



PROGETTO STRIT – Strumenti e Tecnologie per la gestione del Rischio delle Infrastrutture di Trasporto.

Obiettivo Realizzativo OR2

Attività 2.3

Lifelines management basato su analisi sistemica della rete viaria

Risultato RT

Sistema di supporto alle decisioni per la gestione degli interventi di riduzione della vulnerabilità delle infrastrutture viarie.

<i>Revisione</i>	<i>Data</i>	<i>Redazione</i>	<i>Convalida</i>	<i>Approvazione</i>



Contributi al Risultato D2.3

<i>Partner</i>	<i>Contributo</i>	<i>Data</i>	<i>Redazione</i>
UNINA (DiSt) 	A 2.3 (A 2.3.1, A 2.3.2, A 2.3.3, A 2.3.4)	30/09/2015	Andrea Miano, Stefano Carozza, Raffaele De Risi Fatemeh Jalayer
GEOSLAB	A 2.3	30/09/2015	Filippo Licenziati
STRESS-D' Apollonia	A 2.3	30/09/2015	
(LOGO)			



PREFAZIONE

La maggior parte dei ponti in Italia è stata costruita negli anni '60 e '70, senza specifiche disposizioni sismiche. Pertanto, c'è da attendersi che le azioni sismiche future possano seriamente danneggiare i suddetti ponti.

Dato questo contesto, è naturale che la valutazione rapida e precisa delle perdite economiche subite da una rete di infrastrutture può svolgere un ruolo cruciale nella gestione ordinaria e straordinaria di una rete di infrastrutture.

E' fondamentale sviluppare strumenti in grado di guidare la gestione sia post-emergenza che in condizioni di gestione e manutenzione ordinarie della rete di infrastrutture e che tali strumenti possano essere gestiti con facilità e velocità dagli utenti incaricati.

In particolare l'attività scientifica svolta ha avuto come obiettivo la realizzazione e l'implementazione di due sistemi di supporto decisionali (DSS) per la gestione e la manutenzione della rete stradale sia in condizioni di emergenza post-evento sismico e sia per la pianificazione delle riparazioni (manutenzione straordinaria).

SOMMARIO

PREFAZIONE	3
1 ABSTRACT	6
2 Analisi di pericolosità post-evento per una rete di infrastrutture con generazione di shakemaps	7
2.1 Approccio scenario-based per un'analisi di pericolosità sismica	7
2.2 Elaborazione di un database geospaziale per l'implementazione della legge di attenuazione di Bindi e Pacor 2011	13
2.3 Correlazione spaziale nella misura dell'intensità sismica	17
2.4 Aggiornamento dei dati sulla base delle registrazioni delle stazioni e confronto con i risultati considerando l'amplificazione locale	21
2.5 Generazione di shakemaps per un caso applicativo	22
3 Algoritmo di rete per l'analisi di affidabilità di un'infrastruttura viaria	30
3.1 Studio di connettività come metrica di prestazione sistemica della rete	30
3.2 Definizione di un modello per la determinazione dei flussi di traffico...	33
3.3 Analisi di pericolosità sismica da scenario.....	39
3.4 Valutazione della vulnerabilità	39
3.5 Affidabilità di percorso	45
3.6 Affidabilità della rete	45
3.6.1 Approccio link-set con ipotesi di indipendenza.....	47
3.6.2 Approccio frequentistico.....	47
3.6.3 Forma chiusa approssimata.....	48
3.7 Ottimizzazione multi-criteria	48
4 Implementazione di un DSS in near-real time per un esempio di gestione dell'emergenza post-evento di una rete di infrastrutture	50
4.1 Identificazione dei percorsi e delle infrastrutture coinvolte nell'area di interesse	50
4.2 Generazione di shakemaps post-evento per il portfolio di infrastrutture	51
4.3 Analisi di affidabilità della rete e processi decisionali multicriteri per prioritizzare i percorsi.....	53
4.4 Sviluppo piattaforma GIS-based con possibilità di connessione con rete AMRA per aggiornamento in near-real time	55
5 Implementazione di un DSS per la gestione, l'adeguamento e la manutenzione di una rete di infrastrutture.....	56
5.1 Analisi di PSHA simulation based	56
5.2 Modello dei costi di riparazione per stato limite	57
5.3 Modello dei costi di manutenzione ordinaria e di down time	61
5.4 Valutazione delle perdite attese per un sistema di infrastrutture	62
5.5 Processo di disaggregazione dei costi	63
5.6 Gestione di una rete di infrastrutture sulla base di un processo decisionale multicriterio.....	64
6 Interfaccia WEBGIS/DSS	66
6.1 Generalità.....	66



6.2	Interfaccia per la PGA_GENERATOR.....	68
6.3	Interfaccia per la NETWORK ANALYZER.....	74
6.4	Interfaccia per la NETWORK RELIABILITY	80
6.5	Interfaccia per la NETWORK MANAGER.....	87
7	Conclusioni	91
8	BIBLIOGRAFIA.....	93
9	Allegato A: Note tecniche per l'implementazione delle routine	95
10	Allegato B: Ricerca dei percorsi minimi	112

1 ABSTRACT

L'attività scientifica svolta ha avuto come obiettivo la realizzazione e l'implementazione di due sistemi di supporto decisionali (DSS) per la gestione e la manutenzione della rete stradale sia in condizioni di emergenza post-evento sismico e sia per la pianificazione delle riparazioni. Per la gestione post-emergenza il DSS si avvale dei risultati di due studi: la generazione di shakemaps e l'analisi di affidabilità (connettività) della rete.

Le shakemaps sono mappe di rappresentazione del livello di intensità sismica e sono ormai diventate uno strumento prezioso per gli interventi di emergenza, l'informazione pubblica, la stima delle perdite, la pianificazione degli interventi post-terremoto. Nell'ambito di tale lavoro sono state sviluppate shakemaps con riferimento ad un preciso scenario sismico, andando a combinare misure strumentali di moto sismico con le informazioni su velocità di trasmissione delle onde di taglio, posizione dell'epicentro e magnitudo del terremoto al fine di stimare le variazioni di moto su tutta un'area geografica. In particolare, a partire dall'implementazione di una legge di attenuazione del moto sismico su una determinata area geografica, i campi di PGA ottenuti sono stati aggiornati sulla base dei dati reali provenienti dalle misure di intensità sismica provenienti dalle registrazioni delle stazioni accelerometriche. Inoltre si è considerata la correlazione spaziale, sia con riferimento alla correlazione di tipo inter-evento, che con riferimento a quella di tipo intra-evento. Attraverso un processo di simulazione, si è reso possibile generare un elevato numero di simulazioni dei campi di intensità sismica in maniera immediata per un dato scenario, sviluppando così uno strumento che consente una rapida valutazione della pericolosità sismica relativa ad un'area geografica.

Per quanto riguarda l'affidabilità della rete, a partire dai risultati ottenuti attraverso la generazione di shakemaps per le infrastrutture interessate, essa è stata studiata sia in termini di connettività tra differenti punti della rete (possibilità di individuare percorsi che consentono il collegamento anche in seguito ad eventi sismici) sia in termini di analisi sistemica esprimendone la probabilità di connessione e l'indice di affidabilità. Le considerazioni affidabilistiche sono fatte sia considerando singoli percorsi come sistemi di in serie di componenti (archi stradale ed infrastrutture), sia considerando un macrosistema di percorsi alternativi misti in serie e parallelo. Sono stati formulati metodi di risoluzione approssimata del problema affidabilistico con tempi computazionali compatibili con le esigenze dettate dalla condizione di post-emergenza. Attraverso poi, un sistema di ottimizzazione che tiene conto di differenti criteri (tempi di percorrenza, affidabilità del percorso e della rete, categoria stradale, informazioni sul flusso di traffico) è possibile pervenire ad una scelta ottimizzata dei percorsi da intraprendere per le operazioni di post-emergenza.

Il sistema di supporto decisionale per la gestione degli interventi post-terremoto, invece, ha come obiettivo individuare le infrastrutture stradali maggiormente vulnerabili dal punto di vista sismico e determinare per le stesse dei criteri di prioritizzazione per la gestione della manutenzione in larga scala.

In particolare nel secondo capitolo viene presentata un'analisi di pericolosità post-evento per una rete di infrastrutture con generazione di shakemaps.

Nel terzo capitolo viene spiegata la procedura per la generazione di un algoritmo di rete per l'analisi di affidabilità di una infrastruttura viaria.

Nel quarto capitolo è esposta l'implementazione di un DSS in near-real time per un esempio di gestione dell'emergenza post-evento di una rete di infrastrutture.

Infine nel quinto capitolo è presentata l'implementazione di un DSS per la gestione, l'adeguamento e la manutenzione di una rete di infrastrutture dopo un evento sismico.

2 Analisi di pericolosità post-evento per una rete di infrastrutture con generazione di shakemaps

Con il seguente lavoro è stato sviluppato uno strumento in grado di svolgere un ruolo determinante nella gestione delle emergenze legate ai terremoti. Tale strumento consente una precisa e rapida valutazione delle mappe di pericolosità sismica attese per un sistema di infrastrutture sulla base di un prescelto terremoto di scenario.

Nel pianificare e coordinare interventi di emergenza, gli enti locali e le diverse organizzazioni coinvolte sono interessati ad effettuare simulazioni di eventi sismici realistici che presentino la maggiore probabilità di verificarsi in termini di magnitudo e distanza. Le mappe di scenario, possono essere utilizzate per esaminare le perdite attese per le strutture o infrastrutture, esposte a specifici terremoti potenziali.

Tale procedura, sviluppata nel caso in esame per un terremoto del passato, può essere, in maniera pressochè istantanea, implementata per un qualsiasi terremoto futuro, in modo da produrre una mappatura della pericolosità sismica immediata e facilmente consultabile e gestibile.

Infatti gli scenari di terremoto sono parte integrante della pianificazione di risposta alle emergenze. Ad esempio, in California meridionale, il sistema ShakeMap, di cui ci si occuperà in seguito, consente, già da diverso tempo, questo tipo di attività.

Nello specifico, a partire dalla creazione di un database geo-spaziale che consiste in una serie di dati di input che hanno consentito l'implementazione di una legge di attenuazione (dove, in particolare, tali dati consistono in una carta geologica della Campania, nella definizione di un evento sismico di scenario (terremoto dell'Irpinia del 1980 di magnitudo $M=6.9$), nella posizione e nella tipologia della faglia in esame nonché nella posizione degli epicentri per il suddetto evento sismico), è stato possibile implementare la legge di attenuazione di Bindi, Pacor et al. (2011) e generare campi di PGA sulla base dello scenario in esame.

2.1 Approccio scenario-based per un'analisi di pericolosità sismica

L'approccio di valutazione della pericolosità sismica basato su uno scenario di terremoto può essere inquadrato nell'ambito degli approcci di tipo deterministico.

Come descritto in Faccioli and Paolucci (2005), tali approcci risultano, in genere, principalmente adatti per due classi di problemi. In primo luogo, nella trattazione di problemi per i quali il periodo di ritorno del terremoto di riferimento sia talmente lungo da rendere poco affidabile l'analisi probabilistica. E' questo il caso della verifica sismica o del progetto di strutture "strategiche", quali importanti infrastrutture o monumenti, per le quali risulta più opportuno considerare il moto del suolo dovuto o al più violento terremoto risentito storicamente al sito, oppure a quel terremoto che, sulla base di indizi geologici e sismo-tettonici, possa credibilmente verificarsi entro un lasso di tempo sufficientemente esteso, influenzando il sito in questione.

Un esempio di questo tipo di approccio è lo studio per la definizione del terremoto di verifica per le analisi sulla Torre di Pisa, articolatosi nelle seguenti fasi:

- individuazione di una ripetizione del terremoto della Garfagnana del 7 Settembre 1920 ($M_L=6.5$, $R=56$ km a Nord di Pisa) come terremoto di scenario;
- definizione dei parametri sismologici del terremoto di scenario;
- simulazione numerica deterministica della propagazione ondosa dalla sorgente sismica al sito, in un intervallo di frequenze tra 0 e 2 Hz;

- simulazione numerica stocastica, per frequenze superiori a 2 Hz, per rappresentare la natura parzialmente “caotica” del moto sismico alle alte frequenze, facendo uso del metodo delle “funzioni di Green empiriche”;
- sovrapposizione delle due soluzioni per definire il moto sismico al sito della Torre di Pisa.

Una seconda classe di problemi in cui trovano ampio spazio approcci deterministici alla definizione del moto sismico atteso riguarda gli studi per la costruzione di scenari di rischio su scala regionale o per grandi agglomerati urbani. In questo caso non è generalmente richiesta la determinazione della storia temporale del moto sismico, ma è sufficiente la sua rappresentazione mediante idonei parametri di picco, tipicamente a_{max} o V_{max} a seconda del tipo di applicazione, ottenibili in maniera semplice con opportune relazioni di attenuazione.

Per questo tipo di applicazioni è, invece, assolutamente fondamentale la disponibilità di una base di dati geologici e geotecnici sufficientemente ampia, organizzata tipicamente mediante sistemi informativi geografici (GIS), e distribuita geograficamente in modo tale da coprire in modo sufficiente l’area da studiare.

Un esempio significativo di questo tipo di studi è relativo alla determinazione di scenari di rischio sismico nell’area urbana di Catania, compiuto nell’ambito di un progetto finanziato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.

Tralasciando la parte relativa alla determinazione della vulnerabilità degli edifici, e, dunque, più propriamente alla valutazione degli scenari di rischio, si riassumono, con riferimento alla Figura 1, i sette punti ritenuti fondamentali nello studio per la costruzione di scenari deterministici di pericolosità sismica a Catania:

- determinazione del contesto sismo-tettonico;
- individuazione di due terremoti di scenario, rappresentativi di diversi livelli di scuotimento, in particolare il grande terremoto del 1693 (Magnitudo stimata 7.3), probabilmente originato da una rottura sulla faglia Ibleo-maltese (Figura 1a) ed il terremoto del 1818 (Magnitudo stimata 6.2), plausibilmente originato da una rottura su una faglia locale nell’area etnea;
- costruzione di una base di dati dettagliata sulla geologia locale e sulle proprietà geotecniche dedotte da sondaggi disponibili (Figura 1b);
- organizzazione dell’informazione in un sistema informativo geografico come GIS;
- definizione di una mappa della velocità di propagazione delle onde di taglio $V_{s,30}$ (Figura 1c);
- impiego di opportune relazioni di attenuazione, con fattori di sito calibrati sulla base della distribuzione delle $V_{s,30}$;
- generazione su GIS della mappa di scuotimento del suolo in termini di a_{max} in occasione del terremoto di scenario (Figura 1d).

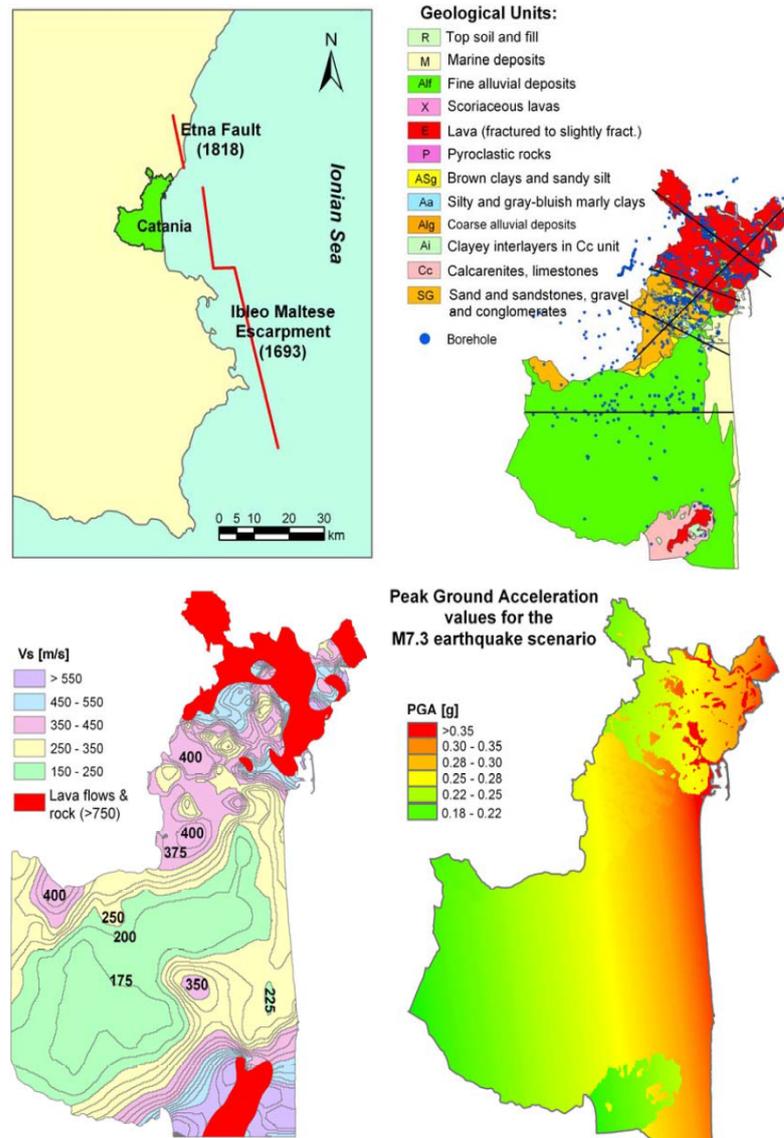


Figura 1: Fasi della costruzione di uno scenario deterministico di pericolosità sismica nell'area urbana di Catania (da Faccioli e Pessina (2000)): a) identificazione delle faglie che hanno probabilmente generato i terremoti di scenario; b) raccolta di informazioni geologico-geotecniche ed organizzazione in un GIS; c) distribuzione spaziale delle $V_{s,30}$; d) mappa di scuotimento del suolo in termini di accelerazione massima del suolo, prevista per una ripetizione del terremoto del 1693.

Nel pianificare e coordinare interventi di emergenza, gli enti locali e le altre organizzazioni coinvolte sono interessati ad effettuare simulazioni di eventi basati su situazioni realistiche inerenti ai terremoti con la maggiore probabilità di verificarsi. Il sistema delle shakemaps può essere utilizzato per mappare i moti sismici del suolo per scenari di terremoto così come se fossero dati reali. A tal proposito, si sottolinea che le shakemaps sono mappe di rappresentazione del livello di intensità sismica, generate rapidamente ed automaticamente, che combinano misure strumentali di moto sismico con le informazioni su geologia locale, posizione dell'epicentro e magnitudo del terremoto al fine di stimare le variazioni di moto su tutta un'area geografica. I risultati sono rapidamente disponibili via Web attraverso una varietà di formati di mappe, tra cui quelli legati al Geographic Information System (GIS). Le mappe di scenario possono essere utilizzate per

esaminare l'esposizione di strutture, infrastrutture e condotti di trasporto a specifici terremoti potenziali. Le pagine web "ShakeMap" visualizzano scenari di terremoto selezionati e risulta sempre possibile aggiungere altri eventi, qualora siano richiesti.

Come descritto in (Wald (2005)) e Jaiswal and Wald (2010), gli scenari di terremoto sono parte integrante della pianificazione di risposta alle emergenze, ad esempio in California meridionale dove il sistema delle shakemaps è in vigore da più tempo. Gli utenti primari includono città, contea, stato e agenzie governative federali (ad esempio, l'Ufficio della California dei servizi di emergenza ,FEMA, il Corpo degli Ingegneri dell'Esercito) e progettisti e manager per le utilità pubbliche e private, le imprese e le altre grandi organizzazioni di risposta di emergenza. Gli scenari sono particolarmente utili nella pianificazione e nell'esercitazione, in combinazione con i sistemi di stima della perdita come HAZUS e come lo strumento di valutazione dei danni precoce post-terremoto (EPEDAT), che forniscono stime basate su scenari di impatti sociali ed economici.

Un beneficio inaspettato, ma molto utile della generazione di scenari è la familiarità propria del personale incaricato delle operazioni per la produzione delle shakemaps. Attraverso la generazione di molti grandi eventi, un certo numero di configurazioni di shakemaps sono regolate e raffinate, favorendo in questo modo una risposta più efficace a terremoti reali. Ancora una volta, questo è uno degli obiettivi fondamentali nella creazione di scenari: pianificare ed essere pronti per i terremoti dannosi con una risposta pronta ed efficace.

In questa sezione si descrivono le procedure per la generazione e la standardizzazione delle shakemaps degli scenari di terremoto, ponendo l'accento sulle differenze rispetto a eventi reali per cui le mappe vengono attivate automaticamente e vincolate alle osservazioni dei moti sismici del suolo.

Dato un evento selezionato, si sono sviluppati strumenti per rendere relativamente facile generare una shakemap di uno scenario di terremoto, utilizzando i seguenti passi:

- 1) assumere una particolare faglia o segmento di faglia dove avviene la rottura per una certa lunghezza e con una certa magnitudo;
- 2) stimare gli scuotimenti sismici del suolo in tutte le sedi su un'area prescelta circostante la faglia;
- 3) rappresentare questi moti visivamente, producendo shakemaps e generando input di moti sismici del suolo per la modellazione della stima del danno (ad esempio, HAZUS di FEMA).

Allo stato attuale, i moti sismici del suolo sono stimati utilizzando le relazioni empiriche di attenuazione per la stima dei valori di intensità di picco al suolo. Si deve poi correggere l'intensità nei vari punti, sulla base delle condizioni locali del suolo del sito come è possibile fare in regime di interpolazione generale nelle shakemaps. La geometria precisa della faglia è inclusa esplicitamente, ma le direzioni di rottura entrano solo attraverso le relazioni empiriche.

L'approccio utilizzato è semplice e approssimativo. Si rappresenta la geometria precisa della faglia, misurando la distanza dalla proiezione in superficie della faglia stessa (la definizione di distanza di Joyner e Boore), ma nel caso di default non si considera la direzione della rottura né si modificano le intensità di punta con un termine legato alle direzioni di rottura. Le geometrie di faglia sono specificate con un file di faglia che rappresenta la traccia in superficie della faglia o la proiezione in superficie della faglia stessa. In entrambi i casi, l'espressione superficiale della rottura viene visualizzata sulla mappa come mostrato nella figura successiva.

Con questo approccio, la posizione dell'epicentro del terremoto non ha alcun effetto sui risultati; solo la posizione e le dimensioni della faglia contano. Se si dovessero aggiungere le direzioni di rottura ai calcoli, diverse scelte di localizzazione epicentrale si tradurrebbero in significativi

cambiamenti dei valori risultanti per lo stesso terremoto di uguale magnitudo e segmento di faglia. Piuttosto, l'approccio prescelto è quello di mostrare l'effetto medio, poiché è difficile giustificare una particolare scelta di ipocentro e mostrare i risultati di ogni possibile posizione ipocentrale. L'approccio predittivo empirico inoltre fornisce valori medi di picco dei moti sismici del suolo in modo da non tener in conto di tutta la variabilità attesa. Le osservazioni di eventi reali mostrano una significativa variabilità in funzione della distanza, magnitudo, condizione del sito e, di conseguenza, lo scenario dei moti del suolo è più uniforme di quanto ci si aspetterebbe per un vero e proprio terremoto. Le variazioni sono in parte attribuibili alla propagazione 2D e 3D delle onde, ad effetti di percorso (come l'amplificazione di bordo), alle differenze di movimenti tra i terremoti della stessa entità e ad effetti di sito complessi non analizzabili con la metodologia prestabilita per la generazione delle shakemaps.

Come esempio dell'efficacia del processo di generazione di scenario, la figura successiva mostra sia la shakemap "osservata" per il terremoto di Northridge 1994 (a sinistra), sia una shakemap "stimata" di scenario (a destra), calcolata con le stesse informazioni riguardo la sorgente del terremoto, assunte nei calcoli tipici di scenario: la magnitudo e la geometria della faglia. In questo caso le dimensioni della rottura Northridge sono note da analisi della sorgente del terremoto.

Nelle shakemaps di scenario attuali non sono esplicitamente inclusi gli effetti della direzione di rottura, che hanno mostrato la presenza di una concentrazione di energia e di uno scuotimento maggiore lontano dall'ipocentro e nella direzione in cui progredisce la rottura della faglia. Nella figura, lo scuotimento osservato dal terremoto di Northridge (a sinistra) ha più energia nella regione nord-ovest dell'epicentro rispetto alla versione di scenario (a destra). Ciò è dovuto al fatto che il terremoto era effettivamente esposto a una direzione di rottura nella zona nord-ovest, mentre la shakemap include questo solo in senso medio delle previsioni per lo scenario. Tuttavia, la maggior parte del modello di moto del suolo viene ottenuta solo conoscendo le dimensioni della faglia di rottura.

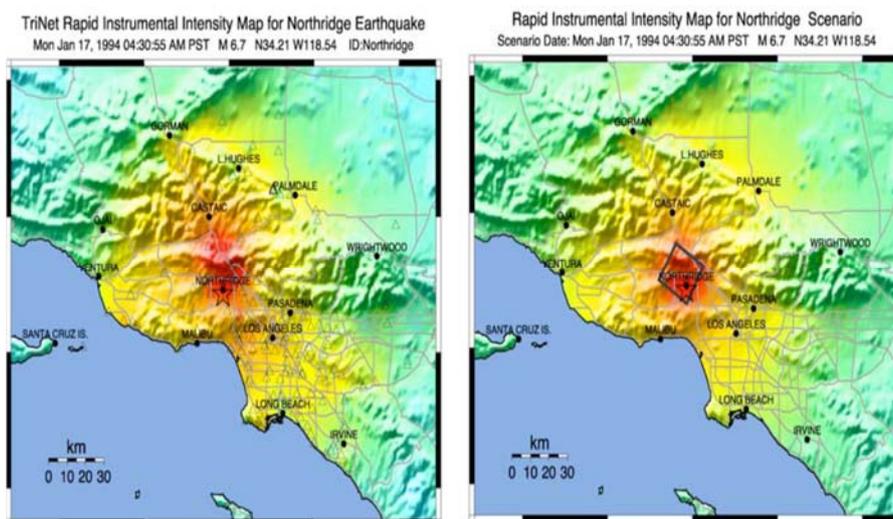


Figura 2: Shake map per il terremoto di Northridge (sinistra) e scenario di terremoto per lo stesso evento (destra)

La US Geological Survey ha valutato la pericolosità probabilistica da faglie attive negli Stati Uniti per il progetto di mappatura della pericolosità sismica nazionale. In queste mappe è possibile dare

priorità ai migliori scenari di terremoti da utilizzare in esercizi di pianificazione, considerando le faglie che possono generare per prime i terremoti e così via.

Tale analisi viene facilmente realizzata in combinazione con la disaggregazione della pericolosità, in cui sono classificati i contributi dei singoli terremoti al rischio sismico totale, la loro probabilità di accadimento condizionata l'intensità dei moti sismici del suolo. Usando le singoli componenti ("deaggregations") di queste mappe di pericolosità, un utente può selezionare correttamente gli scenari del caso, data la loro ubicazione, estensione regionale e requisiti progettuali specifici.

In California, il Geological Survey California (CGS) e le USGS hanno valutato il rischio probabilistico da faglie attive nello stato, come parte della valutazione probabilistica di pericolosità sismica per lo Stato della California e del "National Seismic Hazard Mapping Project". Attualmente, gli eventi di scenario di shakemaps provengono direttamente dal catalogo CGS di parametri della faglia sorgente, che compongono la valutazione della pericolosità sismica probabilistica in tutto lo stato.

Gli scenari di terremoti sono di interesse fondamentale per un pubblico scientifico interessato alla natura dei terremoti sulla base dell'esperienza basata sugli eventi sismici del passato, nonché ai possibili effetti dovuti alla rottura su faglie note in futuro. Inoltre, un'analisi più dettagliata e accurata dei termini presenti nelle storie dei moti sismici della terra (sismogrammi), prodotte da tali terremoti di scenario, è di grande beneficio per le considerazioni di ingegneria sismica. Gli ingegneri richiedono i moti sismici per specifici siti per la dettagliata analisi della risposta strutturale delle strutture esistenti e future, progettate sulla base di specificati livelli di prestazione. Come obiettivo futuro, si auspica che tali scenari siano in grado anche di produrre storie temporali sintetiche di moti sismici che includano effetti dovuti alle direzioni di rottura.

Un esempio di un terremoto di scenario, rappresentato da una shakemap, è mostrato nella figura successiva per un ipotetico terremoto di magnitudo 6,9 relativo alla faglia di Newport-Inglewood vicino Los Angeles.

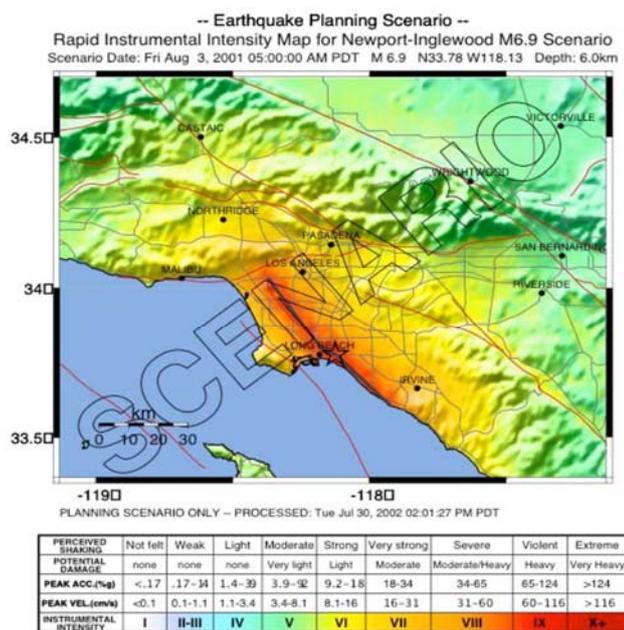


Figura 3: Esempio di scenario di terremoto per un'ipotetica magnitudo di 6.9 sulla faglia New Port-Inglewood vicino Los Angeles.

