $j=1,N$, che tra loro possono essere completamente indipendenti o parzialmente coincidenti. Ciascun itinerario può essere discretizzato in M tronchi omogenei di lunghezza l_h con $h=1,M_k$ con $k=1,N$ così che l'itinerario completo I^* abbia una lunghezza $L^* = \sum_{h=1,M^*} l_h$.

La sovrapposizione di tutti gli itinerari e delle mappe di rischio consente, alla luce anche dell'entità dei flussi di traffico, di identificare l'itinerario, ovvero gli itinerari, a maggior rischio e, sull'itinerario, è possibile localizzare univocamente quei tronchi ove è presumibile si verifichino situazioni di crisi.

Questa analisi, descritta nella figura 5, è finalizzata all'individuazione delle postazioni di allerta e alla predisposizione degli itinerari alternativi ove veicolare i flussi, al fine di evitare il recapito e l'accumulo di mezzi in direzione dell'area in crisi. Infatti ciò, oltre a produrre un grave incremento del rischio e comunque forti disagi agli utenti, induce significativi problemi nella gestione della sicurezza passiva (accesso dei soccorsi, evacuazione, etc.).

Il posizionamento della segnaletica a messaggio variabile, nonché l'individuazione degli itinerari alternativi, ovvero la definizione del piano di emergenza per la protezione civile, anche per ciò che attiene l'entità dei soccorsi e il dimensionamento di eventuali presidi di sicurezza (luoghi sicuri, uscite di emergenza, etc.), è d'altra parte fortemente influenzata dalle performance del sistema di preannuncio. In particolare il parametro determinante è rappresentato dal tempo di preannuncio, ovvero dalla durata temporale che intercorre tra l'esito della previsione di rischio e l'accadimento del rischio.

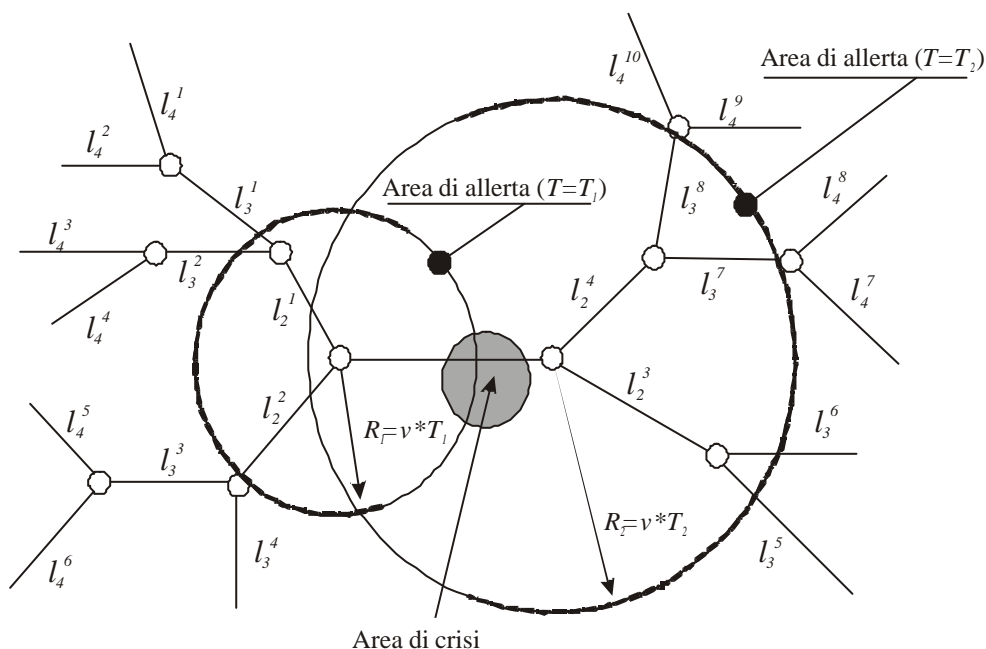


Fig. 5 – Grafo topologico della rete stradale con indicazione dell'area di crisi e degli areali di allerta al variare del tempo di preannuncio $T_2 > T_1$

Infatti, in funzione di tale parametro, variano sostanzialmente:

1. il numero di veicoli che non possono mutare itinerario e, conseguentemente, raggiungono l'area di crisi,
2. il numero di veicoli che possono cambiare itinerario dall'origine o in modo efficiente,
3. il numero di veicoli che possono cambiare itinerario benché costretti a tracciati inefficienti.