A causa della vicinanza alle regioni popolate di Los Angeles, questo scenario rappresenta uno dei terremoti più distruttivi che potrebbero interessare la regione. L'US Army Corp of Engineers ha recentemente utilizzato un evento simile a questo per generare uno scenario con il quale è stato possibile valutare la capacità di rispondere a un tale disastro e di continuare a migliorare la risposta in collaborazione con tutti gli enti coinvolti.

L' USGS ha, attualmente, in programma uno sforzo concertato per promuovere l'uso di shakemaps di scenari di terremoto per tutte le regioni degli Stati Uniti.

2.2 Elaborazione di un database geospaziale per l'implementazione della legge di attenuazione di Bindi e Pacor 2011

E' importante in questo contesto dare delle definizioni preliminari dei principali parametri che hanno reso possibile la caratterizzazione della pericolosità sismica per le infrastrutture in esame.

In particolare è utile definire e contestualizzare accuratamente l'insieme di tutti i parametri che definiscono il database geo-spaziale, necessario per poter implementare le leggi di attenuazione di interesse, nel caso in esame quella di Bindi, Pacor et al. (2011).

Si parte dalle definizioni di base quali epicentro, ipocentro e faglia per poi approfondire i concetti di distanza epicentrale e di distanza "Joyner-Boore"; infine si esegue una classificazione delle tipologie di suolo, secondo le normative vigenti.

Per epicentro (dal Greco: επίκεντρον) si intende quel punto della superficie terrestre posto esattamente sulla verticale condotta dall'ipocentro (che è il punto nel quale ha avuto origine il terremoto al di sotto della crosta terrestre). È l'epicentro il luogo dove il terremoto causa i danni maggiori.

L'ipocentro (o fuoco) è il punto all'interno della Terra dove inizia a propagarsi la frattura che origina un terremoto. L'ipocentro si trova immediatamente sotto l'epicentro e la distanza tra epicentro e ipocentro è detta profondità focale.

La linea di faglia (o semplicemente faglia) è una frattura (planare o non planare) della roccia che mostra evidenze di movimento relativo tra le due masse rocciose da essa divise. La superficie lungo cui si è verificata la frattura si chiama superficie di faglia oppure piano di faglia, o anche specchio di faglia. Le rocce in prossimità di una faglia risultano spesso intensamente frantumate e si parla in questo caso di rocce di faglia quali le cataclasiti o le miloniti.

Il piano di faglia può formare, rispetto al piano orizzontale, angoli variabili da 0° (sovrascorrimenti) a 90° (faglie trascorrenti).

Spesso in natura è possibile rilevare faglie con movimenti complessi risultanti da uno spostamento sia verticale che orizzontale. La componente verticale e orizzontale della dislocazione, ricavabile ad esempio da marcatori stratigrafici, è detta rigetto (rispettivamente verticale e orizzontale).

Per la classificazione delle faglie dirette e inverse è utile definire il concetto di tetto e di letto o muro. Il primo è la massa rocciosa sovrastante il piano di faglia, il secondo quella sottostante al piano stesso. A tal punto si possono identificare:

faglie trascorrenti: una faglia si dice trascorrente se il piano è verticale o obliquo con spostamento orizzontale relativo delle masse rocciose. Tali faglie sono distinte in destre o sinistre; il senso è determinabile ponendosi sulla linea di faglia e osservando il senso della dislocazione del blocco roccioso che si ha di fronte. Un esempio di questo tipo di faglia è la famosissima faglia di Sant'Andrea.

faglie dirette o normali: una faglia si dice diretta quando il tetto scende rispetto al muro. In questo caso il settore di crosta terrestre è interessato da un regime tettonico distensivo o divergente. Solitamente tali faglie presentano un piano avente inclinazione elevata, attorno ai 60°.

faglie inverse: una faglia si dice inversa se il tetto sale rispetto al muro. In questo caso il settore di crosta risulta raccorciato a causa di un campo di stress tettonico compressivo. Gli angoli del piano di faglia sono piuttosto bassi (attorno ai 30°). Nel caso di angoli molto bassi o nulli si parla di sovrascorrimenti.

Se un sisma si verifica su una faglia non nota ovvero che non raggiunge la superficie si parla di faglia cieca.

Una parentesi fondamentale va ora fatta per identificare la differenza tra distanza epicentrale e distanza "Joyner-Boore", in quanto sono proprio queste due distanze ad entrare in gioco nelle formulazioni delle leggi di attenuazione, di cui si parlerà in seguito.

Mentre la distanza epicentrale è semplicemente la distanza tra l'epicentro dell'evento sismico ed il punto preso in considerazione, la distanza "Joyner-Boore" corrisponde alla distanza dal punto più vicino della proiezione in superficie della faglia.

Per quanto riguarda poi la classificazione delle tipologie di sottosuolo, le NTC 2008, al paragrafo 3.2.2, identificano le principali cinque categorie possibili:

- A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m;
- B Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $NSPT_{,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina);
- C Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina);
- D Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $NSPT_{,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina);
- E Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Un approfondimento va fatto sulle leggi di attenuazione necessarie per sviluppare le procedure solo accennate in precedenza. I dati delle registrazioni sismiche italiane sono stati usati per studiare l'attenuazione della risposta sismica sul territorio, considerando come variabili principali la distanza, la magnitudo e le condizioni di locali di sito.

In particolare ci si riferisce alla formulazione della legge di attenuazione che è stata utilizzata nell'ambito del presente lavoro, ossia quella di Bindi, Pacor et al. (2011).

Nell'ambito del loro lavoro, gli autori hanno presentato un insieme di equazioni di predizione del moto del suolo (GMPEs), derivate per la media geometrica delle componenti orizzontali e di quella verticale, considerando l'ultima versione del database di moti sismici per l'Italia. Le regressioni sono state eseguite per una magnitudo variabile tra 4 e 6.9 e considerando distanze fino a 200 km dall'epicentro. Le equazioni sono state derivate per l'accelerazione di picco al suolo (PGA), per la

velocità di picco al suolo (PGV) e per l'accelerazione spettrale (con smorzamento del 5%), per periodi tra 0.04 e 2s. La deviazione standard totale (sigma) riscontrata è variata tra 0,34 e 0,38 log10, confermando la grande variabilità dei parametri del moto sismico, quando vengono usati insieme di dati regionali contenenti eventi di magnitudo moderata ($M < 6$). La variabilità tra stazioni nell'ambito di un evento ha fornito i valori più grandi per periodi più brevi di 0,2s, mentre, per periodi più lunghi, le distribuzioni di errore tra-eventi e tra-stazioni nell'ambito dello stesso evento hanno fornito un contributo simile alla variabilità totale.

Per quanto riguarda il database, una prima selezione è stata effettuata da tutta la banca dati ITACA prendendo in considerazione solo le magnitudo maggiori di 4, le distanze epicentrali minori di 200 km e le profondità ipocentrali oltre i 35 km. Applicando questi criteri, sono state selezionate 1213 registrazioni da 218 terremoti e 353 stazioni. La dispersione della magnitudo in funzione della distanza della dispersione è mostrata nella figura seguente. E' da notare che la magnitudo locale (MI, simboli magenta in figura) è l'unica stimata e disponibile per la maggior parte degli eventi con grandezza inferiore a 4,5, come quantificato dall'istogramma nel pannello di destra della figura 4. Inoltre, un numero significativo di stazioni hanno registrato solo un terremoto. Un'ulteriore selezione è stata eseguita rimuovendo i terremoti in cui manca la stima della magnitudo momento, quelli registrati da una sola stazione e le stazioni con una sola registrazione. Complessivamente, sono state selezionate 769 registrazioni pertinenti a 99 terremoti e 150 stazioni per aggiornare i GMPEs per l'Italia, nel range di magnitudo $4,1 \leq M_w \leq 6,9$.

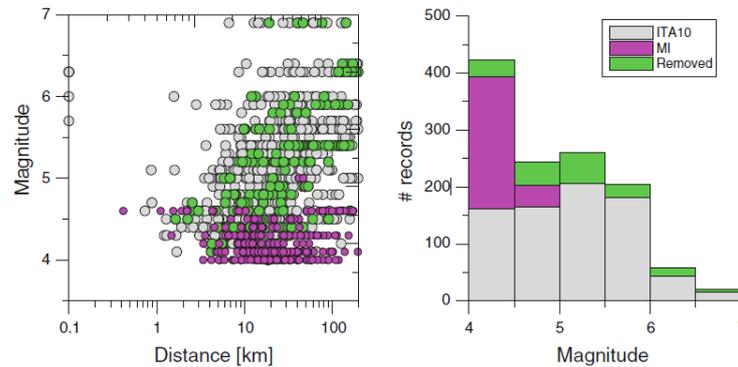


Figura 4: ITACA: database per eventi con $M > 4$. A sinistra relazione magnitudo-distanza; a destra istogramma delle registrazioni.

L'equazione utilizzata per la regressione è simile a quella del modello adottato da Boore and Atkinson (2008), anche se viene utilizzata una classificazione diversa dei siti. La forma funzionale proposta è la seguente:

$$\log_{10} Y = e_1 + F_D(R, M) + F_M(M) + F_s + F_{sof} \quad 1$$

dove e_1 è il termine costante, $F_D(R, M)$, $F_M(M)$, F_s e F_{sof} rappresentano, rispettivamente, la funzione della distanza, la scala della magnitudo, l'amplificazione legata al sito e la correzione legata al tipo di fagliazione.

M è la magnitudine momento, mentre R è la distanza ottenuta dal modello Joyner-Boore oppure la distanza epicentrale (in km), quando la geometria della faglia è sconosciuta (generalmente quando $M < 5.5$).

I parametri di intensità sismica Y considerati per le regressioni sono l'accelerazione di picco al suolo (PGA, in cm/s^2), la velocità di picco al suolo (PGV, cm/s), l'accelerazione assoluta col 5% di

smorzamento e gli spettri di risposta (S_a , cm/s^2) per un intervallo del periodo 0,04-2s. L'equazione proposta per la funzione della distanza è :

$$F_D(R; M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \log_{10}(\sqrt{R_{jB}^2 + h^2 / R_{ref}}) - c_3(\sqrt{R_{jB}^2 + h^2 / R_{ref}}) \quad 2$$

mentre la funzione magnitudo è:

$$F_M(M) = b_1(M - M_h) + b_2(M - M_h)^2 \quad \text{per } M \leq M_h$$

$$F_M(M) = b_3(M - M_h) \quad \text{per } M > M_h$$

3

dove M_{ref} , M_h , R_{ref} sono coefficienti da determinare attraverso l'analisi sismica. Diversamente dal modello utilizzato per sviluppare ITA08, $F_D(R, M)$ include un termine linearmente decrescente con la distanza (attenuazione anelastica) e $F_M(M)$ considera la magnitudo M_h .

La forma funzionale F_s dell'Eq. 1 rappresenta l'amplificazione dovuta al sito ed è data da $F_s = s_j C_j$, per $j=1, \dots, 5$, dove s_j sono i coefficienti da determinarsi attraverso l'analisi di regressione, mentre C_j sono le variabili utilizzate per indicare le cinque diverse classi di sito dall'EC8 (AEC8 attraverso EEC8).

La forma funzionale F_{sof} rappresenta la correzione legata al tipo di fagliazione ed è data da $F_{sof} = f_j E_j$, per $j=1, \dots, 4$, dove f_j sono i coefficienti da determinare durante l'analisi, mentre E_j sono le variabili usate per denotare le diverse classi di fagliazione. In particolare, come già visto in precedenza, si sono considerati 4 tipi meccanismi di fagliazione: normali (N), reversi (R), trascorrenti(SS), sconosciuti (U).

Dopo alcune prove di regressione e dopo l'esperienza di Boore and Atkinson (2008), sono state fissate le seguenti variabili: $R_{ref}=1\text{km}$; $M_{ref}=5$; $M_h=6.75$; $b_3=0$. Le regressioni sono state eseguite applicando un approccio di effetto casuale. In accordo con le GMPEs recentemente sviluppate per l'Europa e la Turchia, le regressioni sono state sviluppate considerando la media geometrica delle componenti orizzontali registrate (dette GeoH), mentre ITA08 è derivato considerando il massimo tra le componenti orizzontali. Inoltre, le regressioni per la componente verticale (detta Z) sono state eseguite in maniera pura. Ogni regressione è stata eseguita due volte: nella prima, le componenti di variabilità tra eventi ed all'interno dello stesso evento sono state separate, mentre nella seconda sono state determinate le componenti di variabilità tra stazioni e all'interno della stessa stazione.

E' possibile diversificare il termine legato all'amplificazione locale, presente nella trattazione appena analizzata, come spiegato in (Landolfi, Caccavale et al. 2011). Infatti le relazioni non lineari che descrivono l'amplificazione indotta dagli effetti di sito sono ingredienti fondamentali per ottenere mappe di pericolosità sismica affidabili per le situazioni di emergenza. Nello studio di Landolfi, Caccavale et al. (2011) gli effetti di sito sono stati valutati attraverso un fattore di amplificazione stratigrafico, SS, che si può moltiplicare direttamente per l'accelerazione di picco di riferimento, al fine di avere il valore amplificato in superficie. Alla base della determinazione di tale fattore di amplificazione stratigrafico, c'è lo studio di registrazioni accelerometriche significative selezionate dalla rete italiana e dei profili di sottosuolo di diverse stazioni, classificati secondo i criteri specificati dal Codice Tecnico Nazionale (NTC,2008). Una prima serie di fattori di amplificazione sperimentali è stata calcolata, selezionando le stazioni su terreno deformabile per cui esiste un record dello stesso evento anche in una stazione vicina su suolo rigido. Un secondo insieme di dati semi-empirici è stato ottenuto analizzando accelerogrammi in siti in cui il sottosuolo è stato adeguatamente caratterizzato: i moti del terreno registrati sono stati de-convoluti fino al suolo rigido, permettendo di determinare il moto di riferimento. Una terza serie di dati riguarda la

risposta proveniente da analisi eseguite sui profili stratigrafici "virtuali", in linea con la classificazione dei suoli delle NTC (2008), sottoposti alle storie temporali di accelerazione registrate da quelle stazioni italiane classificate come suoli rigidi. Per ogni categoria di sottosuolo, le tre serie di dati sono stati combinati e interpretati per ottenere una semplice relazione tra il fattore di amplificazione stratigrafica, SS , e l'amplificazione del moto rispetto al suolo rigido. Tali relazioni hanno la seguente forma:

$$S_s = a * PGA_r^b \quad 4$$

Dove a e b sono coefficienti dipendenti dal tipo di suolo e PGA_r è la PGA su suolo rigido.

2.3 Correlazione spaziale nella misura dell'intensità sismica

La valutazione probabilistica delle misure di intensità del moto del suolo (IM, come ad esempio l'accelerazione di picco al suolo) per un singolo sito è una pratica standard. Meno attenzione è stata dedicata alla stima della dipendenza statistica di IM per un singolo evento da più siti, a causa di una sorgente comune, di percorsi delle onde sismiche comuni e di una distanza simile dalla faglia.

Si può esplorare la correlazione sito-sito per il calcolo del valore di IM e si può dimostrare che il suo utilizzo nella valutazione della pericolosità sismica e della stima della perdita risulta fondamentale. L'uso di una funzione di correlazione spaziale può essere mostrato in varie applicazioni, come ad esempio la valutazione degli effetti del campo di modellazione spazialmente correlata del moto sismico del suolo sulle stime di perdita per strutture con diversi modelli di spaziatura oppure la simulazione di una shakemap di "Geological Survey" (USGS), coerente sia con i valori di IM registrati in ogni stazione che con la correlazione IM per la struttura in esame.

Come in Park, Bazzurro et al. (2007), la valutazione probabilistica delle misure di intensità del moto sismico del suolo, IMs (ad esempio, l'accelerazione di picco al suolo o quelle spettrali), per un singolo sito, si basa sulla conoscenza della magnitudo del terremoto, della distanza da sorgente a sito e delle condizioni del terreno locali; essa risulta essere una pratica standard iniziata alla fine del 1960. Come detto, molta meno attenzione è stata dedicata, invece, alla stima della dipendenza statistica del parametro del moto sismico IM per un singolo evento da più siti. Nel seguito viene mostrato come colmare questa lacuna e si esplorano gli effetti di correlazione sito-sito, per quel che riguarda il parametro del moto sismico IMs, in modo più approfondito.

Si intende, in ogni caso, sottolineare in maniera chiara come l'utilizzo di tale correlazione nella stima della perdita sismica per strutture spazialmente estese sia un esercizio di fondamentale importanza.

In generale, tre effetti contribuiscono alla correlazione delle misure di IM in due siti:

- (a) sono stati generati dallo stesso terremoto;
- (b) le onde sismiche viaggiano su un percorso simile dalla sorgente ai siti più vicini;
- (c) se le dimensioni della faglia di rottura sono grandi rispetto alla distanza tra i siti e la sorgente, posizioni adiacenti possono essere collocate sia vicine che lontane in riferimento alle asperità della faglia di rottura.

Le equazioni di previsione del moto del suolo moderne riconoscono implicitamente la prima causa di dipendenza mediante un termine specifico di errore inter-evento, η_i , come segue:

$$\ln Y_{i,j} = \overline{\ln Y_{i,j}} + \tau\eta_i + \sigma\varepsilon_{i,j} \quad 5$$

dove $Y_{i,j}$ è il parametro IM di interesse del moto sismico (ad esempio, $S_a(T1)$);

$\overline{\ln Y_{i,j}}$ è il valore mediano del log di Y previsto dalla formula di attenuazione al sito j, data la magnitudo e la distanza sito-sorgente per il terremoto i e le condizioni locali del sito; η_i è il sopra menzionato errore inter-evento ed $\varepsilon_{i,j}$ è l'errore intra-evento tra sito e sito, mentre τ e σ sono le corrispondenti deviazioni standard dei due termini di errore. Una formulazione alternativa per l'Eq. 5, che era comune nelle equazioni di predizione meno recenti, è data da:

$$\ln Y_{i,j} = \overline{\ln Y_{i,j}} + \tilde{\sigma} \tilde{\varepsilon}_{i,j} \quad 6$$

dove $\tilde{\varepsilon}_{i,j}$ è una variabile casuale che rappresenta sia la variazione inter-evento che quella intra-evento per il sito j dovute al terremoto i.

Confrontando le Eq. 5 e 6, si può osservare come $\tilde{\sigma}$ debba essere uguale alla radice della somma dei quadrati di σ e τ affinché le due equazioni coincidano, e che:

$$\tilde{\varepsilon}_{i,j} = \frac{\tau \eta_i + \sigma \varepsilon_{i,j}}{\tilde{\sigma}} \quad 7$$

Nel contesto della valutazione della correlazione sito-sito per i parametri del moto sismici del suolo IM, potrebbe essere conveniente utilizzare il modello esposto Eq. 6 per tre ragioni:

- (a) esiste sempre un solo termine residuo per ogni osservazione ($\overline{\ln Y_{i,j}}$ e $\tilde{\sigma}$ sono forniti dalle equazioni di previsione del moto e $Y_{i,j}$ è un parametro fornito da osservazione; così $\tilde{\varepsilon}_{i,j}$ può essere calcolato direttamente);
- (b) il termine residuo è facile da calcolare (i valori di η_i , $i = 1, \dots, N$, per tutti i terremoti e i valori dipendenti dalla frequenza di τ non sono solitamente inclusi nelle equazioni di previsione del moto del suolo nelle pubblicazioni);
- (c) Eq. 6 è anche la forma comunemente usata nell'analisi probabilistica del rischio sismico (PSHA); così modelli di correlazione spaziale in questo formato possono essere più facilmente incorporati nel software esistente.

Un esempio di $\tilde{\varepsilon}_{i,j}$ residui per accelerazione di picco al suolo (PGA), osservati per il terremoto di Chichi 1999, Taiwan, è mostrato in Figura 3.8; questi termini, il cui valore è indicato dal colore della scala, sono i termini residui combinati tra le Eq. 6 e 7 e rappresentano i termini di errore sia inter-evento che intra-evento. La correlazione intra-evento sito-sito per il moto sismico, ossia la correlazione tra le due variabili casuali $\varepsilon_{i,j}$ e $\varepsilon_{i,k}$ in due siti diversi j e k, grazie alla comunanza dei percorsi delle onde e della distanza dall'asperità della faglia, non è ancora stata studiata approfonditamente. La dipendenza spaziale può essere osservata in Figura 5, rilevando che i termini residui in luoghi vicini hanno valori simili. Questa correlazione intra-evento sito-sito, che, naturalmente, non è affrontata nelle relazioni di attenuazione per i singoli siti, è fondamentale per le applicazioni spazialmente distribuite di cui sopra.

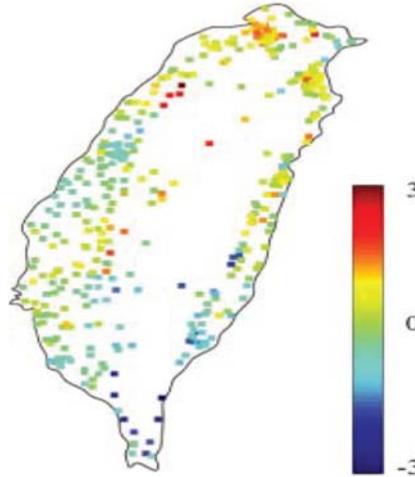


Figura 5: Termini residui di attenuazione osservati per il terremoto di Chi-Chi, Taiwan (1999).

La limitata ricerca su questo argomento indica che la correlazione dell'accelerazione di picco o dei valori di velocità diminuisce con l'aumentare della distanza tra i due siti. Questa correlazione può essere stimata calcolando i coefficienti di correlazione empirici per i valori di $\epsilon_{i,j}$, ad una distanza di separazione h per il sito (più o meno con una certa tolleranza). Poiché il valore η_i è fissato per ogni i -esimo terremoto, esso è effettivamente una costante quando i coefficienti empirici di correlazione sono stimati da un unico terremoto; così i coefficienti di correlazione ottenuti dai valori di $\epsilon_{i,j}$ e da quelli di $\tilde{\epsilon}_{i,j}$ saranno identici, ma tali coefficienti di correlazione rappresentano solo la correlazione per i valori di $\epsilon_{i,j}$.

Per ottenere i coefficienti di correlazione per i valori di $\tilde{\epsilon}_{i,j}$, si deve aggiungere l'effetto della variabile casuale η_i , che è perfettamente correlata a tutte le distanze, ma non può essere rilevata dai precedenti coefficienti di correlazione empirica. La correlazione totale per i valori $\tilde{\epsilon}_{i,j}$ è così:

$$\tilde{\rho}(h) = \frac{\tau^2 + \sigma^2 \rho(h)}{\tilde{\sigma}^2} \quad 8$$

dove $\rho(h) = \rho_{\epsilon_{i,j,1}, \epsilon_{i,j,2}}(h)$ è il coefficiente di correlazione empirica calcolato per i valori intra-evento $\epsilon_{i,j}$ separati da una distanza h , mentre $\rho_{\epsilon_{i,j,1}, \epsilon_{i,j,2}}(h)$ rappresenta il coefficiente di correlazione per i valori totali $\tilde{\epsilon}_{i,j}$ definiti dell'Eq. 7.

Si noti che, per i siti molto vicini, (ad esempio, $h \rightarrow 0$), la correlazione $\rho^{(h)}$ di IM, naturalmente, tende ad uno, mentre, per i siti molto distanti, (per esempio, $h \rightarrow \infty$) è data semplicemente dal rapporto tra il termine inter-evento di varianza e la varianza totale, come previsto. La varianza della differenza dello stesso quantitativo di IM in due siti, k e l , separati da una distanza h è semplicemente:

$$\text{VAR}[X_k - X_l] = 2\sigma^2(1 - \rho(h)) \quad 9$$

Attualmente esistono diversi modelli per queste funzioni di correlazione. I modelli si differenziano per i loro risultati, potenzialmente causa di differenze nei parametri di IM (ad esempio,

accelerazione di picco al suolo in relazione a velocità di picco al suolo) o negli eventi di terremoto in fase di studio e di differenze nelle metodologie di stima. Utilizzando uno studio completo di molti parametri di IM all'interno del quadro qui descritto, è possibile attendersi di poter identificare e risolvere queste differenze.

A margine della presente discussione, si sottolinea che, nel presente lavoro, si è scelto di adoperare la seguente tipologia di correlazione spaziale:

$$\log(IM) = \overline{\log IM}(M, R, \theta) + \eta_j + \varepsilon_{\rho_j} \quad 10$$

dove il primo termine rappresenta la media dei valori dei parametri sismici scelti; il secondo denota il termine inter evento residuo, che è un termine costante per tutti i siti in un dato terremoto e rappresenta la deviazione sistematica della media per lo specifico evento sismico; il terzo denota la variabilità intra evento del moto sismico. Gli ultimi due termini vengono di solito assunti come variabili casuali indipendenti, normalmente distribuiti con media zero e deviazione standard pari a σ_{INTER} e σ_{INTRA} rispettivamente.

Conseguentemente $\log(IM)$ è modellato come una variabile normale casuale con media pari a $\log(IM)$ segnato e deviazione standard pari a $\sigma_T^2 = \sigma_{INTER}^2 + \sigma_{INTRA}^2$.

Se è in esame la valutazione della pericolosità sismica in due o più siti contemporaneamente, la funzione densità di probabilità congiunta per il logaritmo di IM per tutti i siti può essere convenientemente modellata come una distribuzione multivariata normale. In questo caso si assume che i logaritmi per IM formino un campo gaussiano casuale, definito da un insieme di variabili casuali, una per ogni sito presente nell'esame.

In particolare i parametri del moto sismico, negli n siti, sono modellati come un insieme di variabili casuali caratterizzati da un vettore delle medie e da una matrice di covarianza, Σ , definita come:

$$\Sigma = \sigma_{INTER}^2 \cdot \mathbf{e} + \sigma_{INTRA}^2 \cdot \mathbf{R} \quad 11$$

dove σ_{INTER} rappresenta la correlazione inter evento, σ_{INTRA} quella intra evento (entrambi i parametri sono tabellati in Bindi, Pacor et al. (2011)); \mathbf{e} è la matrice unitaria e \mathbf{R} è la matrice di correlazione dei coefficienti (con uno sulla diagonale e ρ fuori diagonale).

Tale matrice è stata calcolata in diversi modi ed in particolare:

- 1) ρ è calcolato come in Esposito and Iervolino (2012):

$$\rho = \exp(-3 \cdot h / b(T)) \quad 12$$

Dove h rappresenta la distanza tra i siti i e j e $b(T)$ è un coefficiente pari a 10.8km;

- 2) ρ è uguale a zero (la correlazione spaziale è dovuta solo al termine inter evento):

$$\Sigma = \sigma_{INTER}^2 \cdot \mathbf{e} + \sigma_{INTRA}^2 \cdot \mathbf{I} \quad 13$$

dove \mathbf{e} è la matrice unitaria e \mathbf{I} è la matrice identica;

- 3) nessuna correlazione tra I valori di IM:

$$\Sigma = (\sigma_{INTER}^2 + \sigma_{INTRA}^2) \mathbf{I} \quad 14$$

2.4 Aggiornamento dei dati sulla base delle registrazioni delle stazioni e confronto con i risultati considerando l'amplificazione locale

Al fine di generare campi di PGA sulla base del generico scenario sismico preso in esame, ossia di implementare diverse simulazioni che mostrino diversi campi di PGA per gli elementi presi in considerazione, si approfondisce la metodologia di generazione di tali simulazioni dei campi di PGA. Nella generazione di tali campi di PGA, è possibile considerare o meno l'aggiornamento dei risultati della legge di attenuazione, sulla base dei dati reali provenienti dalle registrazioni delle stazioni accelerometriche, per il terremoto in esame, ancorando così i dati di regressione a quelli reali.

All'interno del programma "MATLAB", vengono effettuate diverse estrazioni, che rappresentano altrettanti valori di simulazione di PGA attese. Tali estrazioni sono ottenute attraverso la funzione "multivariata random", presente in MATLAB; essa genera le estrazioni, in modalità automatica, da una distribuzione normale congiunta a n variabili; nel caso preso in esame nel presente lavoro di tesi.

Nel caso di una funzione ad una sola variabile, l'iesima estrazione x vale:

$$x = \mu + random\sigma \quad 15$$

dove il valore random viene estratto da una distribuzione di tipo uniforme oppure da una gaussiana standard con media nulla e deviazione standard pari ad 1.

Se, invece, si considera il caso diverso di una funzione ad n variabili, l'iesima estrazione x vale:

$$x = \mu + random[L] \quad 16$$

dove la matrice [L] è ricavata a partire dalla decomposizione di Cholesky.

In algebra lineare la decomposizione di Cholesky è la fattorizzazione di una matrice hermitiana e definita positiva in una matrice triangolare inferiore e nella sua trasposta coniugata.

Tale matrice [L] ha la seguente proprietà:

$$[L] = chol[COV], \text{dove } [L][L]^T = COV \quad 17$$

A questo punto resta da sviluppare l'analisi riguardante la teoria relativa alla distribuzione di probabilità multinormale, teoria che è stata applicata nell'ambito della generazione delle suddette simulazioni.

Tale distribuzione ha diverse importanti proprietà.

Tra queste vale la pena citare che essa è completamente definita dal vettore della media, M, e dalla matrice della covarianza, Σ, delle variabili casuali.

Un'altra proprietà consta nel poter dire che se un insieme di variabili casuali $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$ è del tipo "jointly" normale, allora ogni sottoinsieme di queste variabili casuali sarà anche esso del tipo "jointly" normale.

In particolare, per $k < n$, i due sottoinsiemi $X = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T$ e $X = [X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_n]^T$ sono entrambi "jointly" normali.

Per ottenere le loro distribuzioni “joint”, bisogna solamente determinare i corrispondenti vettori delle medie M_1 e M_2 e delle matrici di covarianza Σ_{11} e Σ_{22} .

Questi elementi sono ottenuti dalla partizione delle corrispondenti matrici di X nella forma:

$$M = \left\{ \begin{matrix} M_1 \\ M_2 \end{matrix} \right\}; \Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{bmatrix} \quad 18$$

Si sottolinea che dovrebbe essere chiaro che la distribuzione marginale di ognuna delle variabili casuali X_i sia del tipo normale.

Un’ultima importante proprietà da vagliare è la seguente: se l’insieme di variabili casuali $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$ è di tipo normale congiunto, allora la distribuzione condizionale del sottoinsieme X_1 dato $X_2=x_2$ è normale congiunto con il vettore delle medie e la matrice della covarianza che valgono rispettivamente:

$$M_{1|2} = M_1 + \Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}(x_2 - M_2) \quad 19$$

$$\Sigma_{11|22} = \Sigma_{11} - \Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21} \quad 20$$

Nell’applicazione di tali formulazioni, i parametri in gioco sono i seguenti:

- M_1 è il vettore media del \log_{10} PGA per le infrastrutture di interesse (in accordo con la legge di attenuazione);
- M_2 è il vettore media del \log_{10} PGA per le stazioni considerate, calcolato in accordo con la legge di attenuazione;
- Σ_{11} è la matrice di covarianza per i valori di \log_{10} PGA calcolati per le infrastrutture di interesse;
- $\Sigma_{12}=\Sigma_{21}$ è la matrice di covarianza per i valori di \log_{10} PGA calcolati nei punti dove sono ubicate rispettivamente le infrastrutture e le stazioni;
- Σ_{22} è la matrice di covarianza per i valori di \log_{10} PGA calcolati per le stazioni considerate.

2.5 Generazione di shakemaps per un caso applicativo

Al fine di conseguire gli obiettivi illustrati in precedenza, è stato inizialmente impiegato un “caso studio” molto noto, ovvero si è considerato lo scenario di terremoto ottenuto sulla base dei dati di quello dell’Irpinia, per tutti i punti di una maglia di 2km, rappresentante la regione Campania. In primis si è generata una maglia di lato 50m per tutta la regione Campania stessa; una volta identificate le posizioni esatte di epicentro e faglia per il terremoto in esame, si è passati all’interpolazione della suddetta maglia con una carta geologica contenente informazioni sulle tipologie di suolo per tutti i punti della Campania. Quindi, a seguito dell’identificazione delle due distanze “epicentrale” e “Joyner-Boore” per ogni punto della mappa, si è applicata la legge di attenuazioni di Bindi-Pacor (2011) in modo da ricavare un valore di PGA attesa per ogni punto della maglia. A questo punto, per non appesantire i calcoli, la maglia è stata allargata fino ad avere lato di 2km e le stesse procedure fin qui descritte sono state identicamente ripetute. Infine si è passati alla definizione delle infrastrutture su cui applicare tali campi di PGA. In particolare sono stati scelti tutti i ponti a travata, facenti parte della rete autostradale campana.

Dunque, sulla base dell'approccio di scenario, descritto nel paragrafo precedente, si propongono prima la shakemap delle distanze Joyner-Boore e poi quella rappresentante lo scenario di PGA (espresse in g) attese, a partire dal terremoto dell'Irpinia di magnitudo 6.9, per tutti i punti della maglia di punti, rappresentante la Campania, di lato 2Km.

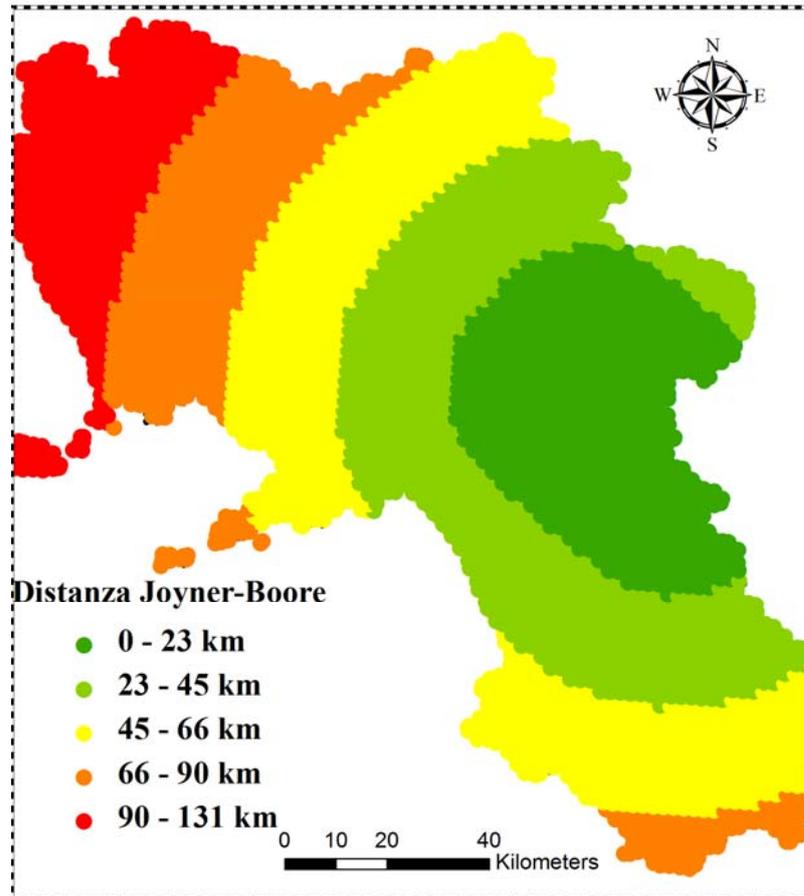


Figura 6: Mappa delle distanze Joyner-Boore per la regione Campania.

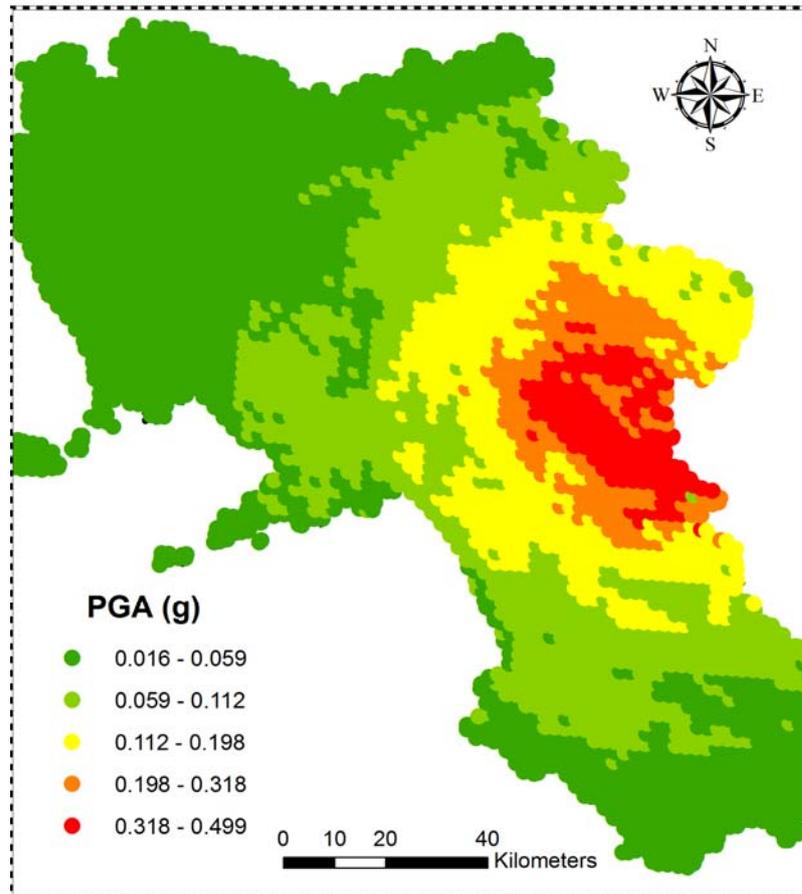


Figura 7: Scenario di PGA.

Il passo successivo è stato quello di acquisire dal sito “ITACA” tutti i dati relativi alle stazioni che a loro tempo registrarono il generico terremoto in esame. Si riportano di seguito due tabelle che contengono tutte le informazioni disponibili per le stazioni.

CAMPANIA							
	STATION CODE	STATION NAME	ELEVAZIONE (m s.l.m.)	VS 30m (m/s)	COEFFICIENTE STRATIGRAFICO	COEFFICIENTE TOPOGRAFICO	PGA (GEOMETRICAL MEAN) g
1	ALT	Auletta(Petina)(SA)	343	1149	A	T2	0.057
2	ARN	Arienzo (CE)	92	578	E	T1	0.030
3	BGI	Bagnoli Irpino (AV)	672	498	B	T3	0.155
4	BNV	Benevento (BN)	205	716	B	T1	0.042
5	BSC	Bisaccia (AV)	887	997	A	T1	0.089
6	CLT	Calitri (AV)	595	495	B	T3	0.166
7	GRG1	Garigliano-Free field 1 (CE)	5	191	C	T1	0.035
8	GRG2	Garigliano-Free field 2 (CE)	5	191	C	T1	0.037
9	GSN	Gioia Sannitica (CE)	275	-	C	T1	0.020
10	MRT	Mercato San Severino (SA)	155	483	B	T1	0.123
11	RCC	Roccamonfina (CE)	613	-	C	T1	0.028
12	SGR	S.Giorgio La Molara (BN)	635	-	A	T1	0.017
13	STR	Stumo (AV)	575	382	B	T1	0.267
14	TDG	Torre del Greco (NA)	178	-	A	T1	0.050

Tabella 1: Descrizione stazioni campane.

BASILICATA-PUGLIA

	STATION CODE	STATION NAME	ELEVAZIONE (m s.l.m.)	VS 30m (m/s)	COEFFICIENTE STRATIGRAFICO	COEFFICIENTE TOPOGRAFICO	PGA (GEOMETRICAL MEAN) g
1	BRN	Brienza (PZ)	691	402	B	T1	0.197
2	BVN	Bovino (FG)	605	364	B	T1	0.047
3	LRG	Lauria Galdo (PZ)	739	603	B	T1	0.015
4	RNR	Rionero in Vulture (PZ)	673	538	B	T1	0.098
5	SSV	San Severo (FG)	78	390	B	T1	0.022
6	TRR	Tricarico (MT)	650	467	B	T1	0.041
7	VSS	Vieste (FG)	7	440	B	T1	0.032

Tabella 2: Descrizione stazioni lucane e pugliesi.

Si propone prima una mappa di localizzazione delle stazioni sul territorio e poi un confronto tra la PGA registrata per le stazioni campane ed i valori di PGA attesa che vengono fuori dalla leggi di attenuazione e da essa più o meno la deviazione standard. Tale confronto è stato fatto per ogni diversa tipologia di suolo e viene presentato in questa sede per le tipologie di suolo A e B.

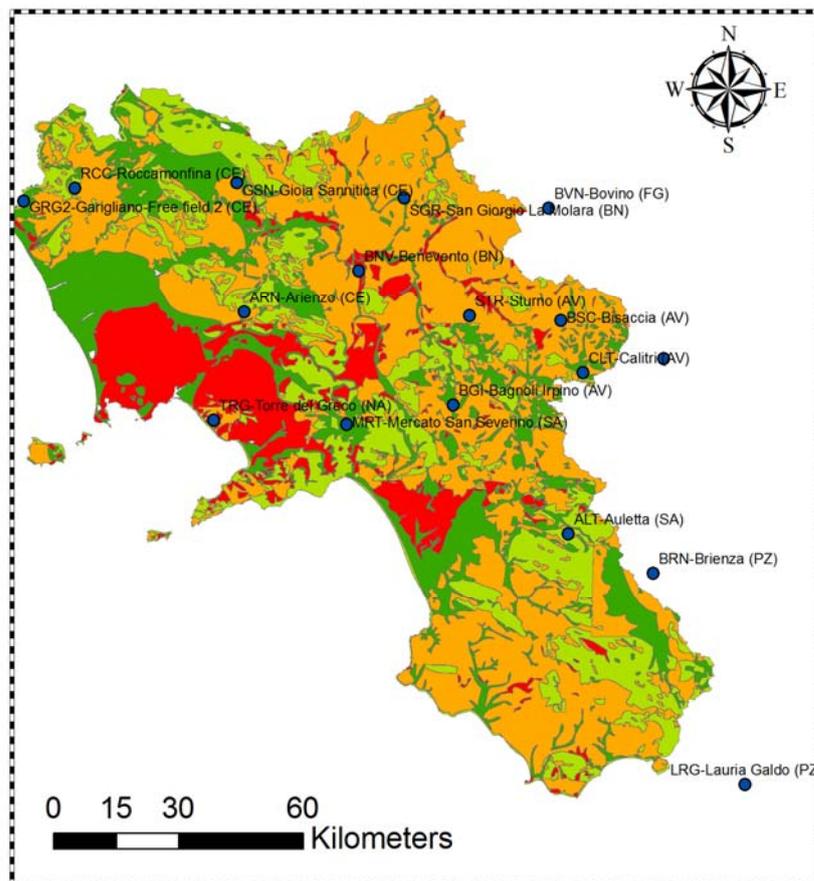


Figura 8: Identificazione delle stazioni

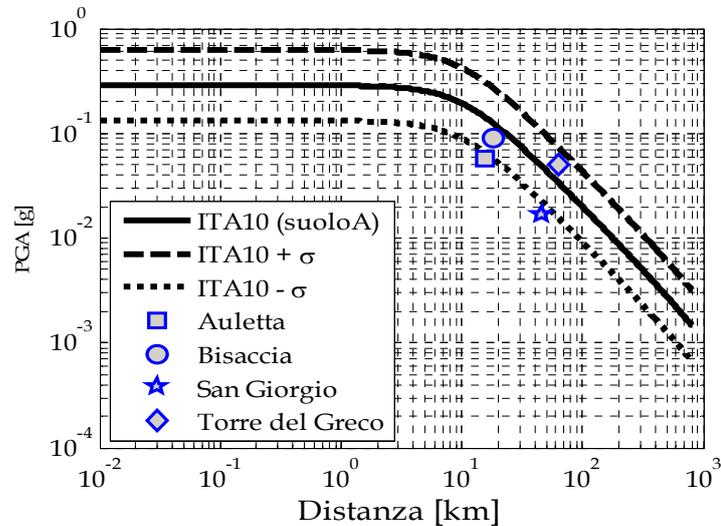


Figura 9: Confronto suolo A.

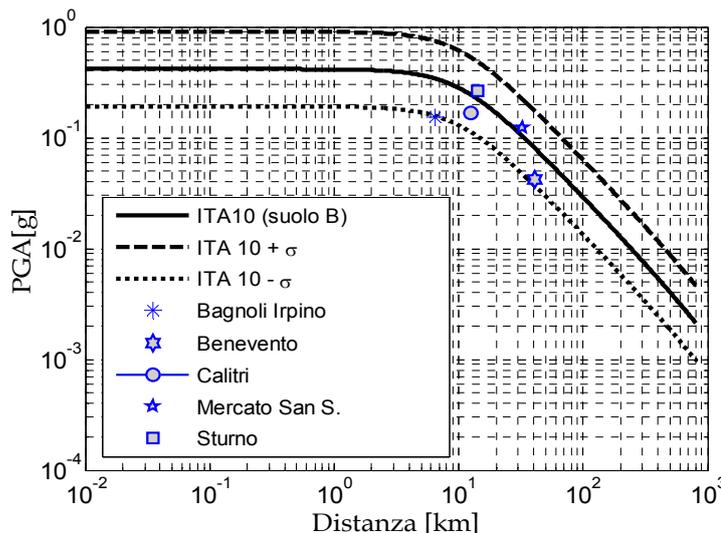


Figura 10: Confronto suolo B.

A questo punto si generano due campi di simulazioni di possibili PGA attese. Il primo campo è generato senza l'aggiornamento con i valori di PGA registrati dalle stazioni, mentre nel secondo caso si implementa anche l'aggiornamento. In entrambi i casi si usa il modello di correlazione spaziale completa, sottolineando che è possibile utilizzare anche gli altri modelli di correlazione in precedenza analizzati.

In seguito sono state mostrate due estrazioni casuali tra le simulazioni per i due casi in esame.

I valori delle PGA attese per ogni punto della maglia, espressi in g, sono raggruppati in cinque macro-intervalli.

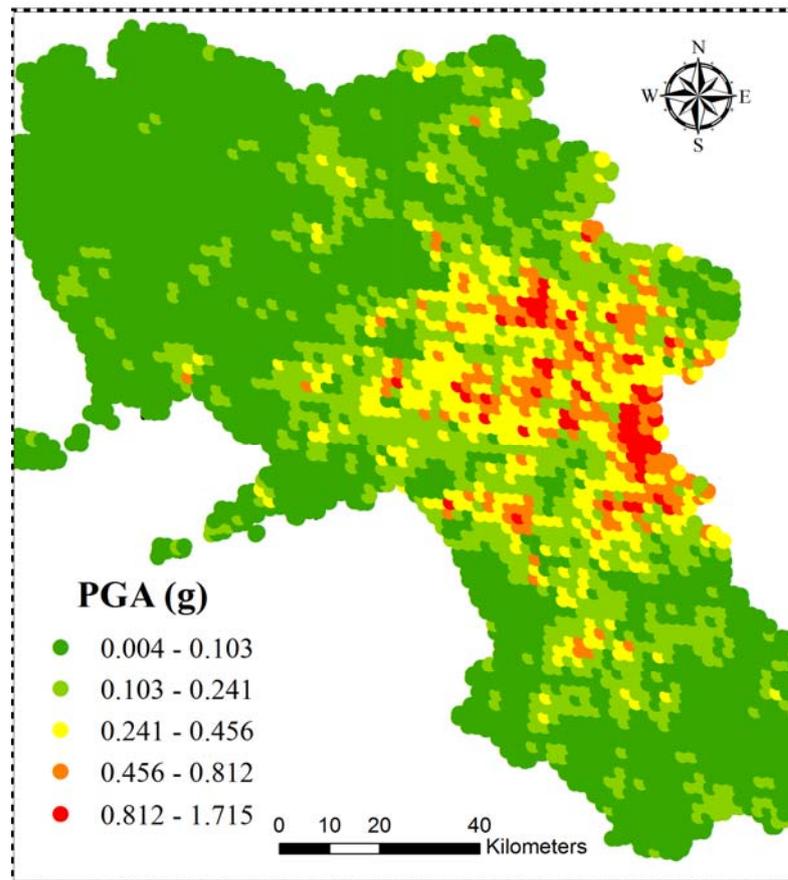


Figura 11: Esempio di simulazione senza aggiornamento.

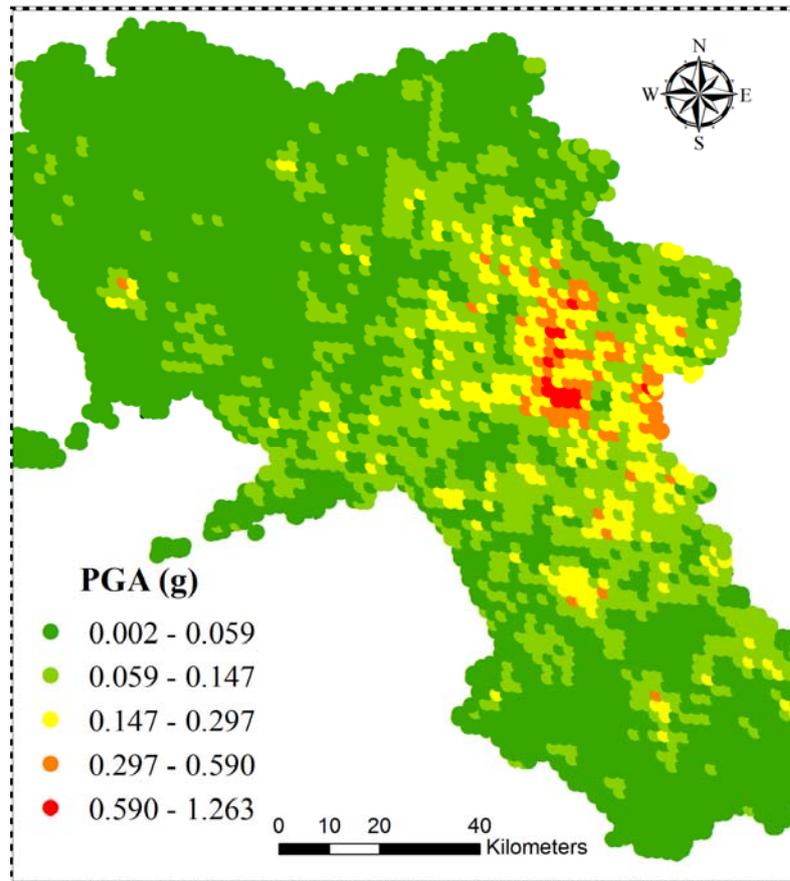


Figura 12: Esempio di simulazione con aggiornamento.

Tali simulazioni sono state ripetute con riferimento anche alle sole infrastrutture di riferimento, con la stessa tecnica appena descritta.

Infine si propone un confronto per un solo ponte tra il modello di Bindi-Pacor e quello che considera l'amplificazione locale come in Landolfi et al. (2011). Il confronto mostra i valori di PGA simulati per 100 simulazioni e le relative PDF; si può notare una sostanziale omogeneità tra le due formulazioni.

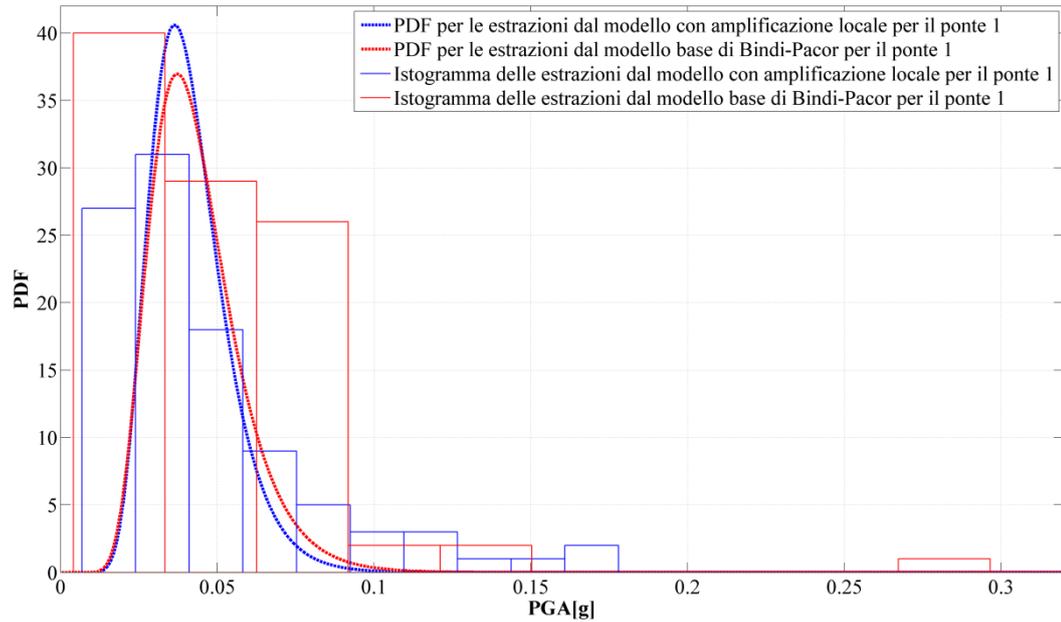


Figura 13: Confronto tra il modello base di Bindi-Pacor e quello considerando l'amplificazione locale.

3 Algoritmo di rete per l'analisi di affidabilità di un'infrastruttura viaria

Conoscere lo stato di salute di un sistema di infrastrutture viarie è una delle priorità maggiori sia per la gestione e la manutenzione programmata delle infrastrutture nel tempo sia per la programmazione e la messa in atto di piani di sicurezza in seguito ad eventi sismici.

Dal punto di vista matematico, la rappresentazione della rete stradale è ottenibile attraverso la teoria dei grafi (Thulasiraman and Swamy 2011) dove ogni punto di discontinuità (e.g. intersezioni, cambiamento delle proprietà dell'arco stradale, etc.) è rappresentato un nodo e il collegamento tra due nodi è rappresentato da un arco orientato.

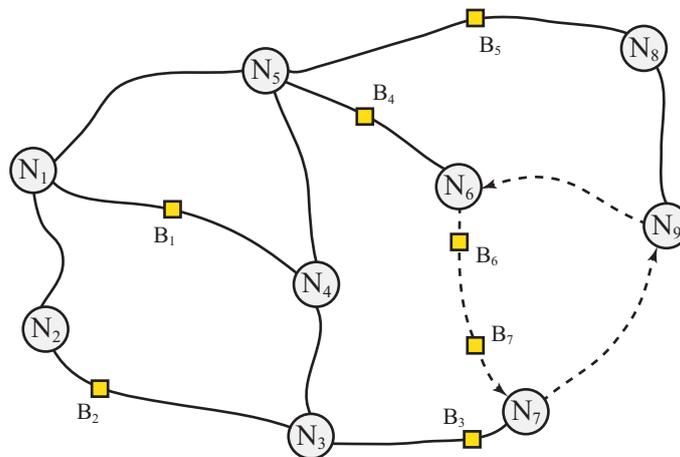


Figura 14: Esempio di una rete stradale in una rappresentazione a grafo.

Un esempio di grafo stradale è riportato in Figura 14 dove: i nodi sono etichettati con la lettera N ed un numero progressivo; gli archi rappresentati con linea continua consentono il collegamento in entrambi i versi; gli archi rappresentati in linea tratteggiata consentono il collegamento solo nel senso riportato dalla freccia; i ponti sono etichettati con la lettera B ed un numero progressivo. Ogni elemento del grafo contiene una serie di informazioni necessarie per l'analisi della rete, in particolare, velocità, tempi di percorrenza, tempi di attesa medi nelle intersezioni ma anche le informazioni necessarie ad una valutazione affidabilistica quali caratteristiche delle infrastrutture nevralgiche al fine di determinare la vulnerabilità degli elementi della rete.

3.1 Studio di connettività come metrica di prestazione sistemica della rete

Il controllo e la conoscenza del livello prestazionale di una rete di infrastrutture viarie può avvenire analizzando differenti aspetti. Una rete viaria, intesa come sistema complesso di elementi che hanno una vita e talvolta un'indipendenza propria, ha come scopo il collegamento tra differenti e molteplici punti geografici nella maniera più naturale e diretta possibile. Il collegamento e quindi la comunicazione tra differenti aree di una città o, a scala più grande, tra differenti città non è tuttavia un requisito sufficiente a garantire un certo livello prestazionale della rete. Infatti, affinché si possa parlare di qualità (in termini prestazionali) di una rete stradale è necessario che la stessa abbia due caratteristiche fondamentali: la sicurezza del collegamento (affidabilità di percorso) e la presenza di

numerose alternative (da cui dipende fortemente l'affidabilità di rete). Su questi temi non ci si sofferma in questo contesto ma si rimanda l'approfondimento ai paragrafi specifici 3.4 e 3.5 in cui le tematiche sono affrontate in maniera dettagliata. Ciò che tuttavia si vuole sottolineare in questo paragrafo è che nell'affrontare lo studio affidabilistico di un sistema di infrastrutture viarie, sia dal punto di vista del percorso che della rete, il parametro rappresentativo del livello prestazionale del sistema è sicuramente la connettività che il sistema può garantire per tanto l'analisi di connettività, combinata opportunamente con lo studio affidabilistico (così come spiegato nei paragrafi successivi), sono lo strumento per la misura del livello di prestazione sistemica di una rete di infrastrutture.

L'analisi di connettività è un problema affrontato frequentemente nell'ambito della teoria del trasporto (Dijkstra 1959, West 2001, Zhang 2005, Thulasiraman and Swamy 2011). Tradizionalmente i problemi di connettività sono risolti attraverso la modellazione della rete con un grafo costituito da nodi ed archi orientati attraverso il quali il flusso stradale viene propagato in relazione alle adiacenze che esistono tra i differenti nodi contenuti tra un punto di partenza ed un punto di arrivo. In un'ottica affidabilistica una modellazione della rete di questo tipo non è sufficiente in quanto non tiene conto in alcun modo delle fragilità nel sistema introdotte dalle infrastrutture. I ponti, le gallerie o qualsiasi altra infrastruttura a servizio di un sistema di trasporto rappresentano un punto di fragilità della rete in quanto sono queste strutture ad avere problemi e a creare interruzioni in caso di evento sismico. La modellazione adeguata allo scopo adottata in questo lavoro si basa sull'ipotesi che le infrastrutture a servizio della rete viaria (in particolare i ponti) siano gli unici elementi fragili della rete stradale. Le strade sono rappresentate da archi di resistenza infinita, i ponti invece sono rappresentati con archi con resistenza pari alla capacità del ponte. In questo modo è possibile eseguire l'analisi di connettività che tiene conto della possibilità di interruzione dovuta alla mancanza eventuale di archi rappresentanti i punti sulla rete.

La complessità delle reti stradali e l'elevato numero di nodi e di interconnessioni fisiche rende l'analisi di connettività un'operazione alquanto onerosa dal punto di vista computazionale. Per tale ragione è necessario abbandonare la strada di esplorare in maniera esaustiva tutte le possibili adiacenze nodo per nodo ed intervenire con semplificazioni e criteri di indirizzamento che consentono di evitare l'esplorazione di nodi inutili. In Figura 15 si riporta il principio di funzionamento dell'algoritmo di ricerca dei percorsi nella rete stradale.