Nel seguito, affrontando il caso generale, ci riferiremo esclusivamente al numero di veicoli impossibilitati a cambiare itinerario ed ai veicoli che possono cambiarlo, indipendentemente dalla spesa economica ed in termini di tempo che ciò comporta, essendo questa una funzione di una molteplicità di fattori che devono essere approfonditi caso per caso. Le formulazioni matematiche che seguono sono da intendersi come equazioni stocastiche in cui le grandezze sono espressive del valore atteso. Un'analisi di dettaglio, già accennata discutendo il caso di un unico tronco, dovrebbe considerare per ciascuna di esse un associato modello di probabilità.

In prima istanza si supponga di disporre di un sistema di allerta e deviazione dei flussi di traffico in corrispondenza di un nodo di monte e di un nodo di valle di un tronco della rete di lunghezza l^* appartenente all'itinerario I^* , ove si localizza l'area di crisi. Si assuma inoltre una velocità media di percorrenza dell'itinerario pari a v^* ed una densità veicolare pari a d^* . La densità può essere stimata in sicurezza dal rapporto tra il traffico di progetto e la velocità media ($d^* = 0,12 \div 0,15 TGM / v^*$ in veicoli/km), ovvero, laddove fosse disponibile un sistema di rilevazione dei flussi, può essere valutata in tempo reale. Essendo T il valore atteso del tempo di preannuncio è possibile stimare il numero di veicoli che restano bloccati in direzione dell'area di crisi:

- se $T = 0$ il numero di veicoli bloccati è pari a quelli presenti nel tronco, avendo assunto che comunque l'allerta si attivi in occasione della crisi, $n = l^* d^*$;
- se $0 < T < l^* / v^*$ il numero di veicoli bloccati è pari a quelli entrati nel tronco prima della predizione del sistema di allerta, avendo assunto che l'allerta si attivi in occasione della previsione di crisi, $n = l^* d^* - T v^* d^* = (l^* - T v^*) d^*$;
- se $T > l^* / v^*$ il numero di veicoli bloccati è pari a 0.

La situazione brevemente esaminata, relativa alla localizzazione dell'allerta nei nodi a monte e a valle del tronco in crisi, benché rappresenti il caso più favorevole, poiché rende minimo il numero di veicoli coinvolti, presuppone la conoscenza preventiva, univoca ed attendibile, del sito di crisi. Ciò è in generale di difficile accertamento, assai più frequente è il caso in cui sia definibile un'area di crisi che coinvolge più tronchi e nodi stradali. In tali circostanze il modello di calcolo degli effetti, finalizzato alla messa a punto e gestione di un sistema di allerta, è più complesso per effetto della molteplicità degli itinerari connessi alla topologia della rete stessa.

Si supponga di localizzare la segnaletica a messaggio variabile ad una distanza X dall'area di crisi, tale che $X = \sum_{i=1}^J L_i$, in cui L_i è la lunghezza del tronco relativo all'area di crisi e L_J del tronco più lontano ove è posta la segnaletica di allerta. In realtà, trattandosi di una rete stradale, fatto salvo il caso di L_1 , che rappresenta un unico tronco, L_k è un vettore di lunghezze, il cui generico elemento l_k^i è rappresentativo della lunghezza del tronco i di livello k , come rappresentato in figura 5.

In questo caso, avendo definito il vettore delle densità veicolari $D_j = \{d_j^i\}$ in cui il generico elemento d_j^i rappresenta il valore atteso della densità veicolare nel tronco i al livello j , si possono calcolare i veicoli potenzialmente bloccati al variare del tempo di preannuncio T :

- se $T = 0$ il numero di veicoli bloccati è pari a:

$$l_1 d_1^1 + (l_2^1 d_2^1 + l_2^2 d_2^2 + l_2^3 d_2^3 + \dots) + (l_3^1 d_3^1 + l_3^2 d_3^2 + \dots) + \dots + (l_J^1 d_J^1 + l_J^2 d_J^2 + l_J^3 d_J^3 + \dots) = L_1 D_1 + L_2 D_2 + \dots + L_{J-1} D_{J-1} + L_J D_J$$
 che in scrittura matriciale può essere sintetizzato nel monomio \underline{LD} ;
- se $0 < T < \min \{L_j\}$ il numero dei veicoli bloccati è pari a:

$$L_1 D_1 + L_2 D_2 + \dots + L_{J-1} D_{J-1} + [l_j^1 - T v(l_j^1)] d_j^1 + [l_j^2 - T v(l_j^2)] d_j^2 + \dots$$
 in cui $v(l_j^i)$ è la velocità media dei veicoli nel tronco i di livello J ;
- se $\max \{L_{h-1}\} < T < \{L_h\}$ il numero dei veicoli bloccati è pari a:

$$L_1 D_1 + L_2 D_2 + \dots + L_{h-1} D_{h-1} + [l_h^1 - T v(l_h^1)] d_h^1 + [l_h^2 - T v(l_h^2)] d_h^2 + \dots$$
- se $T > \max \{S_{k=1,J} L_k / v_k\}$ il numero di veicoli bloccati è nullo.