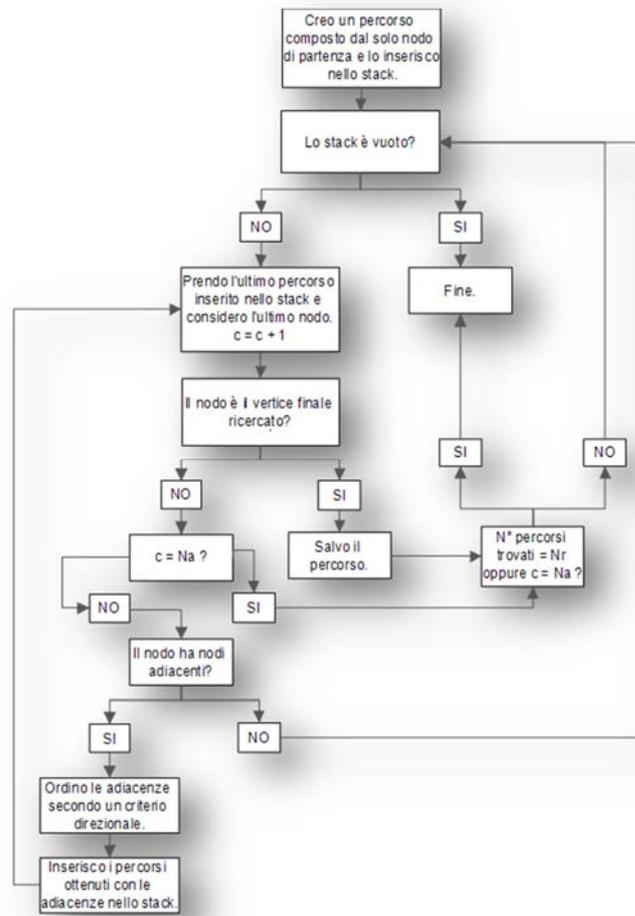


Figura 15: Schema logico di analisi di connettività

L'algoritmo di ricerca proposto in Figura 15 si avvale di una struttura dati di tipo *stack* con modalità di accesso di tipo *LIFO* (Last In First Out) ossia i dati vengono estratti nell'ordine opposto a quello di inserimento. La procedura viene inizializzata con l'inserimento nello *stack* del nodo di origine. Viene dunque prelevato dallo *stack* l'ultimo nodo inserito (che nella fase iniziale coincide con il nodo di partenza) e si inseriscono nello *stack* tutti i nodi adiacenti ad esso ordinati attraverso un criterio direzionale (si inseriscono a partire da quelli il cui vettore direzionale maggiormente si discosta da quello che punta alla destinazione). Per ogni nodo si controlla se coincide con quello di destinazione e in caso affermativo il percorso ottenuto (dall'insieme di nodi che lo formano attraverso le adiacenze identificate) viene memorizzato. La procedura è naturalmente di tipo ricorsivo. L'algoritmo si interrompe quando ha esplorato tutti i nodi della rete o quando ha trovato un numero di percorsi pari al massimo richiesto (specificato in figura dalla variabile Nr). È possibile inoltre controllare il numero di iterazioni massimo da effettuare per la ricerca del singolo percorso attraverso la variabile Na che viene ad ogni ciclo confrontata con un contatore C a sua volta inizializzato a 0 ogni qualvolta l'algoritmo passa per lo *stack*.

La scelta dei differenti itinerari da esplorare durante la ricerca dei percorsi può essere funzione di un criterio decisionale che consente di avere un ordinamento dei percorsi preferenziale. In particolare Padgett, Nielson et al. (2008) propone l'aggiunta di un attributo per la scelta degli archi di maggior rilievo nell'individuazione dei percorsi. Agli archi si attribuisce un peso funzione di differenti

parametri quali possono essere la lunghezza, la larghezza, un coefficiente di importanza o un qualsiasi fattore discriminatorio valido come criterio preferenziale nella scelta dei nodi da esplorare.

3.2 Definizione di un modello per la determinazione dei flussi di traffico

L'implementazione del DSS avviene provvedendo preliminarmente alla definizione del modello rappresentativo della rete di trasporto ed in particolare di quella stradale, specifica per le problematiche indicate al paragrafo precedente. A tal proposito, si applica la teoria dei grafi, contraddistinto da nodi ed archi, come modello rappresentativo.

Nel caso specifico i nodi oltre ad essere rappresentativi di particolari punti della rete stradale (corrispondente con intersezioni, punti in cui si hanno variazioni delle caratteristiche geometriche o cambiamenti della regolamentazione inerente la circolazione) coincidono anche con punti in cui si ha la variazione delle seguenti caratteristiche:

- la tipologia strutturale (asse viario in sterro o in riporto);
- la tipologia infrastrutturale (tunnel, galleria);
- i requisiti geologici del suolo.

I centroidi, che generalmente corrispondono ai luoghi in cui hanno origine e destinazione gli spostamenti tra le differenti zone caratterizzante l'area di studio, nel caso del DSS corrispondono anche a punti in cui hanno origine e destinazione i servizi di soccorso.

I nodi ed i centroidi rappresentativi della rete stradale sono identificati nel modello mediante coordinate geografiche riferite ad uno specifico sistema di riferimento (tipo WGS 84).

Gli archi reali di un grafo, rappresentativi delle arterie stradali, sono caratterizzati da numerose informazioni di base, attinenti proprietà geometriche e prestazionali quali:

- il nodo iniziale e il nodo finale dell'arco;
- la lunghezza;
- l'identificativo della direzione (senso unico o doppio senso);
- il tempo di percorrenza progetto (tempo medio di percorrenza ad arco scarico ossia in assenza di traffico);
- la velocità di progetto (velocità media di percorrenza ad arco scarico ossia in assenza di traffico);
- la capacità massima dell'arco nell'unità di tempo e per unità di trasporto;
- la curva di deflusso: formula che regola la velocità di percorrenza dell'arco in funzione del numero di veicoli che lo percorrono.

A questi archi si sommano anche quelli fittizi, attraverso i quali è possibile collegare i centroidi ai nodi della rete di trasporto.

Per attribuire al DSS le funzionalità di pianificazione e gestione dei servizi di soccorso è necessario tuttavia, definire un modello che tenga conto delle conseguenze indotte da un evento di natura sismica; tale modello si basa su una procedura che tenga conto delle variazioni di suddette proprietà degli archi del grafo in funzione del livello di danno arrecato da un sisma. A tal proposito, si rimanda al documento inerente la Sub-Attività A1.2.4 (D'Appolonia, 2014) per una approfondita descrizione della metodologia applicata per la rappresentazione del sistema dell'offerta concernente il sistema di trasporto (in particolare della rete stradale) e della modifica delle relative caratteristiche a causa di un sisma.

Definito il processo di modifica della rete di trasporto, il DSS è perfezionato con il modello di assegnazione della domanda di mobilità indirizzato alla individuazione degli itinerari di

collegamento tra centroidi della rete. La metodologia da considerare per lo sviluppo di tale modello è oggetto del seguente Paragrafo 1.3.1.

A valle del processo d'individuazione degli itinerari efficaci, il DSS è ultimato con un ulteriore modello finalizzato alla valutazione degli itinerari efficienti a supporto della gestione e programmazione dei soccorsi in caso di evento sismico. Per la descrizione della metodologia da adottare si rimanda tuttavia, al Paragrafo 1.4; infatti, si ritiene maggiormente appropriato, associare le finalità di tale modello ad attività di natura decisionale (Choice phase).

A chiarimento della struttura da attribuire al DSS per il routing dei soccorsi, si riporta in Figura 16, uno schema di sintesi in cui riportati i modelli che lo compongono e le informazioni da conferire per il funzionamento.

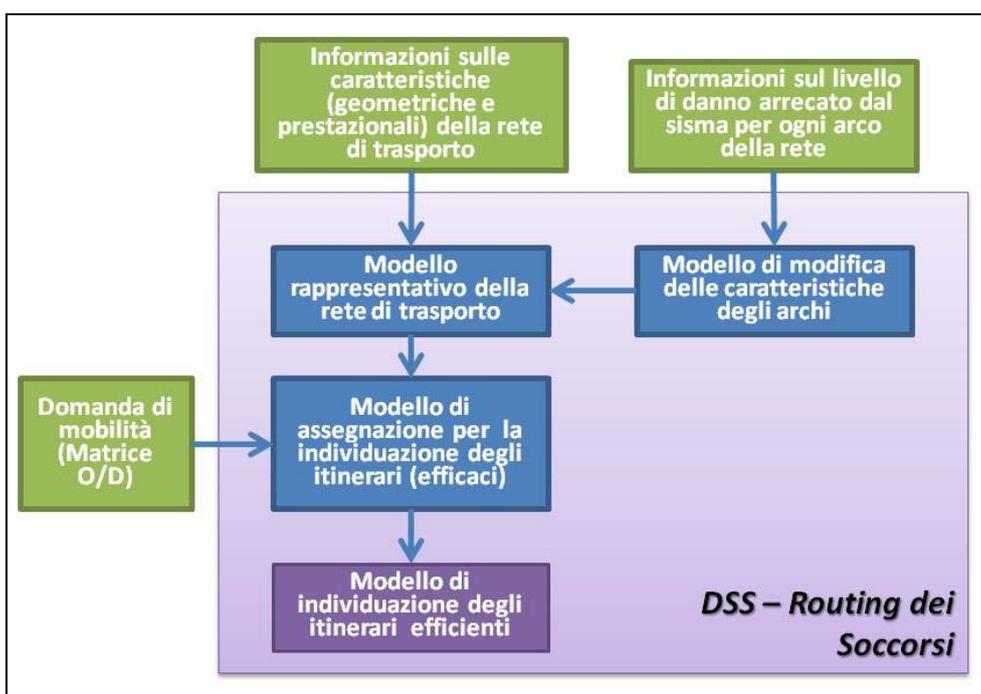


Figura 16 Schema DSS per il routing dei soccorsi

Modello di assegnazione per la individuazione degli itinerari

In generale, il modello di assegnazione provvede alla simulazione del trasporto ovvero alla distribuzione di flussi veicolari su una rete di trasporto che comprende varie tipologie di archi di spostamento (specializzati per modalità di trasporto) e fittizi (accesso ed egreso dalla rete). La simulazione avviene assegnando la domanda di mobilità che può essere rappresentata da:

- una o più matrici Origine/Destinazione (O/D) (specializzate per categorie di utenza),
- da una singola relazione O/D;
- ai possibili itinerari (efficaci) che connettono le Origini alle Destinazioni, ripartendo la domanda in funzione del costo generalizzato associato all'itinerario stesso.

Il modello di assegnazione esegue le precedenti funzioni considerando capacità finite degli archi e valori del tempo di attraversamento degli stessi valutati in funzione del flusso equivalente (ai fini della saturazione) che si riscontra nell'arco stesso, in base a varie curve Flussi-Tempo (in seguito F-

T), riportate al documento concernente la Sub-Attività A1.2.4 (D'Appolonia, 2014). A causa della non linearità delle funzioni F-T, l'assegnazione è effettuata per passi di carico successivi.

Il modello di assegnazione da implementare per il DSS, si basa su una procedura applicata sistematicamente all'interno di un loop multiplo ove sono di volta in volta definiti:

- una relazione O/D, cioè: nodo origine, nodo destinazione, volume totale (cioè una cella della matrice O/D);
- una tipologia di utenza associata al flusso considerato;
- le tipologie degli archi ammissibili per la tipologia di utenza assegnata;
- eventuali vincoli e condizioni applicate alla struttura degli itinerari ammissibili.

Come precedentemente indicato, poiché il tempo di attraversamento dell'arco (e quindi il tempo totale dei vari possibili itinerari), ed il costo generalizzato (di archi, ed itinerari) dipendono dal flusso equivalente che li attraversa (in relazione alla capacità dell'arco e alla relazione F-T dell'arco), occorre che l'assegnazione avvenga per "passi di carico". In ogni passo di carico è assegnata un quota di O/D, ed i parametri di tempo e costo sono valutati in base al flusso equivalente nell'arco al passo precedente.

Pertanto, la procedura attivata dal modulo di assegnazione prevede le seguenti fasi:

- definizione di un passo di carico e della relativa quota di O/D assegnata;
- valutazione del costo generalizzato associato alla percorrenza dei singoli archi ammissibili, in base ai flussi già assegnati agli archi (nei passi precedenti) ed ad eventuali quote di flussi iniziali di precarico e di flussi fissi di "background";
- ricerca di tutti gli itinerari (sequenza di archi) ammissibili che conducono dalla origine O alla destinazione D; l'ammissibilità è legata sia al criterio di ricerca che ai vincoli ed alle condizioni imposte;
- individuazione degli itinerari in funzione di costo crescente; vengono mantenuti in memoria solo il numero di itinerari prefissati;
- ricalcolo dei costi generalizzati associati ad ogni itinerario: in particolare costo monetario, e in considerazione di eventuali bonus/malus di tratta e di itinerario definiti in ingresso;
- ripartizione del volume della O/D su tutti gli itinerari considerati in funzione del costo generalizzato associato ad ogni itinerario;
- il flusso associato ad ogni itinerario viene accumulato negli archi che lo compongono;
- al termine della procedura di assegnazione dei passi di carico, vengono assemblati nuovamente tutti gli itinerari distinti che realizzano le relazioni della matrice O/D.

Ricerca degli Itinerari

La costruzione dell'albero degli itinerari relativo ad una coppia O/D è controllata dalle condizioni imposte alla struttura degli itinerari stessi. Le condizioni applicabili sono le seguenti:

- l'itinerario deve essere composto da archi ammissibili, cioè di modo specializzato per lo specifico tipo utenza o merce assegnata;
- l'itinerario deve essere composto da archi attivi, cioè non inibiti al trasporto per particolari motivi;
- l'itinerario deve essere caratterizzato da differenze rispetto ai precedenti, è possibile eliminare itinerari simili (i.e con tratte in comune) secondo criteri di massima lunghezza in comune ammissibile nell'ambito dell'itinerario complessivo e delle sue singole tratte.

Si valutano solo gli itinerari efficaci, per i quali i nodi sono tali che l'antecedente è sempre più lontano, in termini di costo generalizzato, dalla destinazione di quanto lo è il nodo attuale. Questa

opzione permette di valutare un albero di itinerari che comprende quello di minimo costo e altri a costo crescente, fino a saturare il serbatoio degli itinerari da mantenere in memoria. L'itinerario di minimo costo (nel caso di itinerario attraversato con una sola modalità di trasporto) è individuato mediante l'applicazione dell'algoritmo di Dijkstra semplice.

In alcune ricerche di itinerari è possibile generare tutti gli itinerari tali che la minima distanza dalla destinazione di ogni nodo è minore o uguale a quella del suo antecedente moltiplicata per una costante. Per valori elevati della costante, tutti i possibili itinerari sono costruiti. Questo metodo risulta estremamente oneroso per reti complesse. Tuttavia è necessaria la sua applicazione nel caso si desideri ricercare itinerari di particolare complessità.

Nella costruzione degli itinerari sono inammissibili quelli che attraversano lo stesso nodo o lo stesso arco più di una volta ed anche tutti gli itinerari composti solo da due archi fittizi.

Il volume della O/D è ripartito tra tutti gli itinerari registrati in memoria, ad ognuno dei quali è associato un costo generalizzato di itinerario C_k . La memoria contiene l'insieme ordinato degli itinerari.

La formula da applicare al modello per la ripartizione dei flussi è di tipo Logit, corrispondente ad una legge di probabilità di Weibull:

$$F_k = \frac{F_{ij} \cdot P_k}{\sum_k P_k} \quad 21$$

dove:

- F_k corrisponde al flusso assegnato all'itinerario k-esimo;
- F_{ij} : volume della domanda O/D tra coppie di centroidi i e j;
- Il fattore P_k è invece definito mediante la seguente Equazione 2:

$$P_k = e^{\left[-FAL \cdot \frac{C_k}{C_{k \min}} \right]} \quad 22$$

dove:

- C_k : costo generalizzato dell'itinerario k-esimo;
- $C_{k \min}$: costo dell'itinerario di minimo costo;
- FAL: fattore di calibrazione del modello. Maggiore è il valore del fattore FAL maggiore è la domanda assegnata integralmente all'itinerario di minimo costo.

Il modello di assegnazione finalizzato alla determinazione dei flussi di traffico sugli archi della rete, oltre alle informazioni prestazionali associate a quest'ultimi, è in grado di fornire una serie di indicazioni associate a ciascun itinerario efficace di collegamento tra ogni coppia di punti Origine e Destinazione; queste indicazioni riguardano ad esempio la lunghezza, il flusso, il costo generalizzato, il tempo di attraversamento, etc.

Selezione della decisione

Le indicazioni fornite dal modello di assegnazione del DSS, riferite ai possibili itinerari di collegamento tra ogni coppia di punti Origine e Destinazione, non sono sufficienti per supportare le attività di gestione e pianificazione dell'emergenza, coincidente con la selezione tra i possibili itinerari efficaci quello maggiormente efficiente da segnalare per il "routing" dei servizi di soccorso. Appare adeguato pertanto attribuire al DSS un ulteriore modello di calcolo finalizzato alla

comparazione tra differenti itinerari in base ad opportuni criteri di convenienza basati dalla combinazione delle indicazioni fornite direttamente dal modello di assegnazione unitamente ad altri indicatori ritenuti a completamento.

Come precedentemente indicato, il modello di assegnazione fornisce l'entità di un insieme di indicazioni riferite ai possibili itinerari efficaci di collegamento tra coppie di punti in Origine e Destinazione, quali:

- numero di itinerari;
- elenco archi costituenti l'itinerario;
- flussi di traffico assegnato per ciascun itinerario;
- tempo di percorrenza;
- lunghezza dell'itinerario.

A completamento, il modello per l'individuazione dell'itinerario efficiente per il "routing" dei soccorsi, prevede l'utilizzo di ulteriori indicatori; a tal proposito si fa riferimento all'elenco di indicatori di funzionamento della rete stradale riportati nel documento concernente la Sub-Attività 4.3.1 (D'Appolonia, 2014). Tra questi, sono ritenuti validi:

- l'extratempo totale da congestione;
- la saturazione geometrica;
- il livello di servizio.
- Tuttavia tali indicatori devono essere specializzati per itinerario. Si riportano di seguito le formule per il calcolo di suddetti indicatori.

Extratempo totale da congestione su itinerario

Tale indicatore può essere espresso mediante la seguente Equazione :

$$\Delta T_{tot,n} = \frac{\sum_{a=1}^k fsue_a (t1_arco_a - tsue_arco_a)}{\sum_{a=1}^k fsue_a} \quad 23$$

dove:

- fsuea rappresenta il flusso assegnato su ogni arco a-esimo (con a =1,...,k) che appartiene all'itinerario n-esimo (con n=1,...,z) tra i possibili z itinerari di collegamento tra una coppia O/D;
- t1_arcoa rappresenta il tempo di percorrenza dell'arco a-esimo;
- tsue_arcoa rappresenta il tempo di percorrenza a flusso nullo dell'arco a-esimo.

Saturazione geometrica d'itinerario

Tale indicatore può essere espresso mediante la seguente Equazione:

$$Sat_n = \frac{\sum_{a=1}^k Sat_geom_a \cdot fsue_a}{\sum_{a=1}^k fsue_a} \quad 24$$

dove:

- Sat_geoma rappresenta la saturazione geometrica dell'arco a-esimo, data dal rapporto tra la lunghezza della coda e la relativa capacità;
- fsuea rappresenta il flusso assegnato su ogni arco a-esimo (con a =1,...,k) che appartiene all'itinerario n-esimo (con n=1,...,z) tra i possibili z itinerari di collegamento tra una coppia O/D;

Livello di servizio d'itinerario

Tale indicatore può essere espresso mediante la seguente Equazione:

$$los_n = \frac{\sum_{a=1}^k los_a \cdot fsue_a}{\sum_{a=1}^k fsue_a} \quad 25$$

dove:

- los_a rappresenta il livello di servizio dell'arco a-esimo, dato dal rapporto tra la velocità di viaggio su arco e la velocità a flusso nullo;
- $fsue_a$ rappresenta il flusso assegnato su ogni arco a-esimo (con $a = 1, \dots, k$) che appartiene all'itinerario n-esimo (con $n = 1, \dots, z$) tra i possibili z itinerari di collegamento tra una coppia O/D.

Identificazione dei percorsi efficienti

Operativamente il supporto del DSS per il routing dei soccorsi avviene applicando un'analisi multicriteriale, che consente di calcolare un indice di criticità partendo dagli indicatori di traffico per ciascun itinerario efficace.

L'analisi multicriteriale permette di calcolare un indicatore di criticità relativo ad ogni singolo arco, in modo tale da classificare i percorsi all'interno del network.

Il processo di analisi è schematizzato in Figura 3. Primariamente è necessario selezionare una serie di grandezze frutto di osservazioni e/o simulazioni (p. es. velocità media di percorrenza, indice di saturazione, inquinamento acustico, ecc.), successivamente le suddette grandezze sono adimensionalizzate in maniera tale da determinare un indice che descrive il grado di criticità relativa rispetto alla situazione più critica; nell'ultima fase del processo si determina la criticità complessiva di ogni arco, sommando gli indici relativi alle singole grandezze considerate.

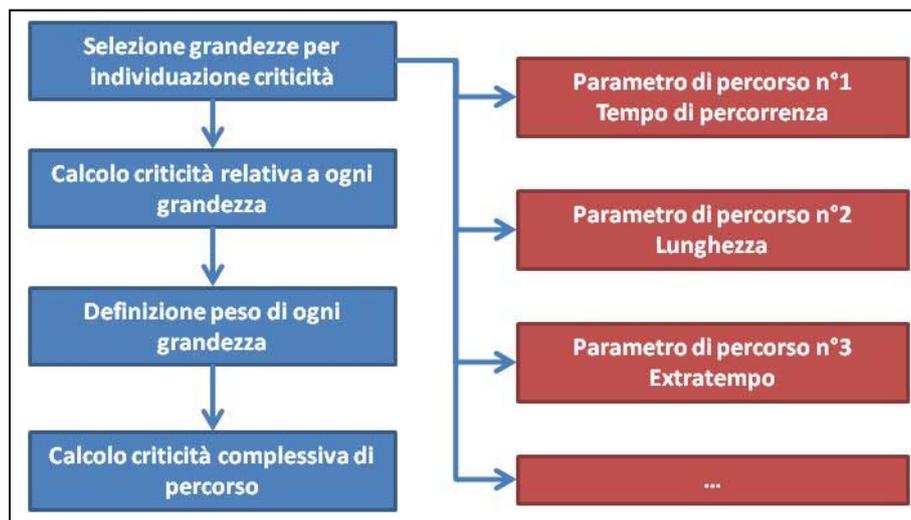


Figura 17 Schema per lo sviluppo dell'analisi multicriteriale

Tutta la procedura può essere personalizzata sulla base di esigenze specifiche, in particolare è possibile:

- scegliere le grandezze da considerare nel calcolo;

- selezionare il criterio di scelta del valore maggiormente critico, che sarà usato come termine di raffronto: valore massimo, come per esempio nel caso della capacità; o valore minimo, come nel caso della velocità di percorrenza della strada;
- calcolare la criticità relativa ad ogni singolo indicatore (velocità, indice di saturazione, inquinamento acustico, ecc.), secondo la seguente formulazione:

$$f(indcrit, rifind) = \frac{indcrit}{rifind} \text{ per parametri in cui i valori critici sono quelli massimi,}$$

$$f(indcrit, rifind) = \frac{rifind}{indcrit} \text{ per parametri in cui i valori critici sono quelli minimi, con indcrit come valore della grandezza considerata, e rifind come valore di riferimento per il calcolo della criticità relativa;}$$

- definire il peso della singola grandezza (p_{ind}), l'analisi, infatti, può essere guidata in maniera tale che, per esempio, i fattori ambientali abbiano più importanza rispetto agli indicatori di traffico;
- calcolare la criticità complessiva, secondo la seguente formulazione:

$$indcritot = \sum_{ind=1}^{nind} p_{ind} \times f(indcrit, rifind) \quad 26$$

3.3 Analisi di pericolosità sismica da scenario

Inizialmente si intende sottolineare che per quanto riguarda l'analisi di pericolosità sismica, si è scelto un approccio da scenario. Di conseguenza, l'analisi di affidabilità dei percorsi e di rete, presentate successivamente, verranno sviluppate a partire dalla considerazione di uno specifico scenario sismico.

Come già ricordato in precedenza, nel pianificare e coordinare interventi di emergenza, gli enti locali e le diverse organizzazioni coinvolte sono interessati ad effettuare simulazioni di eventi sismici realistici che presentino la maggiore probabilità di verificarsi in termini di magnitudo e distanza. Le mappe di scenario, possono essere utilizzate per esaminare le perdite attese per le strutture o infrastrutture, esposte a specifici terremoti potenziali. Tale procedura, sviluppata nel caso in esame per un terremoto del passato, può essere, in maniera pressoché istantanea, implementata per un qualsiasi terremoto futuro, in modo da produrre una mappatura della pericolosità sismica immediata e facilmente consultabile e gestibile.

3.4 Valutazione della vulnerabilità

L'interesse primario nelle procedure di gestione efficace del rischio può trovare un parametro di grande importanza nella precisione delle curve di fragilità adoperate per il calcolo della capacità di determinate infrastrutture. In questo contesto, con riferimento ad un ampio portafoglio di ponti, è di grande rilievo una valutazione precisa di come i diversi modelli di vulnerabilità possano influenzare la valutazione delle perdite economiche per l'intera rete di ponti considerata ed in particolare come gli effetti di aggiornamento Bayesiano delle curve di fragilità possano modificare le stime pregresse nell'ambito della gestione del rischio. Nello specifico, nell'ambito di tale analisi di rischio sismico,

due diversi modelli di vulnerabilità, sempre con riferimento ai ponti a travata in cemento armato, sono stati valutati e comparati: 1) un modello che considera le curve di fragilità mediane provenienti dal modello generato nell'ambito della procedura "Britney"; 2) un altro che considera un aggiornamento di tali curve di fragilità mediane di Britney in forma chiusa.

Per tali modelli, si fa un'ipotesi fondamentale: tutti i ponti appartengono alla stessa classe, vale a dire che il portfolio è completamente omogeneo. Questa ipotesi è equivalente alla considerazione di una PGA media tra tutte quelle relative ai ponti del database, con le quali entrare nelle curve di fragilità per i diversi stati limite e derivare la corrispondente probabilità di superamento dei suddetti stati limite.

A proposito di stati limite associati alle curve di fragilità, sono stati scelti quelli di danno e collasso. Questi stati limite sono coerenti con quelli scelti da Noto and Franchin (2012), all'interno della procedura Britney, e con le restrizioni imposte dall'Eurocodice 8 Part 3 (2007).

Come detto, con riferimento al primo modello di vulnerabilità, le necessarie curve mediane di fragilità sono state prese dalla procedura "Britney" da Noto and Franchin (2012).

La metodologia adottata per la valutazione della fragilità è basata su un approccio di tipo "IRHA". La curva di fragilità è ottenuta per punti per nove incrementi di valore di una misura scalare di intensità sismica. I nove valori sono caratterizzati da un incremento medio del periodo di ritorno TR da 30 a 2475 anni. Per ognuno dei dieci livelli di intensità, i moti sintetici (multi componenti) sono prodotti al fine di confrontarli in media con gli associati valori dello spettro di normativa. L'approccio "IRHA", con riferimento a questi moti, fornisce un piccolo campione di valori di risposta che possono essere divisi dai corrispondenti valori di capacità, campionati dalle loro rispettive distribuzioni. Il campione ottenuto di rapporto domanda/capacità, (D/C), per elemento/meccanismo può essere usato per ottenere un rapporto D/C per l'intero sistema strutturale (rapporto D/C globale detto Y).

Per sistemi strutturali semplici, come quelli di ponte a travata, un semplice schema "sistema in successione" è adeguato (la tipologia di rottura peggiore identifica la rottura globale) e quindi il rapporto globale D/C per il j-esimo livello di intensità e per il k-esimo moto è dato dalla seguente espressione:

$$Y_{jk} = \max\left(\frac{D_{1jk}}{C_1}, \dots, \frac{D_{nj k}}{C_n}\right) \quad 27$$

I dieci valori di Y, condizionati dal livello di intensità sismica, sono usati per rappresentare una distribuzione lognormale (stimando media e deviazione standard) e per determinare la probabilità di superamento del valore unitario che rappresenta D=C. Questo è il corrispondente valore di fragilità:

$$p(Y > 1 / j) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln 1 - \mu_{\ln Y_j}}{\sigma_{\ln Y_j}}\right) \quad 28$$

La procedura è molto spesso chiamata analisi "multiple-stripe" ed è concettualmente simile a quella incrementale dinamica (IDA), con l'importante differenza che essa non richiede (o lo fa in minima parte) una scala (quando sono usati moti naturali) e che usa differenti gruppi di moti per ogni livello di intensità, che rappresentano il cambio dei parametri per la sorgente (disaggregazione di hazard), che occorre quando si cambiano i livelli di intensità.

Il numero di stati limite (LS) per descrivere la vulnerabilità, in un modo che sia da un lato adeguato per lo scopo di sviluppare un'analisi di connettività su una rete danneggiata e dall'altro consistente

con la corrente risoluzione di predizione di danno tramite analisi numerica, è fissato in due: danno (leggero/parziale) e collasso. In maniera corrispondente i ponti possono ritrovarsi in tre diverse condizioni: aperti al traffico, aperti al traffico per le emergenze e chiusi. Gli elementi vulnerabili includono pile ed appoggi. L'impalcato è considerato relativamente meno vulnerabile e non è incluso nell'insieme degli elementi vulnerabili. Anche le fondazioni della pila e le spalle non sono incluse in tale insieme, anche se questa assunzione non può essere considerata sempre valida. Le pile possono giungere a rottura sia per crisi a taglio che per superamento della capacità flessionale in termini di rotazione di corda. Gli appoggi invece possono giungere a rottura a causa di un'eccessiva domanda di spostamento. Le rotture che coinvolgono l'impalcato e la sottostruttura sono considerate con riferimento agli appoggi. Le soglie di capacità (con l'eccezione della capacità di spostamento dei cuscinetti) sono state modellate come quantità random. La mediana è stata ottenuta da modelli specificati nell'Eurocodice 8 Part 3 (2007). Circa le curve di fragilità per ogni stato limite, solo i valori mediani sono stati considerati per le analisi.

In definitiva, nella tabella 3 sono presentati i riferimenti in merito alle soglie di capacità dei ponti e ai parametri delle curve di fragilità utilizzati, mentre in figura 14 sono mostrate le curve di fragilità mediane.

Failure modes	Damage		Collapse	
	η (g)	β	η (g)	β
Flexural	EC8-3, A.3.2.4	0.10	EC8-3, A.3.2.2	0.40
Brittle	-	-	EC8-3, A.3.3.1	0.25
Fragility curves	0.093	0.302	2.044	1.081

Tabella 3: Parametri delle curve di fragilità

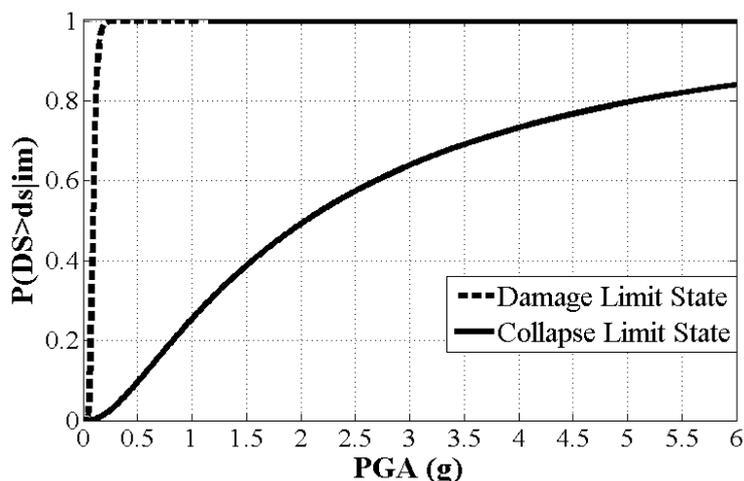


Figura 18: Curve di fragilità mediane da "Britney".

L'aggiornamento in forma chiusa delle curve di fragilità mediana rappresenta il secondo modello di vulnerabilità utilizzato. Si è partiti da una distribuzione "prior" delle curve di fragilità, basata su curve calibrate su un gran numero di ponti; è stato poi effettuato un aggiornamento Bayesiano di tali curve di fragilità, sulla base di curve calibrate specificamente per singoli ponti del portfolio o per ponti di caratteristiche simili a quelle del portfolio, in modo da ottenere nuove curve di fragilità aggiornate. L'aggiornamento delle curve di fragilità è stato attuato, quindi, a partire dalle curve di

fragilità mediana di Britney, ottenendo le curve di fragilità a posteriori sulla base della considerazione delle altre curve di fragilità presenti in letteratura, che vengono ora presentate nello specifico.

Per la creazione del database per l'aggiornamento delle curve di fragilità, sono stati selezionate otto curve per lo stato limite di collasso e sei curve per lo stato limite di danno, a partire da due lavori scientifici. Il primo (Cardone, Perrone et al. (2011)) è una metodologia adattiva performance-based per la valutazione sismica di ponti a più campate semplicemente appoggiati. Questa metodologia si basa su un'applicazione Inversa (I), Adattiva (A) del Capacity Spectrum Method (CSM), con la curva di capacità del ponte derivata tramite un'analisi Adaptive Pushover Displacement (DAP). Il metodo IACSM viene applicato a nove ponti esistenti, caratterizzati da diversi tipi di pile e di appoggi. Sono stati identificati un certo numero di livelli di performance (PL), per la valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico del ponte. Ogni PL è associato un numero di stati di danno (DSS) dei componenti critici del ponte. Per essere coerenti con le ipotesi di sviluppo delle curve Britney, sono state utilizzate solo le curve di fragilità legate agli stati limite di danno e collasso delle pile da ponte.

Il secondo lavoro (Franchetti, Grendene et al. (2004)) è una valutazione del rischio sismico, con un'applicazione ad alcuni ponti e viadotti in Veneto (Italia). In particolare, sono stati presentati i risultati di una campagna preliminare per valutare il rischio sismico di ponti e viadotti nella regione Veneto. Il rischio è quantificato da curve di fragilità ottenute da analisi dinamica non lineare tempo dipendente. Sono stati identificati quattro livelli di danno: leggero, moderato, esteso e collasso. Per essere coerenti con le curve Britney, sono state selezionate solo le curve associate a danni moderati (equiparabile allo stato limite di danno di Britney) ed al collasso. La Tabella 4 riassume tutti gli elementi presenti nel database utilizzato per l'aggiornamento.

COLLAPSE LIMIT STATE			
Bridge	Position	η (g)	β
1) Lauretta	A16	0.46	0.57
2) Ceraso	A16	0.42	0.60
3) Fiumarella	A16	0.60	0.57
4) Serra Dei Lupi	A16	0.37	0.61
5) Macchione	A16	0.33	0.60
6) San Vendemiano	A27	0.33	0.25
7) Botteon	A27	0.37	0.17
8) Lago Santa Croce	A27	0.36	0.18
DAMAGE LIMIT STATE			
Bridge	Position	η (g)	β
1) Lauretta	A16	0.25	0.57
2) Cesaro	A16	0.23	0.61
3) Fiumarella	A16	0.22	0.60
4) San Vendemiano	A27	0.16	0.25
5) Botteon	A27	0.16	0.28
6) Lago Santa Croce	A27	0.17	0.35

Tabella 4: Parametri delle curve di fragilità per i ponti considerati nel database per l'aggiornamento.

L'aggiornamento è stato fatto con una procedura bayesiana. La procedura segue quanto sviluppato da Singhal and Kiremidjian (1998) anche se in questo lavoro scientifico l'aggiornamento è stata effettuato sulla base di dati diretti e sperimentali.

Per entrambi gli stati limite, le curve prior del database sono state modellate come lognormali; l'aggiornamento è stato effettuato in una forma chiusa. Se la variabile è lognormale, il suo logaritmo naturale $x = \ln(fc)$ è una variabile random distribuita normalmente con media λ e deviazione standard ζ . La distribuzione a posteriori del parametro λ , $f(\lambda)$ è normale con valore medio e di deviazione standard forniti, rispettivamente, dalle seguenti formule:

$$\mu''_{\lambda} = \frac{\mu'_{\lambda} \left(\frac{\zeta_p^2}{n_p} \right) + \mu'_p \sigma'^2_{\lambda}}{\left(\frac{\zeta_p^2}{n_p} \right) + \sigma'^2_{\lambda}} \quad 29$$

$$\sigma''^2_{\lambda} = \frac{\left(\frac{\zeta_p^2}{n_p} \right) \sigma'^2_{\lambda}}{\left(\frac{\zeta_p^2}{n_p} \right) + \sigma'^2_{\lambda}} \quad 30$$

dove:

μ'_{λ} è il valore medio della curva prior;

μ_p è il valore medio del logaritmo naturale degli elementi del database;

σ'^2_{λ} è la varianza della curva prior;

ζ'^2_p è la varianza del logaritmo naturale degli elementi del database;

n_p è il numero di elementi presenti nel database.

In questo caso, μ'_{λ} e μ_p sono ottenuti come logaritmo delle rispettive mediane.

La Figura 18 e la Figura 19 mostrano, per entrambi gli stati limite, la curva di fragilità prior, quella aggiornate e le curve specifiche dei diversi ponti. La Tabella 5 mostra i parametri statistici delle curve di fragilità prior ed aggiornata.

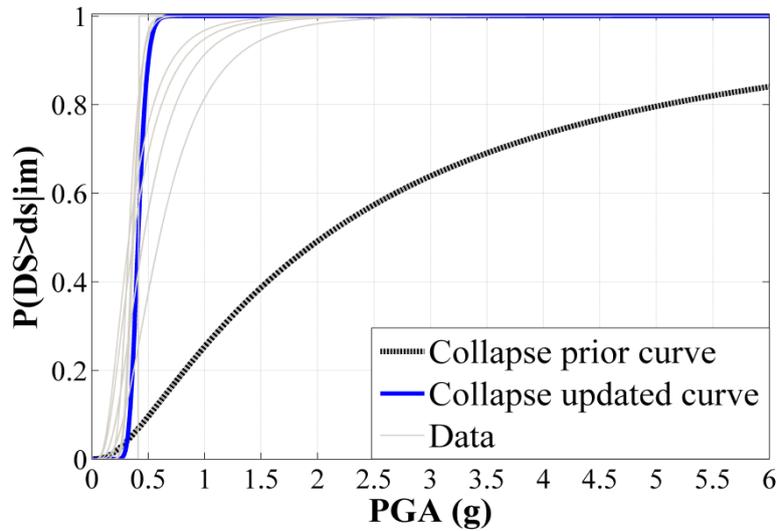


Figura 19: Curve di fragilità al collasso.

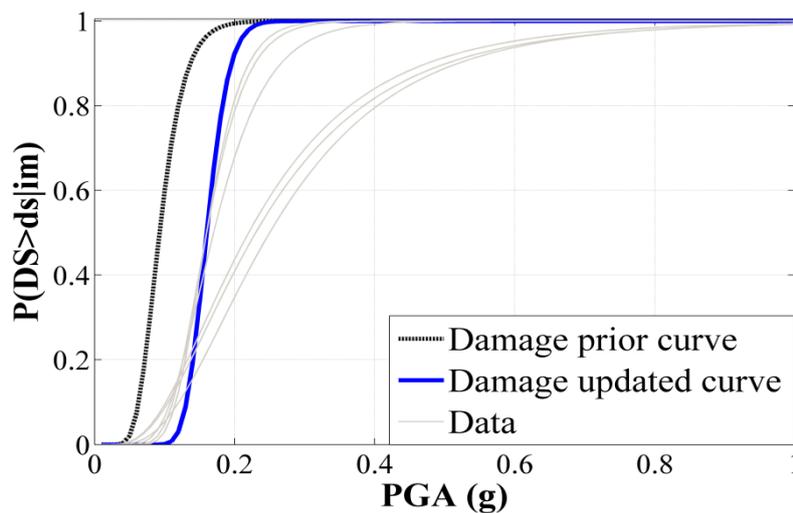


Figura 20: Curve di fragilità al danno.

Collapse		
	η (g)	β
Prior curve	2.044	1.081
Updated curve	0.400	0.071
Damage		
	η (g)	β
Prior curve	0.093	0.302
Updated curve	0.164	0.145

Tabella 5: Parametri delle curve di fragilità prior ed aggiornate

Nell'ambito della determinazione dell'affidabilità di percorso e di rete che verranno presentate in seguito, la capacità delle infrastrutture è stata valutata a partire dal secondo modello di vulnerabilità.

3.5 Affidabilità di percorso

L'analisi di affidabilità ha come scopo quello di fornire per un generico elemento della rete stradale una stima del grado di sicurezza attraverso la valutazione della probabilità di failure (P_j). La probabilità di failure può essere sempre determinata a partire dalla probabilità che il percorso sia connesso in questo modo:

$$P_{Failure} = 1 - P_{Connessione} \quad 31$$

Definendo con l'indice j il generico percorso e con $A_{j,i}$ la frase logica che è vera se l'arco i del percorso j non ha superato lo stato limite, è possibile valutare la probabilità che il percorso resti connesso (nella veritiera ipotesi in cui gli archi siano indipendenti tra loro) nel modo seguente:

$$P_{j \rightarrow Connesso} = P(A_{j,1} \cdot A_{j,2} \cdot \dots \cdot A_{j,N_{archi}}) = \prod_{i=1}^{N_{archi,j}} P(A_{j,i}) \quad 32$$

In linea con quanto scritto fino a questo momento, il percorso stradale è un sistema di componenti in serie che raggiunge la condizione di failure (secondo un approccio sistemico di tipo weakest-link) quando il componente più debole ha superato lo stato limite. Note le distribuzioni di domanda e capacità in termini di PGA per i componenti del percorso così come spiegato nei paragrafi precedenti, è possibile risolvere la valutazione della probabilità di failure attraverso la tecnica di simulazione Monte Carlo con approccio weakest-link tra gli archi del generico percorso:

$$P_F = \int_{\Omega(\mathbf{X})} P(F | \mathbf{X}) \cdot f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) \cdot d\mathbf{x} = \int_{\Omega(\mathbf{X})} I(\mathbf{X}) \cdot f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) \cdot d\mathbf{x} = E[I(\mathbf{X})] \quad 33$$

dove $P(F | \mathbf{X})$ è la probabilità di failure per una generica realizzazione del vettore \mathbf{X} e $I(\mathbf{X})$ è una funzione indicatore pari a:

$$I(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \max_{i=1}^{N_{archi}} \left[\frac{D_i(\mathbf{X})}{C_i(\mathbf{X})} \right] \geq 1 \\ 0 & \text{se } \max_{i=1}^{N_{archi}} \left[\frac{D_i(\mathbf{X})}{C_i(\mathbf{X})} \right] < 1 \end{cases} \quad 34$$

In questo modo attraverso l'elaborazione di N_{sim} simulazioni come spiegato al paragrafo nei paragrafi precedenti è possibile stimare:

$$P_F = E[I(\mathbf{X})] \approx \frac{1}{N_{sim}} \sum_{j=1}^{N_{sim}} I(\mathbf{X}_j) \quad 35$$

dove \mathbf{X}_j è la generica realizzazione del vettore dei parametri incogniti.

3.6 Affidabilità della rete

La rete stradale da un punto di vista sistemico è rappresentata da un certo numero (spesso nell'ordine di diverse centinaia) di diversi percorsi stradali che consentono il collegamento tra due

punti di interesse. I percorsi stradali, che dal punto di vista sistemico sono stati definiti e trattati nella precedente sezione, sono già dei sistemi (di componenti in serie, gli archi) e possono o meno avere archi stradali in comune.

Quando due o più percorsi non hanno alcun componente in comune essi dal punto di vista sistemico sono da ritenersi sistemi in parallelo ed ognuno di essi offre un'alternativa di collegamento completamente indipendente dalle altre (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.a**). In questo caso la perdita di connettività non è determinata dal superamento dello stato limite di un unico percorso bensì dal superamento dello stato limite per tutti i percorsi. La probabilità di failure per un sistema di percorsi in parallelo si specifica dunque come riportato di seguito attraverso la formulazione analitica di un sistema di tipo “link-set”:

$$P_{\text{Rete} \rightarrow \text{Connessa}} = P(T_1 + T_2 + \dots + T_{N_{\text{percorsi}}}) \quad 36$$

in cui T è la frase logica vera se il generico percorso è connesso e A è la frase logica vera se il generico arco non ha superato lo stato limite.

Nel caso più generale possibile però, i percorsi non risultano in parallelo tra loro in quanto uno o più archi stradali possono certamente appartenere a differenti percorsi. Questo è ciò che accade nella quasi totalità dei casi in quanto, grazie alle numerose ridondanze presenti nei collegamenti stradali, è possibile avere un numero elevato di percorsi alternativi che differiscono tra loro talvolta anche per un numero esiguo di componenti. Dal punto di vista sistemico, una rete stradale formata da percorsi che possono essere in maniera mista formati da componenti in serie e in parallelo viene definita sistema “cut-set”.

Dal punto di vista risolutivo, la probabilità di failure della rete può essere determinata a partire dalla probabilità che la rete sia connessa attraverso l'Eq. 31. La probabilità che la rete sia connessa è valutabile in maniera rigorosa attraverso la seguente equazione:

$$P_{\text{Rete} \rightarrow \text{Connessa}} = P(T_1 + T_2 + \dots + T_{N_{\text{percorsi}}}) = \sum_{i=1}^{N_{\text{percorsi}}} P(T_i) - \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N_{\text{percorsi}}} P(T_i \cdot T_j) + \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j \neq k}}^{N_{\text{percorsi}}} P(T_i \cdot T_j \cdot T_k) - \dots \pm \sum_{\substack{i,j,\dots,N=1 \\ i \neq j \neq \dots N}}^{N_{\text{percorsi}}} P(T_i \cdot T_j \cdot \dots \cdot T_{N_{\text{percorsi}}}) \quad 37$$

in cui T è la frase logica vera se il generico percorso è connesso. I termini dell'Eq. 37 successivi al primo dal punto di vista computazionale vanno valutati un numero di volte pari al numero di raggruppamenti possibili degli N archi determinabile attraverso il coefficiente binomiale $\binom{N_{\text{percorsi}}}{c}$

dove c è l'ordine del raggruppamento che va da 2 a N_{archi} . Nell'ipotesi di una rete molto piccola composta da soli 50 percorsi, il solo termine dell'Eq. 37 di ordine 20 dal punto di vista computazionale per essere valutato ha bisogno di un numero di operazione pari a:

$$\binom{50}{20} = \frac{50!}{(50-20)! \cdot 20!} \approx 4.7 \cdot 10^{13}$$

Risulta evidente che valutare la probabilità che la rete sia connessa è un'operazione molto onerosa dal punto di vista computazionale ed i tempi di risposta (anche per una rete di modeste dimensioni) potrebbero non essere compatibili con le esigenze di un sistema di supporto decisionale post-evento; per tale ragione è necessario ricorrere a metodologie approssimate che riducano drasticamente i tempi di calcolo riducendo al minimo l'approssimazione che si commette. Nelle sezioni seguenti si discute di metodi approssimati per la valutazione dell'affidabilità della rete.

3.6.1 Approccio link-set con ipotesi di indipendenza

La probabilità che una rete stradale garantisca la connettività tra due punti può essere scritta senza alcuna perdita di generalità nel seguente modo:

$$P_{Con} = P(T_1 + T_2 + \dots + T_{N_{percorsi}}) = 1 - P(\overline{T_1 + T_2 + \dots + T_{N_{percorsi}}}) = 1 - P(\overline{T_1} \cdot \overline{T_2} \cdot \dots \cdot \overline{T_{N_{percorsi}}}) \quad 38$$

dove T_i rappresenta la frase logica che ha valore vero se il i -esimo percorso è connesso. La $P(\overline{T_1} \cdot \overline{T_2} \cdot \dots \cdot \overline{T_{N_{percorsi}}})$ può essere valutata analiticamente attraverso:

$$P(\overline{T_1} \cdot \overline{T_2} \cdot \dots \cdot \overline{T_{N_{percorsi}}}) = P(\overline{T_1}) \cdot P(\overline{T_2} | \overline{T_1}) \cdot P(\overline{T_3} | \overline{T_1}, \overline{T_2}) \cdot \dots \cdot P(\overline{T_N} | \overline{T_1}, \overline{T_2}, \dots, \overline{T_{N-1}}) \quad 39$$

La stima analitica dei termini della Eq. 39 risulta complicata ed onerosa dal punto di vista pratico/computazionale. Per questa ragione, in via approssimata è possibile effettuare l'ipotesi di indipendenza dei percorsi e così l'Eq. 38 si può scrivere nel modo seguente:

$$P_{Con} = 1 - P(\overline{T_1} \cdot \overline{T_2} \cdot \dots \cdot \overline{T_{N_{percorsi}}}) = 1 - [P(\overline{T_1}) \cdot P(\overline{T_2}) \cdot \dots \cdot P(\overline{T_N})] \quad 40$$

Dal punto di vista sistemico la scrittura dell'Eq. 40 ha il significato di sistema *link-set* tra i percorsi, cioè si sta approssimando la rete ad un sistema in parallelo di percorsi che, a loro volta, sono sottosistemi di componenti in serie (archi stradali).

La probabilità di failure di ognuno dei percorsi nell'Eq. 40 può essere stimata attraverso il metodo di simulazione Monte Carlo attraverso le Eq. 34 e 35.

3.6.2 Approccio frequentistico

Un approccio diverso può essere utilizzato invece per stimare il numero atteso di percorsi che garantiscono la connettività tra due punti della rete stradale.

Volendo ottenere una soluzione pratica che si avvale comunque della metodologia di simulazione Monte Carlo, si può definire per ogni percorso j una funzione indicatore $I(X)$ del vettore dei parametri incerti da cui dipende la funzione di stato limite di ogni componente dei percorsi della rete.

$$I_j(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \max_{i=1}^{N_{\text{archi}}} \left[\frac{D_{j,i}(\mathbf{X})}{C_{j,i}(\mathbf{X})} \right] \geq 1 \\ 1 & \text{se } \max_{i=1}^{N_{\text{archi}}} \left[\frac{D_{j,i}(\mathbf{X})}{C_{j,i}(\mathbf{X})} \right] < 1 \end{cases} \quad 41$$

Per ognuna delle N_{sim} simulazioni è possibile valutare il numero di percorsi che garantiscono la connessione tra due punti della rete i quali, sommati e divisi per il numero di simulazioni rappresentano una stima del valore atteso dei percorsi attivi (Eq. 42).

$$E[N_{\text{percorsi connessi}}] \approx \frac{1}{N_{sim}} \sum_{j=1}^{N_{sim}} \sum_{t=1}^{N_{percorsi}} I_{t,j}(\mathbf{X}_j) \quad 42$$

Attraverso l' Eq. 42 è possibile ottenere una misura del grado di connettività della rete rapportando il valore atteso del numero di percorsi connessi al numero totale di percorsi della rete.

L'approccio frequentistico spiegato in questo paragrafo è quello implementato nella piattaforma WebGIS (descritta nel seguente capitolo) per la valutazione della probabilità di failure della rete stradale.

3.6.3 Forma chiusa approssimata

La forma chiusa presentata con l'Eq.37 presenta, come spiegato nella sezione dedicata, un onere computazionale notevole anche per l'analisi affidabilistica di reti con numero di percorsi medio-basso. Rinunciando ad ottenere la soluzione rigorosa del problema la formula presentata con l'Eq.37 può essere approssimata nel seguente modo:

$$P(T_1 + T_2 + \dots + T_{N_{percorsi}}) = \sum_{i=1}^{N_{percorsi}} P(T_i) - \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N_{percorsi}} P(T_i \cdot T_j) + \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j \neq k}}^{N_{percorsi}} P(T_i \cdot T_j \cdot T_k) \quad 43$$

L'Eq. 43 trascura rispetto all'Eq.37 tutti i termini in cui si valuta la probabilità giunta di raggruppamenti di percorsi da quattro in poi.

3.7 Ottimizzazione multi-criteria

Per fornire un criterio di scelta tra i percorsi, essi sono soggetti ad un operazioni di classificazione ottenuta attraverso l'ottimizzazione di una utility function che tiene conto, intrinsecamente, di differenti criteri di scelta tra i percorsi. I criteri di scelta analizzati in questo lavoro sono basati su tre grandezze: la probabilità di failure del percorso P_f , il tempo di percorrenza normalizzato rispetto al tempo di percorrenza massimo t_{pn} , la percentuale del tratto autostradale del percorso p_{as} .

$$UF = c_1 \cdot P_f + c_2 \cdot t_{pn} + c_3 \cdot (1 - p_{as}) \quad 44$$

La utility function scelta è riportata nell'Eq. 44 e la classificazione dei percorsi prevede di privilegiare i percorsi che minimizzano il valore UF poiché essi minimizzano contemporaneamente i tre criteri precedentemente definiti. I termini c_1 , c_2 e c_3 sono dei coefficienti di peso che di volta in



volta possono essere fissati in modo da dare differente importanza ai diversi criteri. In ogni caso, la somma dei 3 coefficienti deve essere pari a 1.

4 Implementazione di un DSS in near-real time per un esempio di gestione dell'emergenza post-evento di una rete di infrastrutture

La metodologia descritta nei precedenti capitoli è stata implementata (attraverso la suddivisione della stessa in diverse routine informatiche) in una piattaforma software che rappresenta esaustivamente un sistema di supporto decisionale di grande rilevanza per la gestione di una rete infrastrutturale in situazioni di post-emergenza. Il principio attraverso il quale si è perseguito questo obiettivo è che in seguito ad un evento sismico una delle priorità per l'organizzazione e la mobilitazione dei soccorsi è rappresentata dalla conoscenza dello stato di efficienza delle infrastrutture di trasporto che determinano in maniera preponderante l'efficienza dei collegamenti.

Nei successivi paragrafi viene descritto il funzionamento del sistema di supporto decisionale post-emergenza presentando un esempio di collegamento tra le città di Benevento ed Avellino che ricadono nell'area geografica individuata come dimostratore del progetto. Lo scenario scelto per la descrizione del DSS è quello prodotto dall'evento storico che ha interessato le provincie il 23 Novembre del 1980 con una magnitudo di 6.9. L'implementazione delle routine e la produzione dei risultati riportati in questo documento è stata realizzata attraverso un'interfaccia software dal nome "Network Reliability Analysis Tool" realizzata ad hoc per mettere a punto le routine implementate nella piattaforma server WebGIS.

Tutto quanto è descritto senza scendere nel particolare degli aspetti metodologici che sono stati già esaustivamente trattati nei capitoli precedenti.

4.1 Identificazione dei percorsi e delle infrastrutture coinvolte nell'area di interesse

Avendo come obiettivo la valutazione affidabilistica della rete stradale che deve consentire il collegamento tra le provincie di Benevento ed Avellino, l'algoritmo per la ricerca dei percorsi alternativi è stato utile per identificare le differenti possibilità nel collegamento. Sono stati ricercate 25 possibili alternative (di cui solo 4 riportate in Figura 21 a titolo di esempio) impostando come parametri di ricerca un massimo di 5000 alternative da considerare e un numero di tentativi di convergenza pari a 200.

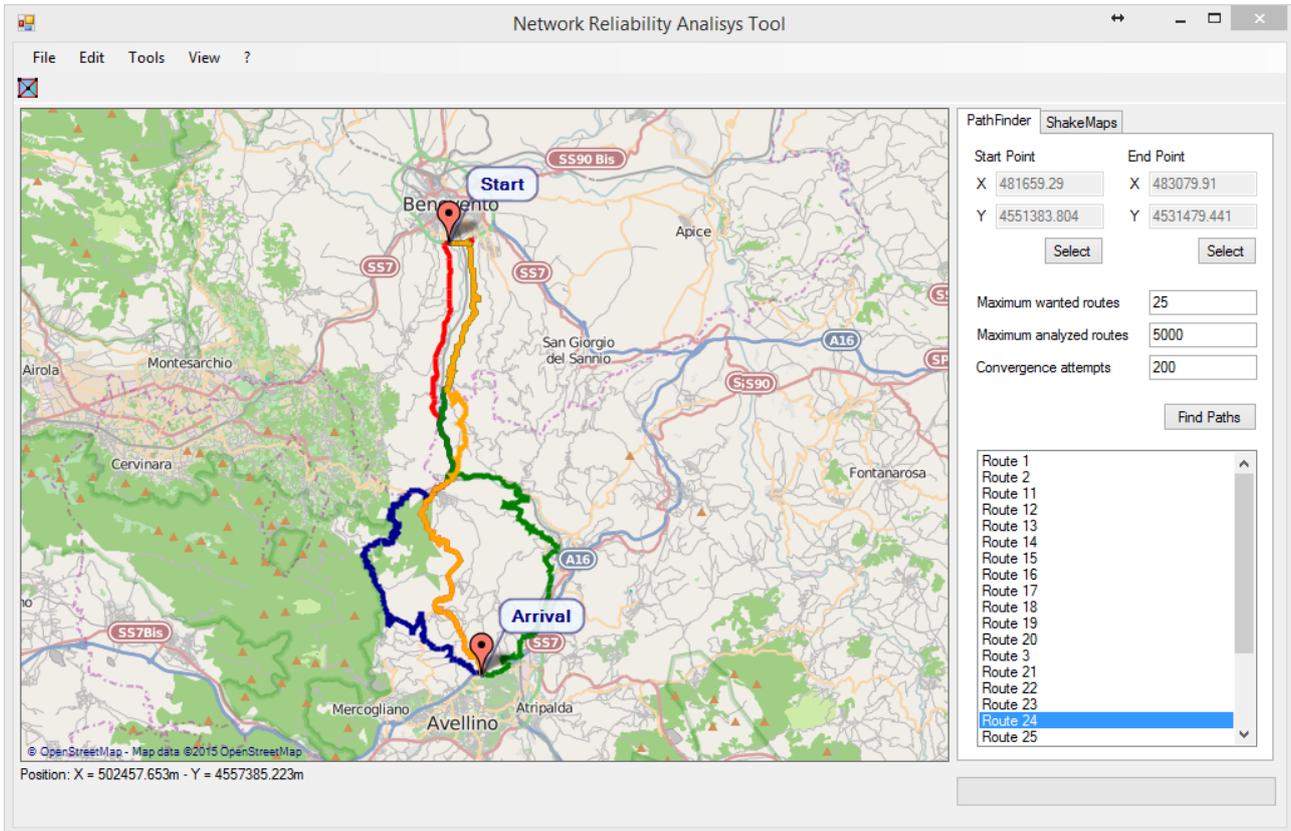


Figura 21: Rappresentazione di 4 percorsi alternativi nel collegamento BN-AV (percorsi #17, #18, #23, #24)

I percorsi individuati possono differire per alcuni o tutti gli archi stradali interessando differenti infrastrutture (i.e. ponti). Inoltre, strettamente correlato ad ogni percorso vi è un bagaglio di informazioni che interessano la capacità e la qualità del trasporto che ognuno di essi può assicurare in termini di tempi di percorrenza, velocità, traffico, percentuale autostradale, etc. Tale studio rappresenta quindi la definizione dall'insieme di dati attraverso i quali dal punto di vista affidabilistico è possibile esprimere un giudizio.