In figura 6 è riportato l'andamento qualitativo del numero di veicoli bloccati al crescere del tempo di preannuncio. Come si vede tale curva ha ovviamente andamento spezzato in corrispondenza di ogni cambio di livello, e anche nell'ambito di uno stesso livello l'andamento è da assumersi spezzato in relazione alle lunghezze di ciascun tronco. Come si evince dalle precedenti equazioni la pendenza della curva dipende dalle densità veicolari ed in particolare sussiste una proporzionalità tra la norma del vettore delle densità e la pendenza di ciascun tratto: $\|tg f_h\| \sim \|D_h\|$.

In fase di progetto del sistema di gestione dell'emergenza per la protezione civile è possibile definire con un buon livello di affidabilità la funzione che rappresenta l'andamento del numero dei veicoli coinvolti da un'eventuale crisi infrastrutturale o del servizio, in funzione di differenti scenari di localizzazione dell'evento e di modalità di accadimento e al variare del tempo di preannuncio. Sulla base di tale funzione è possibile ottimizzare l'intero sistema di sicurezza attiva, basato su messaggi a segnaletica variabile, funzionali ad indirizzare i flussi su itinerari sicuri, nonché definire gli standard di funzionamento del protocollo di gestione dell'emergenza. Peraltro è possibile individuare anche fenomeni critici conseguenti all'accadimento dell'evento principale e derivati da errati indirizzi di esercizio del traffico nel transitorio dell'emergenza.

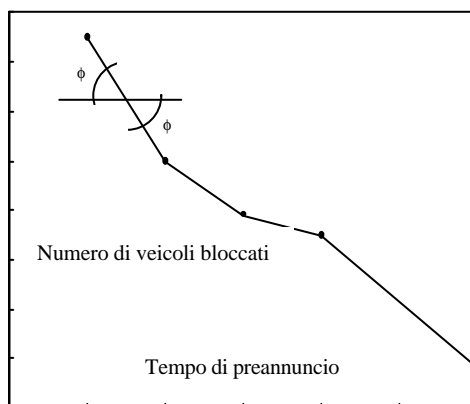


Fig. 6 - Andamento qualitativo del numero di veicoli bloccati al crescere del tempo di preannuncio

Al solo scopo esemplificativo si presentano i risultati di un'applicazione del modello proposto nell'area a nord della città di Roma, relativamente al collegamento Roma-Rieti, su cui è possibile individuare 4 itinerari principali che coincidono nell'ultimo tratto e si diversificano sostanzialmente per i primi 30 km circa.

L'estensione dei quattro itinerari e le strade interessate sono descritte in tabella:

Tab. 2 – Schematizzazione della rete nei 4 itinerari

Itinerario	Tronco 1	Tronco 2	Tronco 3	Tronco 4
I	l_1^I A1 4,5 km	l_2^I A1 13,7 km	l_3^I Raccordo A1 5 km	---
II	l_1^{II} A1 4,5 km	l_2^{II} SS4 9,7 km	l_3^I SS4 9,1 km	---
III	l_1^{III} SS3 3 km	l_2^{III} SS3 bis 16,3 km	l_3^{III} SS3 bis 3 km	l_4^{III} Raccordo A1 5 km
IV	l_1^{IV} SS3 3 km	l_2^{IV} SS3 bis 16,3 km	L_3^{IV} Str. Del Grillo 3 km	l_4^{IV} SS4 9,1 km

Per ciascun tronco l_i^j è definita la lunghezza, la velocità media di percorrenza, i flussi medi e conseguentemente la densità veicolare attesa. L'area soggetta a maggior rischio di inondazione dovuta alle piene eccezionali del Fiume Tevere può essere localizzata in una zona attraversata dall'itinerario I e IV, in corrispondenza della Strada del Grillo, ove essa sottopassa l'autostrada A1. Sono stati quindi calcolati, al variare del tempo di preannuncio il numero dei veicoli bloccati, che come si vede dal grafico decresce sensibilmente all'aumentare del tempo di preannuncio, avendo assunto di poter disporre di un completo sistema di allerta e deviazione dei flussi posizionato in ciascun nodo della rete.