4.2 Generazione di shakemaps post-evento per il portfolio di infrastrutture

Attraverso la metodologia descritta in precedenza, in seguito all'evento sismico che è avvenuto (nel caso di questo esempio l'evento di Irpinia e Basilicata del 1980) è possibile determinare per il portfolio di infrastrutture che insiste sulla rete stradale di interesse: (a) un numero definito di campi di PGA simulate attese; (b) un numero definito di campi di PGA capace. In particolare per l'esempio considerato, sono stati definiti: l'attivazione della specifica faglia che prodotto l'evento di Irpinia e Basilicata del 1980; la sua magnitudo pari a 6.9; la tipologia di faglia normale; l'utilizzo della legge di attenuazione di Bindi, Pacor et al. (2011); l'utilizzo della correlazione inter- ed intra-evento di Esposito and Iervolino (2012).

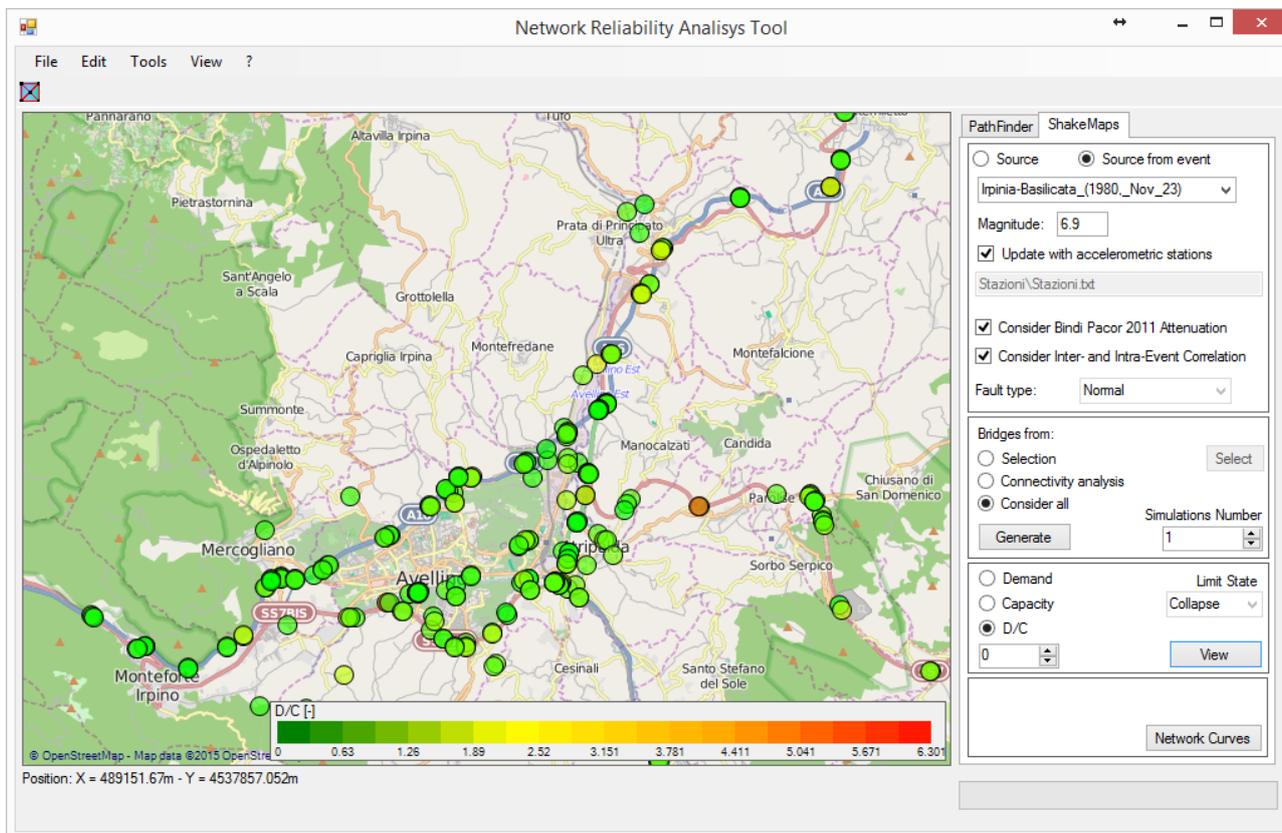


Figura 22: D/C in termini di PGA per i ponti dell'avellinese

In Figura 22 è rappresentato attraverso una scala di colori, il rapporto di PGA di domanda su PGA capace per una simulazione allo stato limite di collasso dei ponti presenti nell'area avellinese che rappresenta certamente un quadro sullo stato di salute del patrimonio infrastrutturale per l'evento considerato. Il portfolio di infrastrutture viene poi filtrato in base alla rete stradale di interesse e, coerentemente con i percorsi riportati a titolo di esempio nella Figura 21, si rappresentano in Figura 23, i ponti interessati dai percorsi evidenziati.

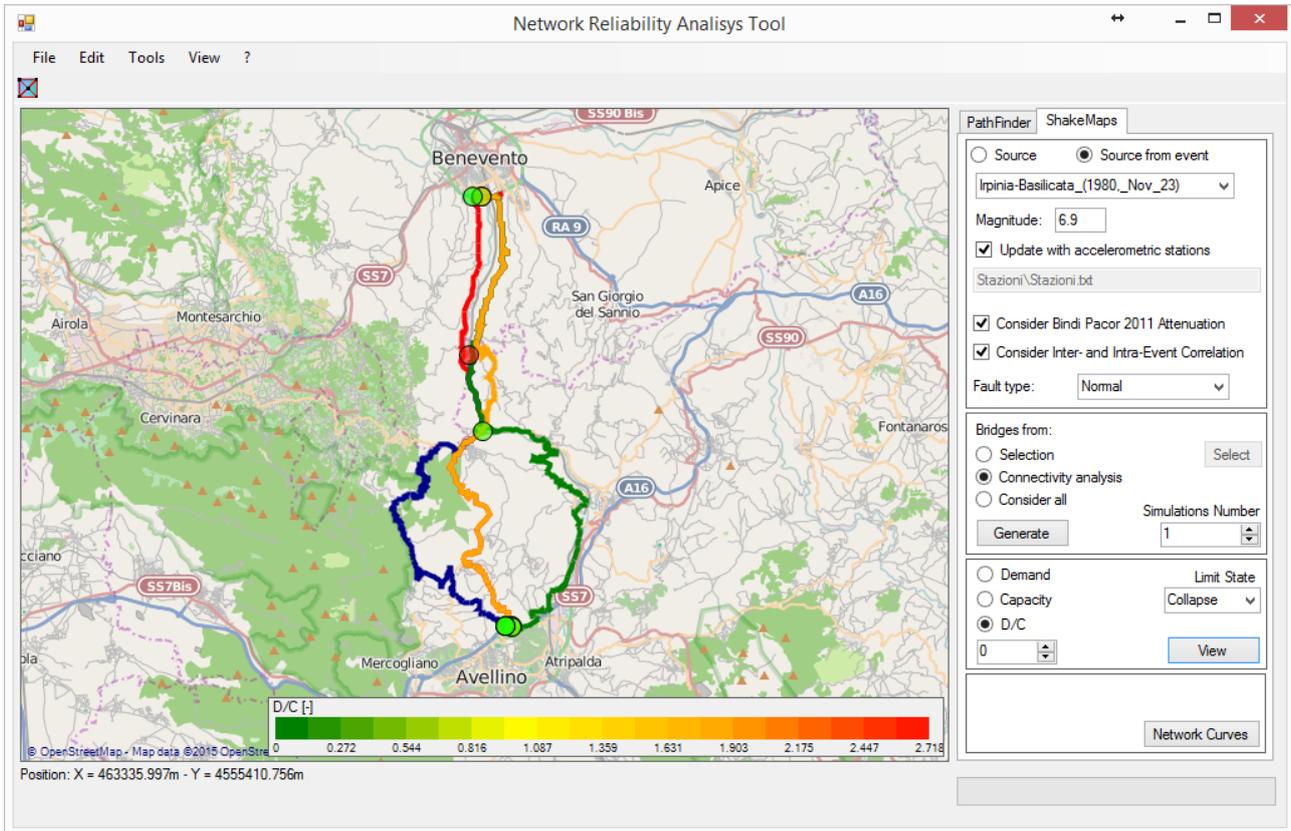
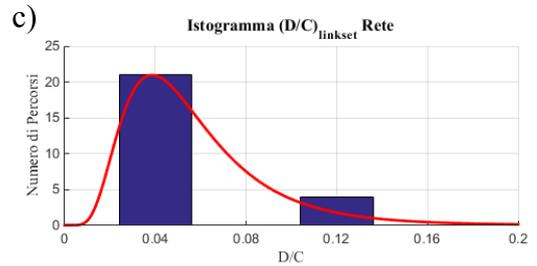
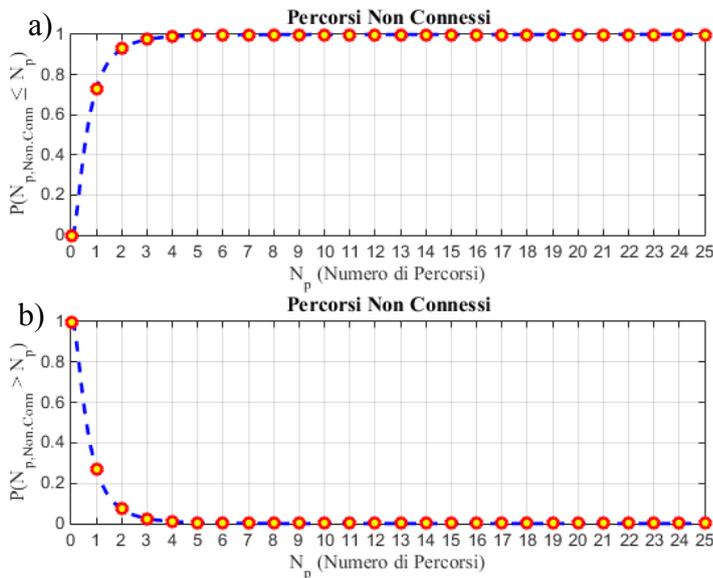


Figura 23: D/C in termini di PGA per i ponti interessati dai percorsi #17, #18, #23, #24.

4.3 Analisi di affidabilità della rete e processi decisionali multicriteri per prioritizzare i percorsi

Attraverso l'analisi di affidabilità (di cui ai capitoli precedenti) con un approccio di tipo link-set, si perviene alla conoscenza della distribuzione del valore dei rapporti domanda su capacità in termini di PGA per tutti i percorsi individuati, fittati con una distribuzione log-normale come riportato in Figura 24c. Inoltre, dal punto di vista di affidabilità della rete in termini di connettività, è possibile conoscere la distribuzione cumulata di probabilità del numero di percorsi non connessi (Figura 25a,b) da cui desumere il numero atteso di percorsi non connessi (in questo esempio pari a 1) e le altre informazioni riportate in Figura 25c.



d)

INFORMAZIONI SULLA RETE:
 Valore atteso percorsi non connessi: 1
 Deviazione standard rispetto al valore atteso: 0.74454
 Intervallo di confidenza percorsi non connessi: [0 - 2]
 Percentuale attesa di percorsi non connessi sul totale: 0.02
 Percentuale attesa di percorsi connessi sul totale: 0.98

Figura 24: Informazioni affidabilistiche sui percorsi. (a) CDF del numero di percorsi non connessi. (b) CCDF del numero di percorsi non connessi. (c) Distribuzione dei rapporti D/C dei percorsi in termini di PGA. (d) informazioni affidabilistiche sulla connettività rete.

Note le quantità affidabilistiche di ogni percorso e le caratteristiche di ogni percorso è possibile classificare i percorsi alternativi considerati ottimizzando il valore della utility function riportata al paragrafo 3.7. In Figura 25 si mostra il ranking dei percorsi per la rete esaminata considerando $c_1=0.6$, $c_2=0.1$ e $c_3=0.3$.

ID	Lung	% Auto	tempo	nPonti	LungPont	ExpLoss	Pf	Beta
[-]	[km]	[-]	[min]	[#]	[km]	[mil€]	[-]	[-]
10	18.689	0.1024	16	3	0.400	0.062	0.0070	2.4573
11	18.790	0.1019	16	3	0.400	0.063	0.0070	2.4573
22	14.591	0.0000	13	4	0.484	0.070	0.0080	2.4089
20	14.603	0.0000	13	4	0.484	0.069	0.0080	2.4089
23	14.692	0.0000	13	4	0.484	0.071	0.0080	2.4089
21	14.704	0.0000	13	4	0.484	0.071	0.0080	2.4089
18	15.035	0.0000	13	4	0.484	0.074	0.0080	2.4089
19	15.136	0.0000	13	4	0.484	0.067	0.0080	2.4089
16	17.806	0.0392	15	3	0.400	0.062	0.0070	2.4573
1	17.458	0.0391	15	3	0.400	0.062	0.0070	2.4573
2	17.492	0.0391	15	3	0.400	0.062	0.0070	2.4573
17	17.907	0.0389	15	3	0.400	0.064	0.0070	2.4573
3	17.592	0.0388	15	3	0.400	0.064	0.0070	2.4573
24	17.882	0.0382	15	3	0.400	0.063	0.0070	2.4573
25	17.983	0.0380	15	3	0.400	0.062	0.0070	2.4573
8	17.751	0.0385	16	3	0.400	0.064	0.0070	2.4573
9	17.852	0.0383	16	3	0.400	0.063	0.0070	2.4573
6	18.356	0.0372	16	3	0.400	0.063	0.0070	2.4573
7	18.456	0.0370	16	3	0.400	0.064	0.0070	2.4573
14	16.835	0.0000	15	3	0.400	0.062	0.0070	2.4573
15	16.935	0.0000	15	3	0.400	0.063	0.0070	2.4573
12	106.351	0.0007	69	11	1.727	0.591	0.1120	1.2160
13	106.422	0.0007	69	11	1.727	0.595	0.1120	1.2160
4	136.256	0.0050	92	16	2.473	0.669	0.1150	1.2004
5	136.328	0.0050	92	16	2.473	0.668	0.1150	1.2004

Figura 25: Ranking dei percorsi attraverso l'ottimizzazione multicriteria

4.4 Sviluppo piattaforma GIS-based con possibilità di connessione con rete AMRA per aggiornamento in near-real time

L'implementazione del DSS per la quale si è mostrato un esempio nei precedenti paragrafi di questo capitolo, è stata integrata all'interno della piattaforma server WebGIS e lo schema generale di funzionamento è riportato in Figura 26.

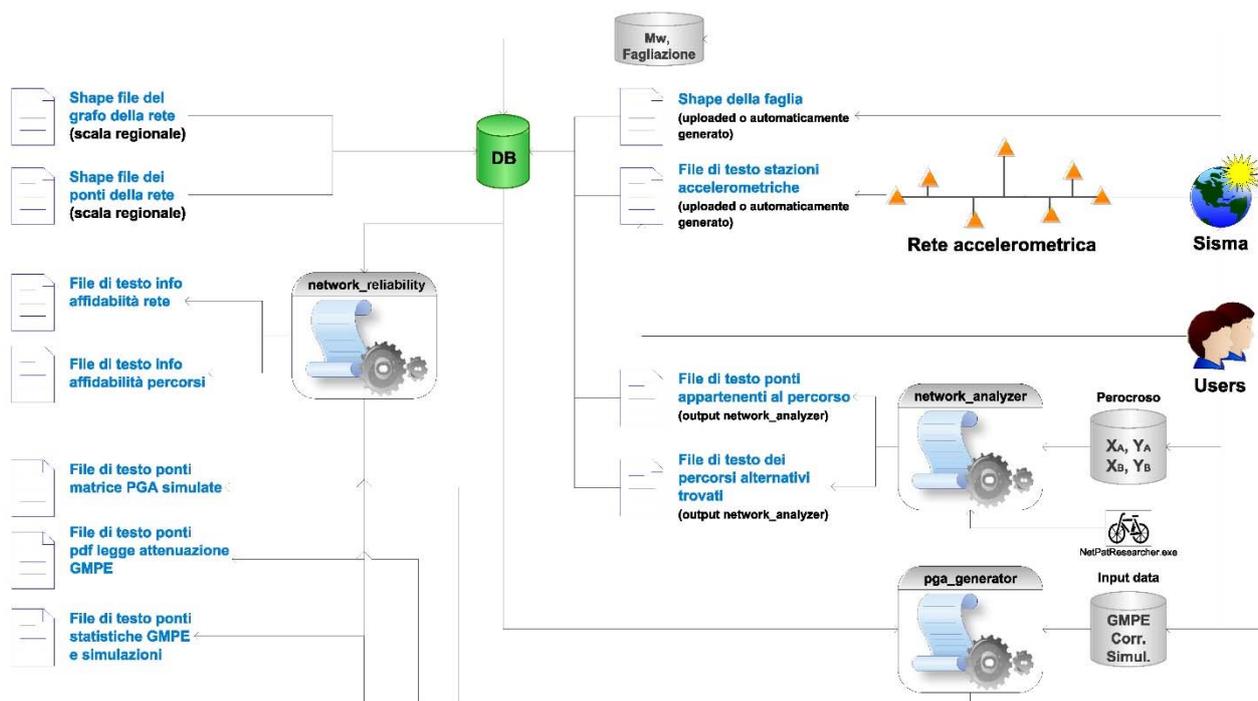


Figura 26: Schema di funzionamento del DSS sulla piattaforma server WebGIS.

L'implementazione del DSS è stata progettata per consentire il seguente meccanismo di funzionamento che di seguito viene riassunto. L'utente definisce sulla piattaforma i punti di partenza ed arrivo della rete da analizzare insieme a tutti i parametri di input necessari all'esecuzione delle analisi. Sceglie se eseguire o no l'aggiornamento dei campi di PGA attraverso l'interazione con le stazioni accelerometriche della rete ISNET o attraverso dati accelerometrici inseriti attraverso un file. Sceglie se considerare o meno la correlazione inter- e intra-evento ed il numero di simulazioni da eseguire. L'utente decide in oltre se considerare uno scenario storico, o uno scenario prodotto dall'attivazione di una faglia definita. I campi di PGA generati possono essere visualizzati ed esportati, così come tutte le elaborazioni affidabilistiche relative alla rete e ai percorsi.

5 Implementazione di un DSS per la gestione, l'adeguamento e la manutenzione di una rete di infrastrutture

5.1 Analisi di PSHA simulation based

Per la gestione e la manutenzione ordinaria della rete di infrastrutture di trasporto un'analisi di pericolosità sismica è necessaria al fine di considerare il livello di domanda sismica richiesto per le infrastrutture durante la loro vita utile. In questo lavoro è stata condotta la Probabilistic and Seismic Hazard Analysis (PSHA) attraverso la generazione di scenari sismici (in un'ottica simulation based) per i quali, la domanda sismica afferente ad ognuna delle infrastrutture della rete viene valutata secondo l'approccio spiegato nel capitolo 2.

Lo strumento utilizzato per l'esecuzione della PSHA non è oggetto di questo progetto di ricerca per tanto si procede in questo paragrafo ad una breve descrizione delle operazioni costituenti la PSHA in un approccio simulation based.

Partendo dall'anagrafe delle sorgenti sismiche identificate dall'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), sono state considerate in questo lavoro tutte quelle capaci di produrre terremoti in grado di far percepire effetti sensibili per tutta la regione Campania. In maniera semplificata, quindi, sono state prese in considerazione solo le faglie che rientrano in un buffer di 100km intorno alla regione Campania (Figura 27).

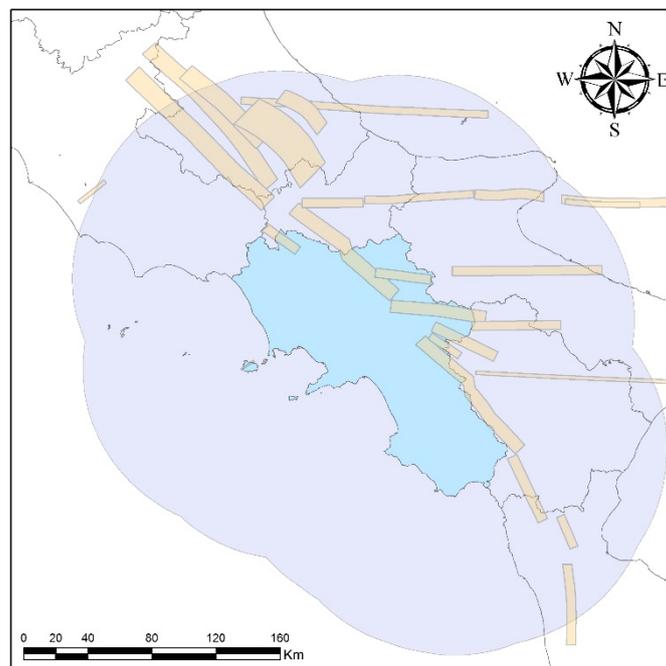


Figura 27: Sorgenti sismiche considerate per la PSHA

Ogni faglia è caratterizzata da un suo valore di sismicità valutabile attraverso l'Eq. (46) dove: μ è la rigidità del sottosuolo; A è l'area della faglia; S è lo slip-rate (cm/anno); M_{min} è la magnitudo minima; M_{max} è la magnitudo massima; a e b sono i parametri che caratterizzano la legge di

magnitudo della faglia; $f_M(m)$ è la PDF della magnitudo (ad esempio può essere stimata attraverso (Gutenberg and Richter 1954)).

$$N(M_{\min}) = \frac{\mu \cdot A \cdot S}{\int_{M_{\min}}^{M_{\max}} 10^{a \cdot m + b} \cdot f_M(m) \cdot dm} \quad 45$$

Considerando la CDF delle sismicità riportata in Figura 28, per ognuna delle simulazioni una faglia viene estratta a partire dall'estrazione di un numero random tra 0 e 1 sull'asse delle ordinate.

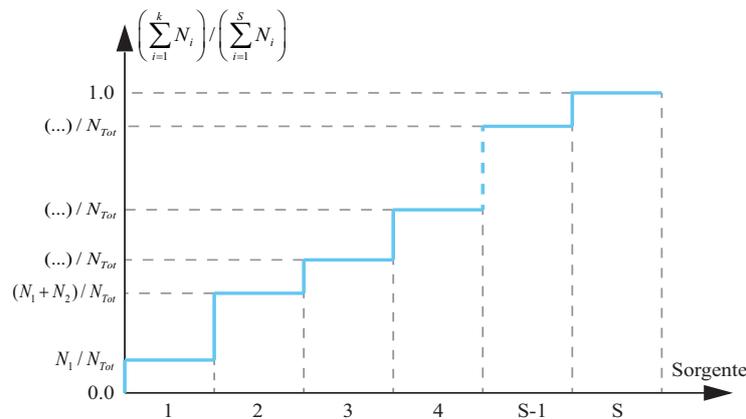


Figura 28: CDF delle sismicità per la simulazione della sorgente sismica

Nota la distribuzione di probabilità di magnitudo della faglia (Gutenberg and Richter 1954), viene estratto un valore di magnitudo dal quale è possibile determinare l'estensione dell'area di rottura e la larghezza della frattura (compatibili con la magnitudo simulata) attraverso quanto proposto da Wells and Coppersmith (1994). Nota l'estensione geometrica dell'area di frattura è possibile simulare la posizione all'interno della faglia considerata. A questo punto lo scenario simulato risulta completamente definito in quanto sono noti posizione ed estensione dell'area di rottura e magnitudo dell'evento per cui è possibile procedere con la valutazione della domanda sismica per ogni infrastruttura così come spiegato nel capitolo 2.

5.2 Modello dei costi di riparazione per stato limite

In questo paragrafo viene caratterizzata la determinazione del valore dell'esposizione, ossia delle perdite economiche, per i ponti a travata; in particolare, è stata svolta un'ampia ricerca bibliografica, volta a stabilire i costi medi di riparazione per ponte, associati agli stati limite considerati.

Si procede con una panoramica su tutti gli articoli, che sono stati vagliati nella ricerca dell'obiettivo dell'identificazione dei costi medi di riparazione per stato limite. Data la scarsità di lavori italiani, sono stati presi in considerazione principalmente articoli statunitensi, con l'accortezza di prestare l'attenzione massima nel confronto tra gli stati limite statunitensi ed italiani ed in quello tra le tipologie di ponte prese in esame.

Ad esempio un articolo considerato è un lavoro di Padgett et al. (2009) "Risk-based seismic life cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment". In questo lavoro si

identificano 4 stati limite principali; in particolare quelli di danno leggero, di danno moderato, di danno esteso e di collasso. Inoltre ad ognuno di questi stati limite è associato il miglior rapporto di costo di riparazione.

Un altro articolo è un lavoro di Mander e Solberg (2006) “A rapid financial seismic risk assessment methodology with application to bridge piers”. In questo caso si associano a 5 stati limite, sostanzialmente corrispondenti a quelli dell’articolo precedente (Nessun danno; Danno leggero; Danno moderato; Danno esteso; Collasso), le operazioni necessarie per riparare il ponte ed i tempi necessari per fare ciò.

Un altro lavoro, che raccoglie in sé le informazioni riscontrate singolarmente nei precedenti e da cui gli stessi prendono spunto per un lavoro più approfondito sui singoli aspetti che prendono in considerazione, è il lavoro di John Mander (1999) “Fragility curve development for assessing the seismic vulnerability of highway bridges”.

Per quanto riguarda gli stati limite americani considerati nei vari articoli, si può assumere che essi siano i 5 visti in maniera diversa nei vari articoli, ma pressochè coincidenti nel contenuto. Essi risultano essere:

1. No damage (nessun danno);
2. Slight/minor damage (danno leggero);
3. Moderate damage (danno moderato);
4. Severe/major damage (danno severo);
5. Collapse (collasso).

A questo punto si propongono due definizioni dettagliate dei suddetti stati limite, presenti rispettivamente nell’articolo 4 ed in quello 10 del paragrafo precedente. Si comincia dalle definizioni fornite nell’articolo 4:

1. Nessun danno: nessun danno riscontrabile dovuto al terremoto;
2. Danno leggero: nessun pericolo di collasso strutturale imminente; danni facilmente riparabili, come piccole lesioni nel copriferro e fessure superficiali nelle colonne, fessure nelle cerniere, leggeri movimenti o cedimenti di spalle e/o cerniere;
3. Danno moderato: espulsione del copriferro delle colonne o fessure da taglio che sopraggiungono senza il fenomeno del “buckling”; danni sostanziali a pile/spalle o nei nodi;
4. Danno severo: espulsione del copriferro delle colonne e “buckling” delle barre esteso per una lunghezza pari al diametro della colonna o anche più, rottura della fondazione o casi in cui ci siano severi danni alle cerniere ed alle zone circostanti;
5. Collasso: la sovrastruttura si scolla dai suoi supporti o gli stessi supporti si rompono.

Si passa ora all’analisi della definizione degli stessi stati limite, fornita nell’articolo 10, così da poter testimoniare l’omogeneità nella definizione degli stati limite tra i vari articoli sopracitati:

1. Nessun danno: nessun danno riscontrabile dovuto al terremoto;
2. Danno leggero: fessure nelle colonne di cemento armato; fessure nei moli in cemento dovute alla deformazione dell’acciaio posizionato negli appoggi (longitudinale e trasversale) e a quella trasversale dell’acciaio piegato nello stesso appoggio. Danni negli appoggi all’acciaio piegato e negli appoggi elastomerici fissi ed in quelli liberi per uno spostamento longitudinale corrispondente a 0-25.4mm. Fessurazioni nella spalla in corrispondenza dell’interfaccia sovrastruttura-spalla. Danni agli appoggi elastomerici fissi e liberi per uno spostamento trasversale corrispondente a 0-25.4mm all’altezza dell’espansione del nodo. Deformazione attiva della spalla corrispondente ad un leggero cedimento di circa 0-25.4mm.

3. Danno moderato: espulsione del copriferro delle colonne in cemento armato. Estese e severe deformazioni dei bulloni di ancoraggio negli appoggi fissi in acciaio (longitudinale e trasversale) e in quelli con acciaio piegato (trasversale). Danni negli appoggi all'acciaio piegato e negli appoggi elastomerici fissi ed in quelli liberi per uno spostamento longitudinale corrispondente a 25.4-152.4mm. Danni agli appoggi elastomerici fissi e liberi per uno spostamento trasversale corrispondente a 25.4-152.4mm all'altezza dell'espansione del nodo. Moderata fessurazione ed espulsione del copriferro o rotazione nella spalla. Deformazione attiva della spalla corrispondente ad un moderato cedimento di circa 25.4-152.4mm.
4. Danno severo: danno flessionale severo nelle colonne di cemento armato nella forma di "buckling" delle barre di rinforzo ma non complete collasso delle colonne. Rottura completa dei bulloni di ancoraggio osservata negli appoggi fissi in acciaio (longitudinale e trasversale) ed in quelli con acciaio piegato (trasversali). Danni negli appoggi all'acciaio piegato e negli appoggi elastomerici fissi ed in quelli liberi per uno spostamento longitudinale maggiore di 152.4mm. Danni agli appoggi elastomerici fissi e liberi per uno spostamento trasversale maggiore di 152.4mm all'altezza dell'espansione del nodo. Deformazione attiva della spalla corrispondente ad un severo cedimento di più di 152.4mm.
5. Collasso: completo collasso delle colonne in cemento armato. Superamento delle tipiche larghezze di appoggio, che possono essere segnale premonitore di un imminente collasso di tipo strutturale dell'impalcato.

A questo punto sulla base degli elementi raccolti, si propone una correlazione tra gli stati limite americani e quelli italiani/europei. Per quanto riguarda questi ultimi, come già visto nel capitolo precedente, si fa riferimento allo stato limite di danno e a quello di collasso. Questo ultimo viene assunto coincidente con lo stato limite di "collapse" americano, in quanto esprimono esattamente lo stesso concetto, ossia il collasso strutturale del ponte/elemento. Il discorso, invece, diventa più complesso nella scelta della correlazione tra lo stato limite di danno italiano ed un suo omologo tra quelli americani. Date le indicazioni fornite da un lato nell'Eurocodice e dall'altro nelle precedenti definizioni, che si richiamano esplicitamente alle normative americane, si è scelto di equiparare lo stato limite di danno con lo stato limite di "moderate damage" americano. E' chiaro che la forbice presente nel modello americano va a dettagliare meglio le diverse tipologie di danno che fanno sì da attingere ogni determinato stato limite, ma si può presumere che i danni necessari per raggiungere lo stato limite di "moderate damage" potrebbero essere simili a quelli riscontrabili in concomitanza del superamento dei valori limite di rotazione della corda e di taglio, proposti nell'Eurocodice come valori limite per il raggiungimento dello stato limite di danno. Il lettore è comunque in possesso di tutti i dati per poter valutare il paragone, in quanto si sottolinea che è stata effettuata in ogni caso una scelta soggettiva.

In definitiva, si propone una tabella riassuntiva dei dati raccolti.

Damage limit state	SCDOT	DATA
Number of elements	-	190
Publication year	2008	From 1994 to 2010
Distribution type	Lognormal	Lognormal
Expected value (euro/m ²)	68.1	121
COV	15.5	160

Collapse limit state	SCDOT	DATA
Number of elements	-	9
Publication year	2008	1994
Distribution type	Lognormal	Exponential
Expected value (euro/m ²)	851.4	2343
COV	15.5	58.7

Tabella 6: Riepilogo dei dati per i due stati limite considerati

A questo punto è stato effettuato un aggiornamento bayesiano dei costi sulla base di costi effettivamente sostenuti per terremoti reali del passato. Lo schema di aggiornamento è quello già descritto nella parte di deliverable relative alle curve di fragilità.

La tabella seguente riporta i parametri delle distribuzioni prior, likelihood, e posterior, mentre la figura seguente riporta tali distribuzioni, il tutto per gli stati limite sia di danno che di collasso.

Damage	Mean (€/m²)	Median (€/m²)	Std (€/m²)	Std log	COV (%)
Prior distribution	68.1	67.3	10.6	0.15	15.5
Likelihood distribution	121	64.2	194	1.13	160
Posterior distribution	68.8	68.3	8.44	0.12	12.3
Collapse	Mean (€/m²)	Median (€/m²)	Std (€/m²)	Std log	COV (%)
Prior distribution	851	841	132	0.15	15.5
Likelihood distribution	2340	2020	1380	0.54	58.7
Posterior distribution	1110	1100	143	0.13	12.9

Tabella 7: Parametri delle distribuzioni dei costi.

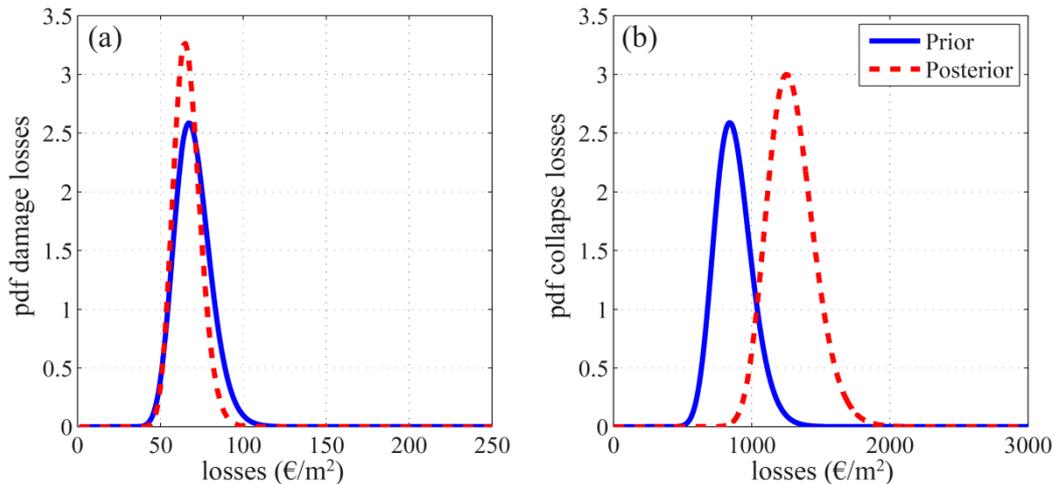


Figura 29 Distribuzioni dei costi “prior” e “posterior” per gli stati limite di danno (a) e collasso(b).

5.3 Modello dei costi di manutenzione ordinaria e di down time

Il costo di manutenzione ordinaria per un’infrastruttura, chiamato CM può essere stimato come di seguito:

$$C_M = \int_0^{t_{life}} C_m e^{-\lambda_d t} dt = \frac{C_m}{\lambda_d} [1 - e^{-\lambda_d t_{life}}] \quad 46$$

dove:

C_m è il costo costante di manutenzione annua;

λ_d è il tasso annuo di attualizzazione e lo si assume pari a 0.05;

$\exp(-\lambda_d t)$ denota il cambiamento nelle valutazioni monetarie basato sul tempo;

t_{life} è il tempo di vita utile dell’infrastruttura, a partire dal momento in cui si inizia l’analisi del rischio.

Tali costi di manutenzione non dipendono dallo stato limite che può attingere l’infrastruttura, ma sono solo funzione del costo iniziale, del tasso di attualizzazione e della vita utile dell’infrastruttura stessa.

In particolare è il termine C_m ad essere funzione del costo iniziale. Infatti si assume che:

$$C_m [\text{€ / year}] = 0.01 * C_o \quad 47$$

dove C_o è il costo iniziale di costruzione dell’infrastruttura.

Per quanto riguarda il costo di down-time, ossia il costo legato alla perdita della possibilità di utilizzo, lo si fa dallo stato limite considerato così come fatto per il costo di riparazione dello stato limite stesso.

In definitiva il costo totale legato al raggiunto di uno dei due stati limiti già ampiamente utilizzati si compone di una due parti, la prima legata al costo di down-time e la seconda legata al

costo effettivo necessario per riportare la struttura nel suo stato intatto precedente l'attingimento dello stato limite:

$$LSC_{ls} = DTC \cdot e^{-\lambda_d \tau} + RC_{ls} \quad 48$$

dove:

DTC è il costo annuo di inattività ed è pari a $1 \cdot 10^6$ €/year;

$\exp(-\lambda_d \tau)$ indica il cambiamento nelle valutazioni monetarie basato sul tempo di riparazione dove λ_d è fissato a 0,05 e τ è pari a 0.5 per lo stato limite di danno, mentre è pari a 1 per lo stato limite di collasso;

RCls è il costo di riparazione associato allo stato limite in esame, con $ls = 1$ e $NLS = 2$, dove i valori di RCls sono stati ampiamente descritti nei paragrafi precedenti.

5.4 Valutazione delle perdite attese per un sistema di infrastrutture

I costi totali L per un sistema di infrastrutture possono calcolarsi come la somma dei costi totali di riparazione per ogni singolo ponte concorrente ai costi totali:

$$L = \sum_{i=1}^{N_{BRIDGES}} RC_i \quad 49$$

dove il generico costo Rci vale:

$$RC_i = C_{Ri} + C_{Mi} \quad 50$$

e dove:

Nbridges è il numero totale di ponti all'interno del portfolio ed Rci è il costo totale per il ponte i, che tiene conto dei costi di riparazione per stato limite, di quelli di down-time e di quelli di manutenzione. La probabilità che il costo totale di riparazione ecceda uno specifico valore l si calcola come:

$$P(L > l) = \int_{\Omega_\theta} I(L > l | \theta) \cdot p(\theta) \cdot d\theta \approx \frac{\sum_{i=1}^{N_{sim}} I(L > l | \theta_i)}{N_{sim}} \quad 51$$

Dove:

θ è il vettore di tutti i parametri di incertezza che influenzano L ; $p(\theta)$ è la funzione giunta di densità di probabilità per i componenti di θ ; $I(L>l|\theta)$ è una funzione indicatore uguale a 1 se $L>l$, altrimenti a zero. Nell'equazione precedente, l'integrale può essere approssimato usando la simulazione Monte Carlo con N_{sim} numero di simulazioni. Fissando $\theta=[\mathbf{IM}, \mathbf{PGA}_{LS}, \mathbf{DS}, \mathbf{RC}]$, l'espressione precedente può essere riscritta come:

$$P(L > l) = \sum_{\Omega_{[\mathbf{IM}, \mathbf{PGA}_{LS}, \mathbf{RC}]}}^{N_{DS}} \int I(L > l | \mathbf{RC}, \mathbf{DS}) \cdot f(\mathbf{RC} | \mathbf{DS}) \cdot P(\mathbf{DS} | \mathbf{PGA}_{LS}, \mathbf{IM}) \cdot f(\mathbf{PGA}_{LS}) \cdot \dots \cdot f(\mathbf{IM}) \cdot d\mathbf{RC} \cdot d\mathbf{PGA}_{LS} \cdot d\mathbf{IM} \quad 52$$

dove \mathbf{IM} è il vettore dei valori di intensità di misura per il sito di ogni ponte; \mathbf{PGA}_{LS} è il vettore delle capacità per stato limite espresso in PGA per ogni infrastruttura; \mathbf{DS} è il vettore degli stati di danno per ogni ponte e N_{DS} è il numero di stati limite considerati; \mathbf{RC} è il vettore dei costi di riparazione valutati per ogni ponte; $f(\mathbf{IM})$ è la funzione di densità di probabilità giunta per il vettore \mathbf{IM} ; $P(\mathbf{DS}|\mathbf{IM}, \mathbf{PGA}_{LS})$ è la funzione di massa di probabilità giunta per stati di danno di tutti i ponti all'interno della rete dati \mathbf{IM} e \mathbf{PGA}_{LS} ; $f(\mathbf{RC}|\mathbf{DS})$ è la funzione di densità di probabilità per il vettore dei costi di riparazione \mathbf{RC} dato \mathbf{DS} .

Sulla base di alcune assunzioni semplificative, la dimensione del vettore dei parametri di incertezza può ridursi significativamente. Infatti si assume che:

Il portfolio studiato è caratterizzato da una sola classe di ponti (sono tutti ponti autostradali in c.a.);

Le capacità per stato limite dei diversi ponti sono indipendenti dai corrispondenti valori di \mathbf{IM} ;

La distribuzione dei costi di riparazione dato lo stato limite è indipendente dai corrispondenti valori di \mathbf{IM} .

Tale procedura è stata implementata per un caso studio. In particolare si sono valutate le perdite attese per un sistema di infrastrutture costituito da tutti i ponti autostradali in c.a. afferenti alla regione Campania. Considerando un modello di "hazard" con correlazione spaziale completa ed il database di curve di fragilità analizzato nei capitoli precedenti, viene fuori che le perdite attese per il detto sistema infrastrutturale, valutate fino all'anno 2055, si aggira intorno agli 82 milioni di euro con un C.O.V(%) vicino all'80%.

5.5 Processo di disaggregazione dei costi

Al fine di quantificare il contributo di ogni ponte per il totale delle perdite dirette attese, il costo totale è disaggregato. La disaggregazione avviene mediante il calcolo delle perdite totali dirette per ogni simulazione del campo PGA. Nella fase successiva, le perdite attese simulate per ogni ponte sono normalizzate rispetto ai costi totali calcolati per ogni simulazione. Infine, è calcolata la percentuale afferente ad ogni ponte rispetto alla perdita totale come valore medio, su tutte le simulazioni, dei costi di riparazione normalizzati per ponte e per simulazione, calcolati nello step appena descritto. Vale la pena ricordare che la disaggregazione dei costi sarebbe più utile per un portfolio di ponti non omogeneo in termini di vulnerabilità. In altre parole, la disaggregazione risulterebbe un mezzo adeguato per riflettere la relativa criticità di ciascun ponte all'interno del portfolio, considerando sia la pericolosità sismica che vulnerabilità che le perdite attese. In questo lavoro, visto che il portfolio è considerato omogeneo (sia in termini di vulnerabilità che di costi

riparazione), la disaggregazione riflette la criticità di ciascun ponte in termini di pericolosità sismica e di dimensioni geometriche delle infrastrutture.

La Figura 30a mostra la disaggregazione delle perdite dirette attese per il modello di portfolio completamente correlato descritto nei paragrafi precedenti, con la considerazione dell'aggiornamento con i dati delle registrazioni accelerometriche e della correlazione completa (entrambe le correlazioni di tipo inter e intra). La Figura 30b mostra solo i ponti più critici all'interno del portfolio.

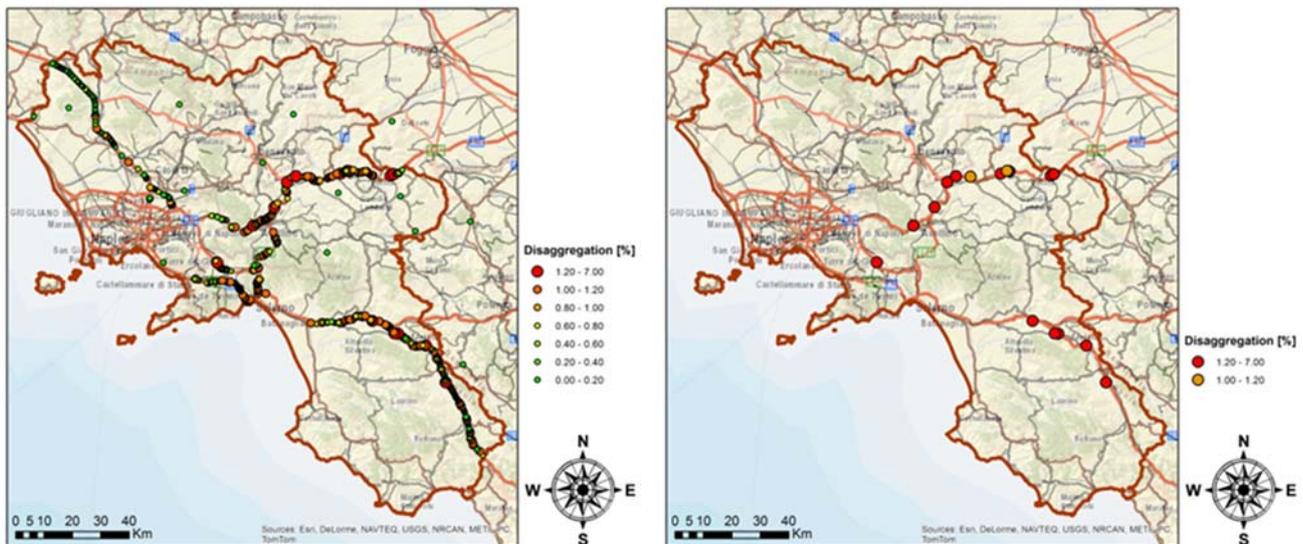


Figura 30: (a) Disaggregazione delle perdite dirette attese per il modello di portfolio completamente correlato (b) Ponti più critici all'interno del portfolio.

5.6 Gestione di una rete di infrastrutture sulla base di un processo decisionale multicriterio

Nell'ambito della gestione di una rete sulla base di un processo decisionale multicriterio, risulta di fondamentale importanza la scelta dei parametri sui quali pesare la prioritizzazione del rischio per le varie infrastrutture della rete.

Tale scelta resta comunque in mano all'utente che deve implementarla anche sulla base delle condizioni locali della rete e delle esigenze che si manifestano per le infrastrutture nel particolare momento in esame.

Ad esempio, considerando come obiettivo quello di voler creare una prioritizzazione del rischio tra i ponti della rete, si può procedere come segue.

Per fornire un criterio di scelta tra i ponti, essi sono soggetti ad un operazione di classificazione ottenuta attraverso l'ottimizzazione di una utility function, come ad esempio quella presentata nel paragrafo 3.6 per la prioritizzazione dei percorsi che tenga conto, intrinsecamente, di differenti criteri di scelta.

I criteri di scelta possono ad esempio essere basati su alcune grandezze come ad esempio i costi diretti attribuibili al generico ponte, la posizione del ponte (se autostradale o meno), la strategicità



del ponte all'interno dei percorsi per collegare punti di interesse come ospedali, sedi istituzionali e così via.

Con tale procedura sarà possibile una gestione accorta ed oculata della rete di infrastrutture, prevedendo interventi che vadano a interessare prima di tutto i ponti più a rischio e poi a seguire man mano quelli meno a rischio.

6 Interfaccia WEBGIS/DSS

6.1 Generalità

Le attività condotte per lo sviluppo delle funzioni e delle maschere per l'interazione via web della piattaforma webGIS con le routine del DSS pga_generator e netoek_analyzer sono state aggiornate secondo le ultime richieste di UNINA (documenti allegati al DSS_2.3.1) e pubblicate sul server STRIT all'indirizzo (http://5.249.144.240:8080/strit_2).

Sulla macchina accessibile via web, per permettere l'esecuzione delle routine sviluppate da UNINA, è stato necessario installare l'MCR (MATLAB Compiler Runtime - un set autonomo di librerie condivise che consente l'esecuzione di applicazioni compilate da MATLAB o componenti di MATLAB su computer dove non è installato MATLAB) e l'ultima versione della Java™ SE Development kit. E' stato, inoltre, necessario configurare opportunamente le variabili d'ambiente per permettere l'esecuzione dell'MCR attraverso l'interfaccia web.

Il webGIS, precedentemente creato e pubblicato, risulta il punto d'accesso per attivare le funzionalità previste sia dalla routine pga_generator che dalla network analyser.

Ad oggi, esiste una parte pubblica del sistema (Figura 31), in cui sono visibili ed interrogabili i vari layer, ed una parte privata (Figura 32) in cui, a valle di una procedura di autenticazione (Figura 33), è possibile, oltre a visualizzare ed interrogare i layer, anche attivare le varie routine del DSS (Figura 34).



Figura 31 Accesso pubblico



Figura 32 Login

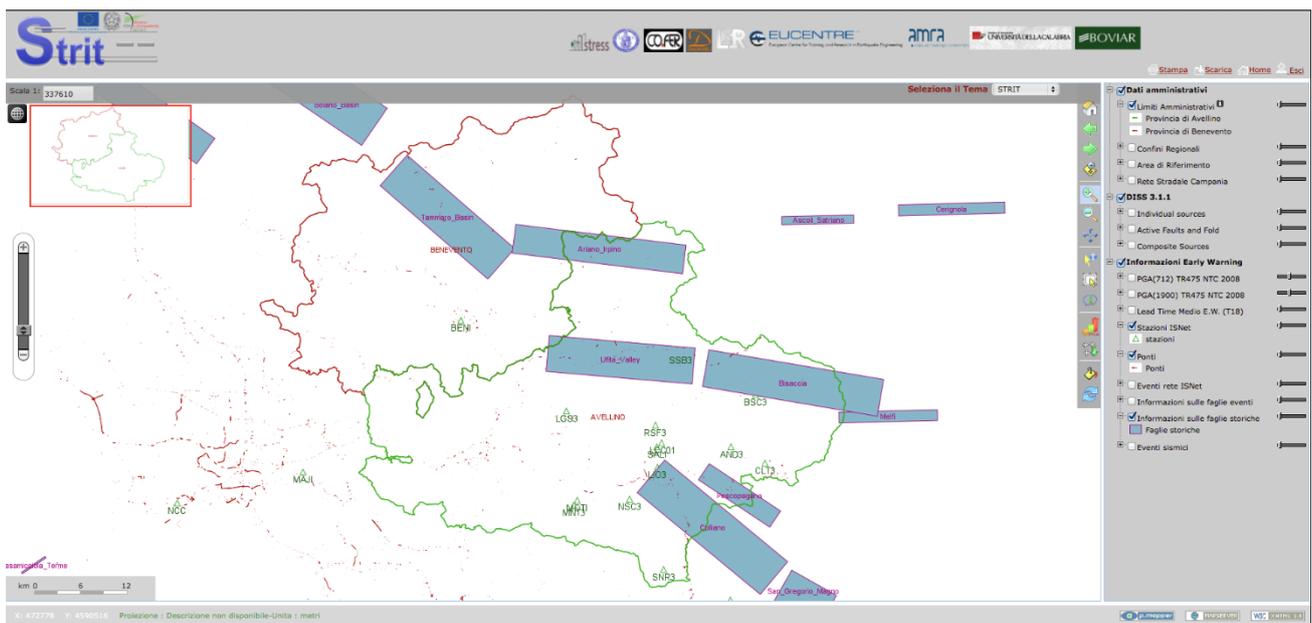


Figura 33 Accesso utente autenticato

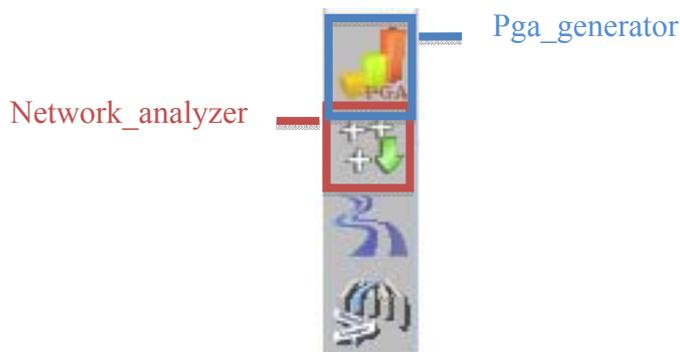


Figura 34-Bottoni della toolbox per l'attivazione delle due routine pga_generator e network_analyzer

6.2 Interfaccia per la PGA_GENERATOR

Cliccando sul pulsante per l'attivazione della funzione pga_generator del toolbox STRIT (in alto in figura 34) si avvierà l'interfaccia per l'inserimento di tutti i parametri necessari alla simulazione (figura 35).

Selezione faglia:

Selezione da file locale: Nessun file selezionato.

Selezione ponti Nessun file selezionato.

Aggiornamento PGA

Carica nuovo txt delle stazioni: Nessun file selezionato.

Legge di attenuazione:

Correlazione:

Magnitudo:

Tipo di fagliazione:

Numero di simulazioni:

Figura 35– Interfaccia pga_generator

Attraverso il pulsante “Seleziona input da mappa” si può definire la faglia su cui far girare la pga_generator (si può scegliere tra faglie eventi faglie storiche) e/o i ponti su cui calcolare il campo di PGA (figura 36). Attraverso il pulsante “Scarica” la faglia selezionata verrà caricata nel sistema e potrà anche essere scaricata in locale in formato shapefile.

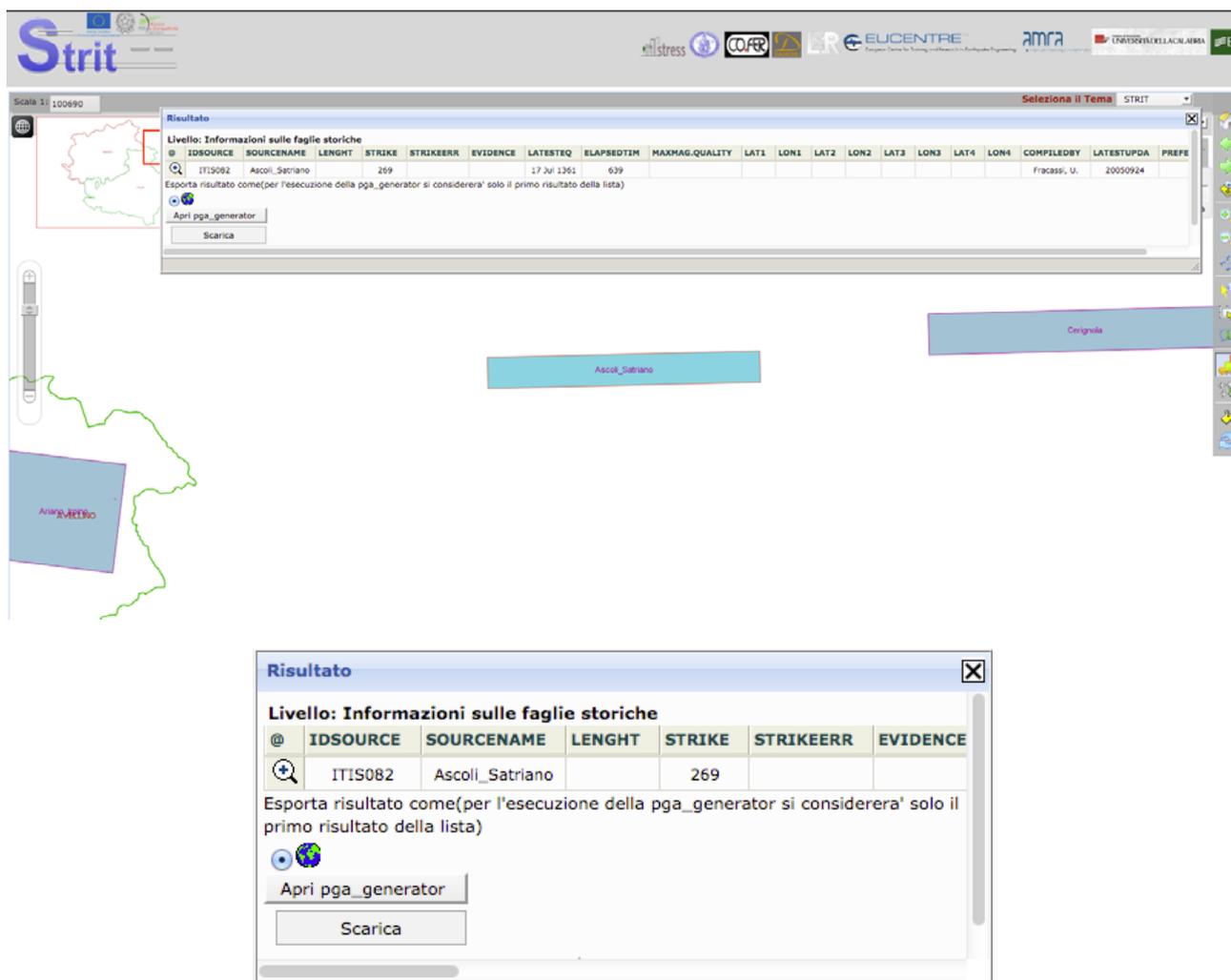


Figura 36– Selezione faglia da mappa

L'utente può anche decidere di selezionare la faglia attraverso una dropdown o di caricarla attraverso un file di testo opportunamente formattato (figura 37).

Figura 37– Selezione faglia

L'utente può decidere, poi, flaggando il check di figura 8, di selezionare il punto o i punti per i quali calcolare il campo di PGA direttamente dalla mappa (attraverso il bottone "Seleziona input da mappa in basso a destra) oppure caricando un file di testo opportunamente formattato. Nel caso in cui non si flagghi la checkbox la routine verrà eseguita su tutti i ponti.

Figura 38– Selezione ponti

A questo punto l'utente può decidere di eseguire o meno l'aggiornamento della procedura per la PGA, ed eventualmente di caricare un nuovo file txt (opportunosamente formattato) contenente un subset delle stazioni accelerometriche da cui estrarre le registrazioni storiche dell'evento. In futuro UNINA costruirà un apposito database delle registrazioni e tramite la dropbox mostrata in figura 39 l'utente potrà impiegare le registrazioni della rete ISNET relative ad eventi passati.

Figura 39– Aggiornamento PGA/Stazioni ISNET

L'utente potrà quindi scegliere la legge di attenuazione (nella versione attuale c'è una sola legge di attenuazione) da impiegare per la generazione del campo di PGA e se considerare la correlazione spaziale mediante l'apposito check-box (figura 40).

Potrà quindi essere selezionata la tipologia di fagliazione mediante l'apposita list-box (che potrà essere Normale, Inversa, Trascorrente o Indefinita) e dovrà essere inserito il valore della Magnitudo Momento dell'evento che si intende studiare.

Infine l'utente potrà inserire il numero di simulazioni che intende eseguire.

Figura 40— Altri parametri

Cliccando sul tasto SUBMIT di figura 35 si farà partire la routine che genererà i file di output.

Al termine dell'esecuzione della funzione, si aprirà una finestra (figura 41) che consentirà all'utente o di scaricare i file di output, di visualizzare i risultati o di effettuare una nuova simulazione.