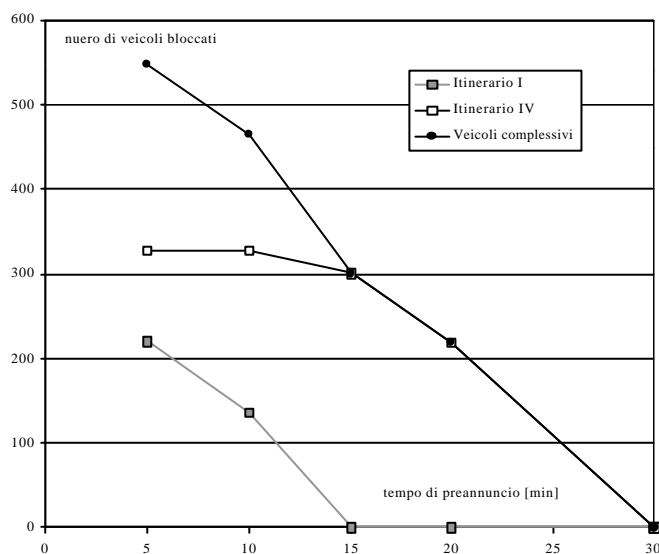


Fig. 7 – Andamento del numero di veicoli bloccati al variare del tempo di preannuncio

6. CONCLUSIONI

L'applicazione di modelli di preannuncio nell'ambito della gestione delle reti stradali in situazioni di emergenza risulta di rilevante interesse ai fini della riduzione della gravità del rischio da una parte e per la migliore gestione dei protocolli di soccorso. Peraltro si dimostra molto utile anche allo scopo di ridurre le problematiche connesse ai disagi di ampia scala che si possono ripercuotere su porzioni assai distanti dalla zona di crisi. D'altra parte, benché da un punto di vista metodologico non sussistano gravi

difficoltà di implementazione di un adeguato sistema di sicurezza basato sul preannuncio, esistono alcuni elementi di complessità relativamente all'operatività in scala reale del sistema. In particolare l'affidabilità dei modelli di preannuncio è sufficientemente assicurata solo per previsioni di breve anticipo, laddove l'anticipo necessario superi le 6 ore comincia ad essere piuttosto sensibile il numero dei falsi allarmi. Pertanto, allo stato attuale, validi sistemi di preannuncio possono essere utilizzati solo su scala regionale e comunque integrati da misure tradizionali per effettuare il controllo incrociato delle previsioni. Inoltre l'efficacia del sistema è anche condizionata dalla presenza di un monitoraggio dei flussi di traffico sulla rete, che solo raramente viene effettuato. Pertanto, al di là della pianificazione degli itinerari e della messa a punto della segnaletica a messaggio variabile per indirizzare i flussi, restano aperte alcune importanti questioni teoriche ed operative di rilievo. L'importanza di sistemi di questo tipo, alla luce delle gravi condizioni di crisi che spesso interessano alcune viabilità nel nostro paese, dovrebbe suggerire specifici approfondimenti a fronte degli enormi benefici che possono essere perseguiti, come dimostrato nel presente lavoro.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Benedetto, A. (2000), Le problematiche ambientali del rischio idrogeologico, *Documenti del Territorio*, **43**, 17-22
2. Benedetto, A., C. Cosentino (1999), Allerta per il preannuncio di piena: applicazione di un modello idrometeorologico, *Documenti del Territorio*, **41**, 46-54
3. Bolla R., G. Boni, P. La Barbera, L. Lanza, M. Marchese, S. Zappatore (1996), The tracking and prediction of high intensity rain storm, *Remote Sensing Reviews*, **14**, 151-183
4. Brath A. (1997), On the role of numerical weather prediction models in real-time flood forecasting, Proc. Intern. Ribamod Workshop on Integrated Systems for Real-Time Flood Forecasting and Warning, Monselice, Italy
5. Cosentino, C. (1999), Previsione in tempo reale del rischio idrologico, Tesi di Dottorato, Università di Roma Tre, Roma
6. Einfalt T., T. Denoeux, G. Jacquet (1990), A radar rainfall forecasting method designed for hydrogeological purposes, *Journal of Hydrology*, **114**
7. Georgakakos K.P., Bras R.L. (1984), A hydrologically useful station precipitation model. 1. Formulation, *Water Resources Research*, **20** (11)
8. Georgakakos K.P. (1986), A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting. 1. Formulation, *Water Resources Research*, **22** (13)
9. Lanza L., M. Conti (1995), Cloud tracking using satellite data for predicting the probability of heavy rainfall events in the Mediterranean area, *Survey in Geophysics*, **16**, 163-181
10. Lanza, C. (1999), Definizione di un modello di analisi della rete stradale per la gestione del rischio sismico, Tesi di laurea, Università di Roma Tre
11. Norwel, G., R. Pletan, P. Dirckx (1996), Gestion des Routes, *Route*, **291**(III)
12. Pilot, G., T. Iwasaki (1996), Réduction des effets des catastrophes naturelles, *Route*, **289** (IV)