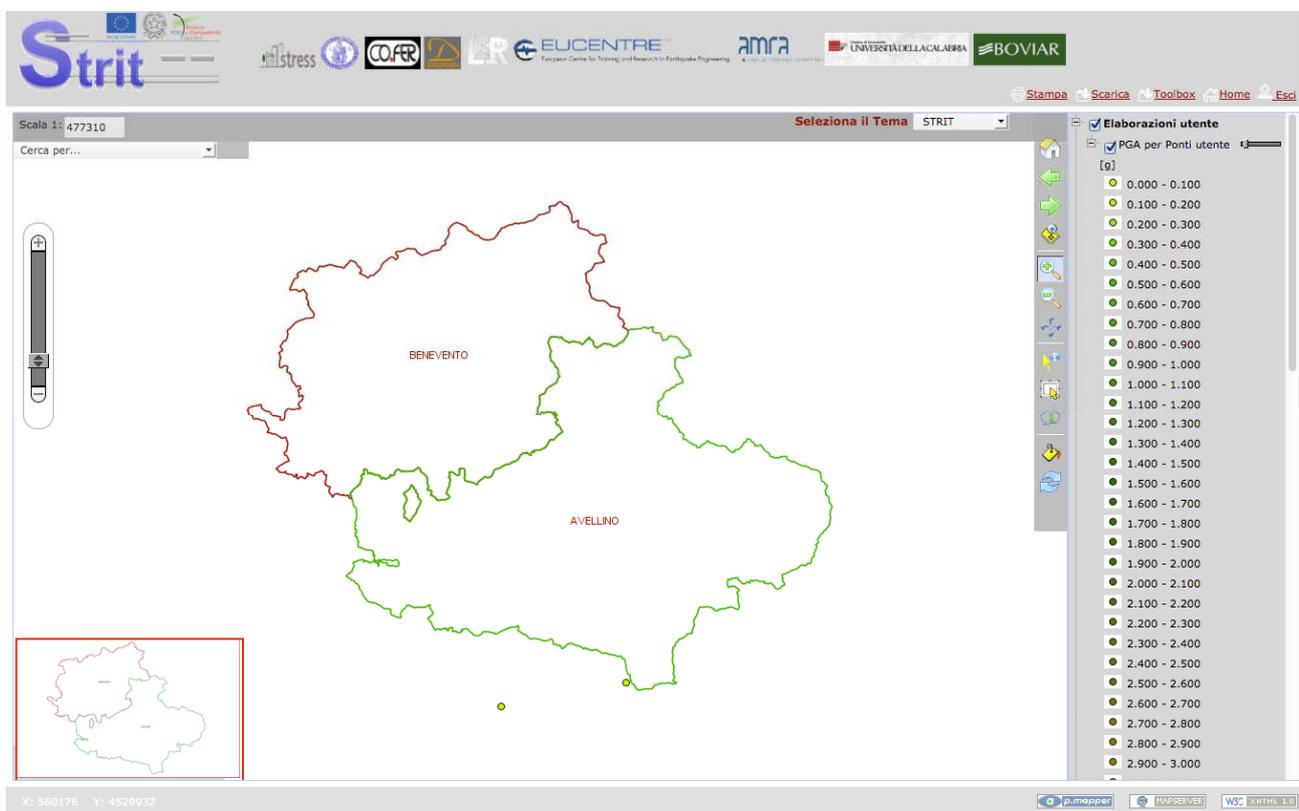
Figura 41– Risultato elaborazione

Gli output che potranno essere scaricati dall'utente sono:

- **Matrice di PGA:** il file di testo creato consiste in una matrice di PGA generate mediante simulazione. Il numero di righe è pari al numero di ponti che si intende esaminare. Il numero di colonne è pari al numero di simulazioni che sono state richieste. A partire da questo file è possibile eseguire un istogramma delle PGA simulate per ogni ponte.
- **Legge di attenuazione:** Il file di testo generato consiste in una matrice contenente le pdf (ProbabilityDensityFunction) relative alla legge di attenuazione scelta per ogni ponte. La prima riga è l'asse delle ascisse su cui la funzione è definita. Le altre righe sono relative ai ponti. (Quindi il file avrà un numero di righe pari al numero di ponti +1). Il numero di colonne è pari alla lunghezza del vettore delle ascisse.
- **Statistiche:** Il file di testo generato consiste in una matrice contenente le statistiche delle pdf della legge di attenuazione scelte e delle simulazioni relative al ciascun ponte. I dati sono organizzati in una matrice con numero di righe pari al numero di ponti e con numero di colonne pari a 4 (mediana legge di attenuazione; deviazione standard legge di attenuazione; mediana simulazioni; deviazione standard simulazioni).

Alla fine della generazione degli output della PGA questi, attraverso apposite funzioni sviluppate in PHP e Python, vengono caricati in tabelle temporanee del database Postgresql/Postgis associato al progetto e saranno accessibili dalle successive funzioni per la visualizzazione dei risultati (figure 42 e 43).

Alla fine dell'esecuzione della funzione pga_generator, cliccando sul pulsante "Visualizza mappa" di figura 41, sarà visualizzata la mappa delle PGA da legge di attenuazione (valore mediano), per tutti i ponti che si è inteso studiare, usando una color-bar che va da 0.1 a 5 [g] (con intervallo di 0.1) e con colori che vanno dal verde al rosso.



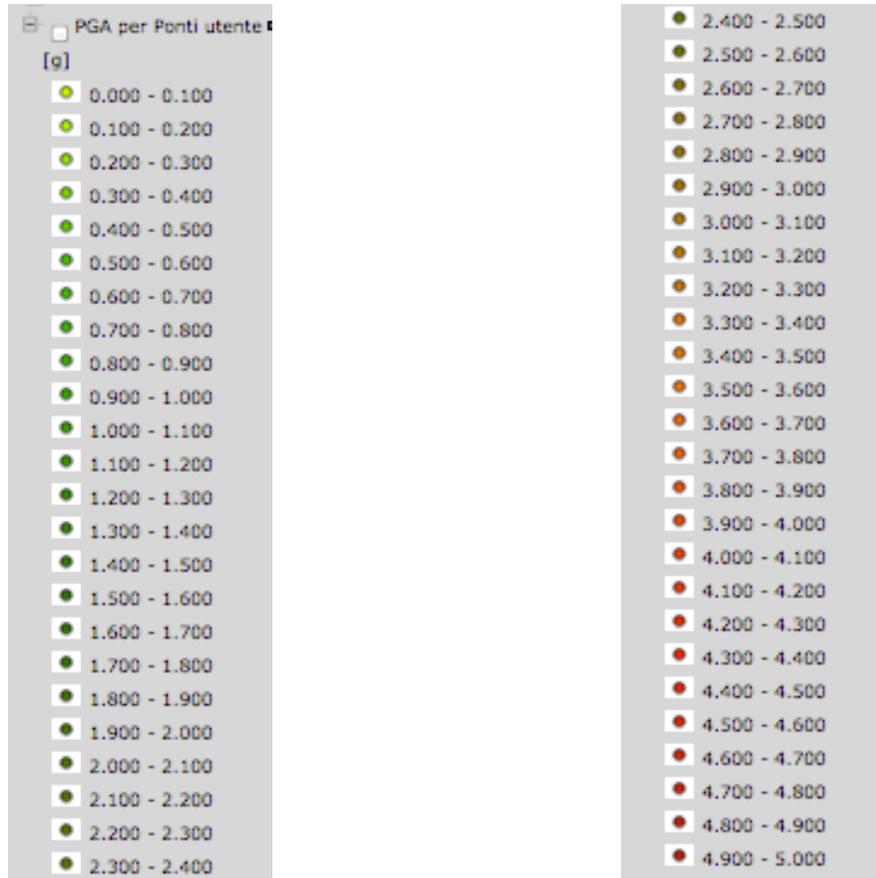


Figura 42– Mappa delle PGA da legge di attenuazione con color-bar

Cliccando sul singolo ponte, attraverso lo strumento , si aprirà una finestra (figura 43) nella quale verrà mostrato l'istogramma dei valori ottenuti dalla procedura di simulazione, la pdf corrispondente alla legge di attenuazione ed un riassunto dei valori ottenuti dalle elaborazioni per quel ponte.

Risultato									
Livello: PGA per Ponti utente [g]									
@	ID	Latitudine	Longitudine	Nome del ponte	Tipo	Mediana Legge Statistica	Mediana Estrazioni	Dispersione Legge Statistica	Dispersione Estrazioni
	<u>1</u>	4507682	512078	Ponte1	A	0,058789	0,240620	0,337170	0,299670

Esporta risultato come

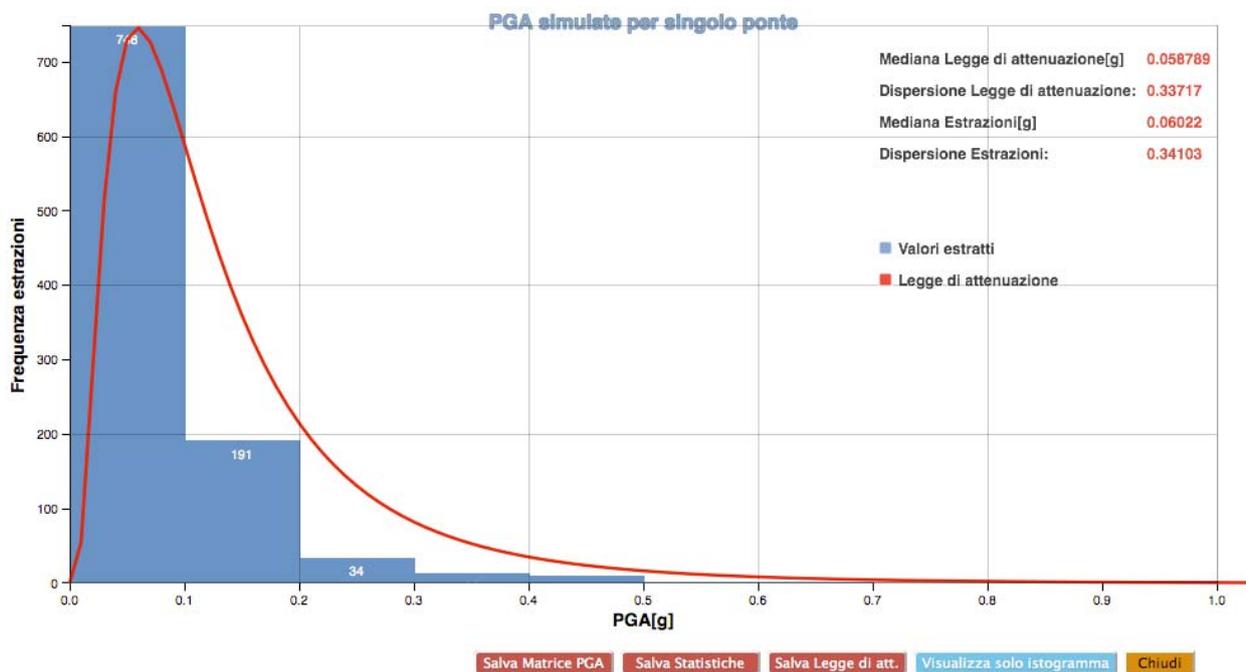


Figura 43– Accesso all’istogramma attraverso interrogazione del singolo ponte

6.3 Interfaccia per la NETWORK ANALYZER

Cliccando sul pulsante per l’attivazione della funzione network_generator del toolbox STRIT (nella figura in basso) si avvierà l’interfaccia per l’inserimento di tutti i parametri necessari alla simulazione (figura 44).

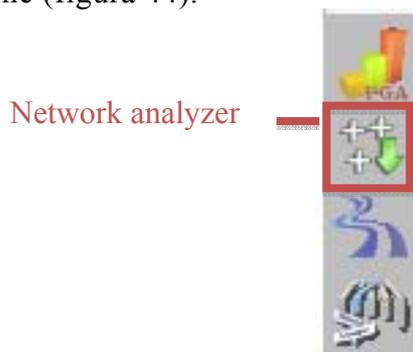


Figura 44– Interfaccia newtwork generator

In particolare, cliccando sulla mappa sarà possibile selezionare il punto di inizio e fine(figura 45): in automatico verranno compilate le text box contenenti le coordinate x ed y per i due punti di figura 44. I valori x ed y per il punto di inizio e fine (espressi nel sistema di coordinate UTM WGS84 zona 33) potranno anche essere inseriti a mano dell'utente nelle apposite text box.

II

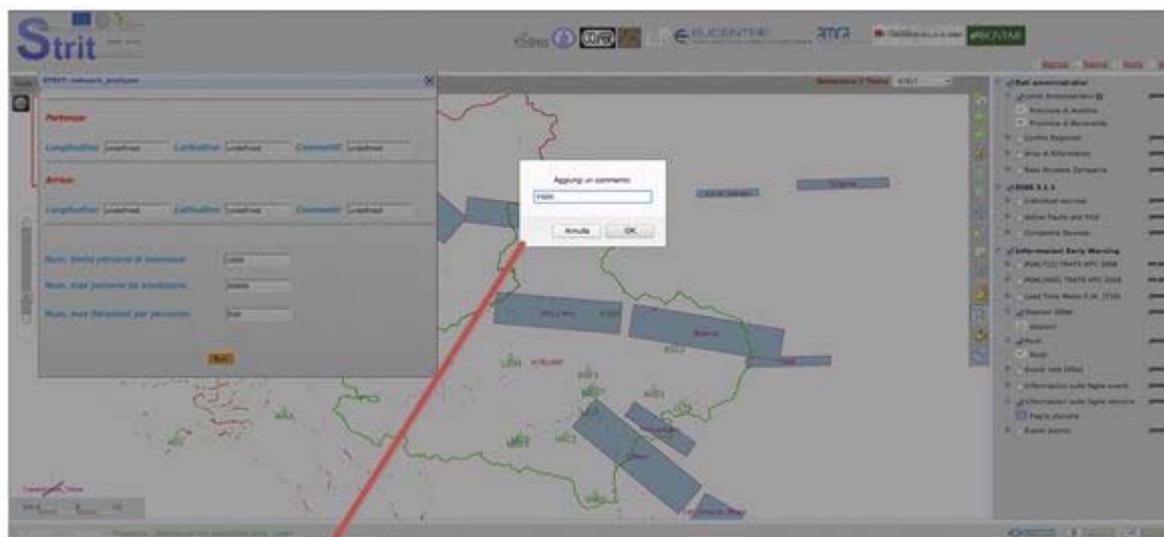


Figura 45– Selezione punti inizio e fine

Fatto ciò sarà possibile customizzare l'esecuzione della routine inserendo i seguenti parametri dell'algoritmo di ricerca dei percorsi alternativi sulla rete:

- **Numero limite dei percorsi di interesse** (*valore di default 1000*): numero massimo di percorsi alternativi da ricercare
- **Numero massimo dei percorsi da analizzare** (*valore di default 50000*): numero massimo di percorsi da indagare (parametro che limita le possibilità da indagare per evitare l'overflow)
- **Numero massimo di iterazioni per percorso** (*valore di default 500*): numero massimo di iterazioni per ciascun percorso indagato (parametro di convergenza)

A questo punto cliccando sul pulsante runverrà eseguita la routine.

Al termine dell'esecuzione, se non ci sono stati errori, comparirà la schermata di figura 46.



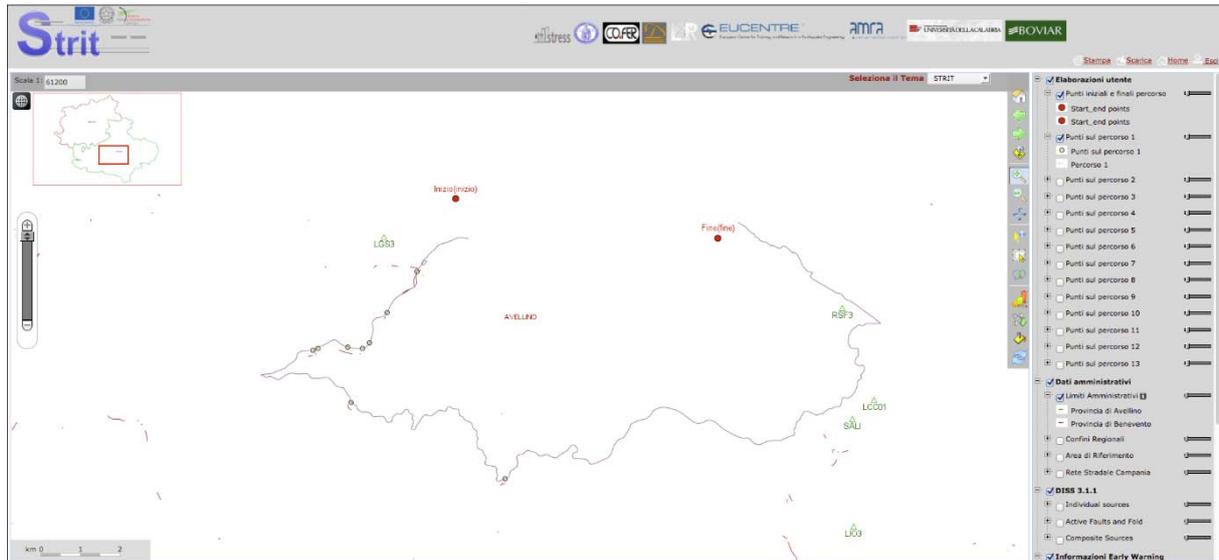
Figura 46– Risultato elaborazione

Attraverso questa maschera sarà possibile salvare in locale i file di output della routine:

- **Percorsi:** File di testo generato consistente in una matrice contenente i percorsi alternativi identificati per raggiungere il punto B dal punto A. In particolare la prima colonna corrisponde all’ID del percorso, ed a seguire per ciascuna riga sono riportati gli ID dei nodi collegati:
ID Percorso ID Nodo1 ID Nodo2 ... ID Nodoi ... ID Nodo finale
- **Ponti:** Tale foglio contiene una matrice con un numero di righe pari al numero di ponti, mentre le colonne hanno la seguente specifica:
ID Longitudine Latitudine Nome Ponte Tip di Suolo □

Le coordinate sono fornite con sistema di riferimento WGS_1984_UTM_Zone_33N. Il tipo di suolo, coerentemente a quanto previsto dalle leggi di attenuazione, potrà essere A, B, C, D o E.

Cliccando su “Visualizza mappa” si aprirà una nuova finestra con del webGIS (figura 47): in alto nella barra dei layer sotto la nomenclatura “Elaborazioniutente” si troveranno tutti i percorsi individuati tra i punti di inizio e fine fissati nella maschera di figura 14. Cliccando sull’i-esimo percorso questo verrà mostrato sulla mappa insieme alla posizione di tutti i ponti appartenenti al percorso.



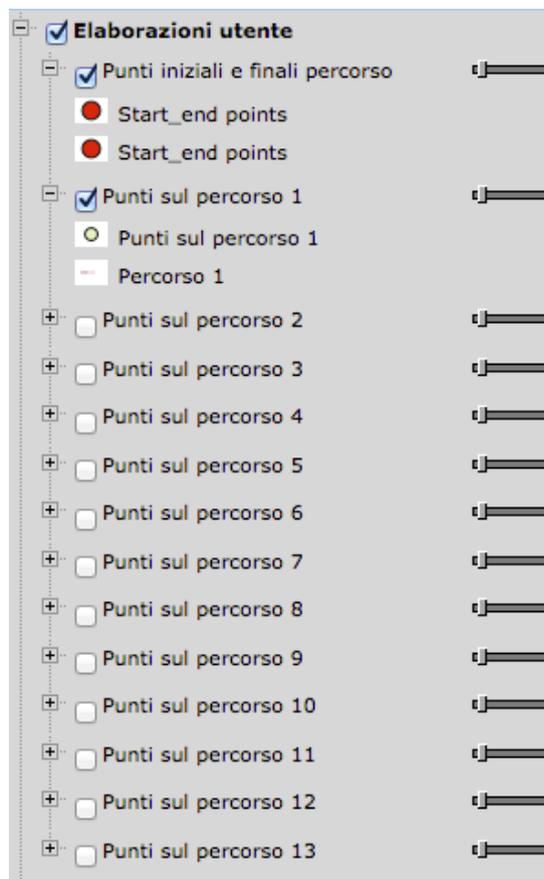


Figura 47– Mappa finale network_analyzer

6.4 Interfaccia per la NETWORK RELIABILITY

Cliccando sul pulsante per l'attivazione della funzione network_generator del toolbox STRIT (in basso in figura 18) si avvierà l'interfaccia per l'inserimento di tutti i parametri necessari alla simulazione (figura 19).

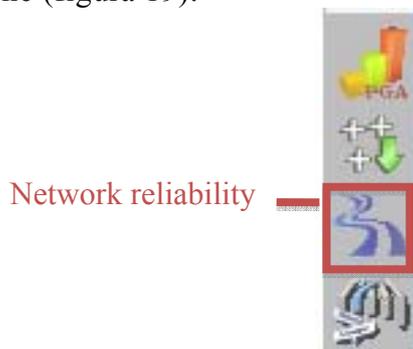


Figura 48– Toolbar strit completa

Figura 49– Interfaccia newtwork reliability

STRIT: Affidabilità della rete

Il file txt è stato caricato con successo !!

Selezione faglia:

Selezione da file locale: Nessun file selezionato.

E' stata scelta la faglia: Irpinia-Basilicata_(1694,_Sep_08)

Aggiornamento PGA

Carica nuovo txt delle stazioni: Nessun file selezionato.

E' stato caricato come file delle stazioni: STAZIONI.txt

Legge di attenuazione:

Correlazione:

Magnitudo:

Tipo di fagliazione:

Numero di simulazioni:

Partenza:

Longitudine:

Latitudine:

Commenti:

Arrivo:

Longitudine:

Latitudine:

Commenti:

Num. limite percorsi di interesse:

Num. max percorsi da analizzare:

Num. max iterazioni per percorso:

Stato limite: Danno Collasso

Figura 50– Interfaccia network reliability dopo l’inserimento dei parametri di input

Attraverso l’interfaccia di sinistra (la sezione di destra per l’inserimento dei parametri sarà resa attiva solo dopo l’inserimento degli input per la generazione della PGA e la pressione del bottone “submit”) dovrà essere indicata la faglia da impiegare per la generazione del campo di PGA da scenario. Tale faglia potrà essere o scelta tra quelli già caricata nel sistema (droplist) oppure eventualmente potrà essere caricata dall’utente, purché essa risulti nello stesso formato di quelle già presenti.

Qualora l’utente volesse eseguire l’aggiornamento nella procedura di generazione del campo di PGA, spuntando la check-box “Aggiornamento PGA”, si potrà prevedere o la selezione delle stazioni accelerometriche da cui estrarre le registrazioni storiche dell’evento (da implementare in futuro a valle di un confronto con AMRA) oppure l’utente potrà caricare un proprio file, purché risulti nello stesso formato di quello già presente. Non è possibile eseguire l’aggiornamento senza aver caricato un proprio file delle stazioni.

L'utente potrà quindi scegliere la legge di attenuazione (nella versione attuale c'è una sola legge di attenuazione) da impiegare per la generazione del campo di PGA e se considerare la correlazione spaziale mediante l'apposito check-box.

Potrà quindi essere selezionata la tipologia di fagliazione mediante l'apposita list-box (che potrà essere Normale, Inversa, Trascorrente o Indefinita) e dovrà essere inserito il valore della Magnitudo Momento dell'evento che si intende studiare.

Premendo il bottone submit, se tutti i valori sono stati inseriti correttamente, A questo punto si attiverà la sezione sinistra dell'interfaccia attraverso la quale potranno essere inserite (o scelte direttamente dalla finestra webgis) le coordinate del nodo iniziale e finale.

Quindi l'utente potrà scegliere i tre parametri di convergenza dell'algoritmo (di default vengono mostrati i tre parametri indicati nei fogli illustrativi della funzione, ovvero 50 50000 e 500).

Prima di far girare la routine (attraverso il pulsante run) dovrà essere inserito lo stato limite al quale sono associati i calcoli (può essere selezionata solo una delle due opzioni).

Cliccando sul tasto RUN, quindi, si farà partire la routine che genererà i due file di output.

Al termine dell'esecuzione della funzione, si aprirà una finestra (figura 51) che consentirà all'utente o di scaricare i file di output, o di visualizzare i risultati.



Figura 51– Risultato dell'elaborazione

Alla richiesta di visualizzazione della mappa, nella finestra principale del webgis, sarà possibile selezionare i percorsi trovati (Figura 52). Cliccando sull'i-esimo percorso, questo verrà visualizzato sulla mappa, indicando i punti iniziale e finale, ed inoltre verrà mostrata la posizione dei ponti appartenenti al percorso, e per ciascun ponte sarà visualizzata la PGA mediana delle simulazioni eseguite con un opportuna color-bar generata in maniera dinamica (figura 53).

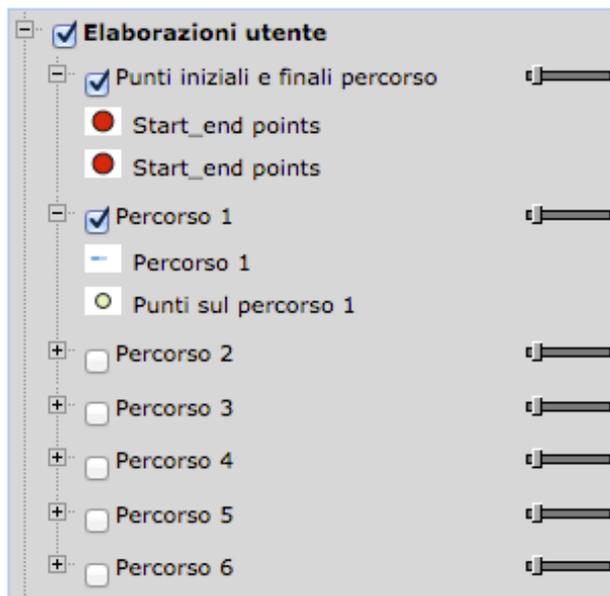


Figura 52– Selezione dei percorsi trovati

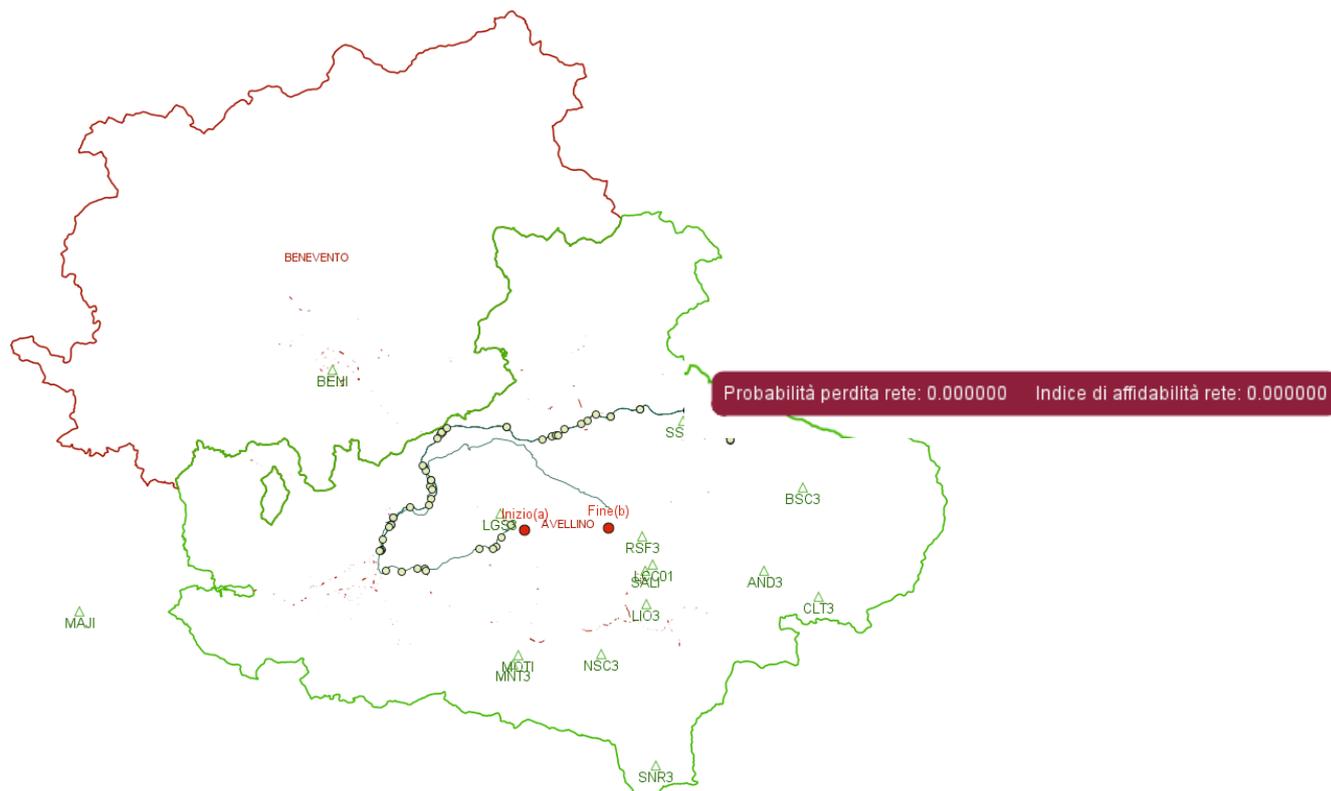


Figura 53– Ponti e percorsi visualizzati sulla mappa

Come risultato immediato in una opportuna text-box (in rosso in figura 53) sovrapposti alla mappa verranno mostrati i valori di probabilità di fallimento della rete ed il relativo indice di affidabilità associato allo stato limite scelto.

Cliccando il testo informazioni, e quindi selezionando l'i-esimo percorso, si aprirà una finestra riepilogativa di percorso come quella mostrata in figura 54.

Livello: Percorso 1

@	Percorso	Lunghezza [km]	%tratti autostradali	tempo percorrenza [min]	Numero Ponti	Lunghezza ponti [km]	Perdite attese [min]	Prob. perdita percorso	Indice affidab. percorso
1	1	47.5268	0	31	5	1.6394	0.0197824	0	999

Figura 54– Interrogazione dell'i-esimo percorso

Infine, cliccando sul tasto “Tab.percorsi” di figura 51, comparirà una tabella riepilogativa di tutti i percorsi individuati, come mostrato nella figura al numero 54.

Percorso	Lunghezza [km]	% tratti autostradali	Tempo di percorrenza [min]	N ponti	Lunghezza ponti [km]	Perdite attese [min €]	Probabilità di perdita percorso	Indice di affidabilità percorso
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	47.5268	0	31	5	1.6394	0.0197824	0	999
2	177.178	0.630767	91	60	9.65035	0.782691	0	999
3	47.4563	0	31	5	1.6394	0.0214981	0	999
4	203.492	0.36692	113	51	6.34971	0.899917	0	999
5	47.5044	0	31	5	1.6394	0.023457	0	999

Figura 55– Tabella riepilogativa dei percorsi individuati

L'utente potrà, poi, attraverso gli appositi pulsanti di figura 51 potrà visualizzare i percorsi non connessi, l'istogramma dei percorsi non connessi e l'istogramma DC di rete (vedi figure da 56 a 58).

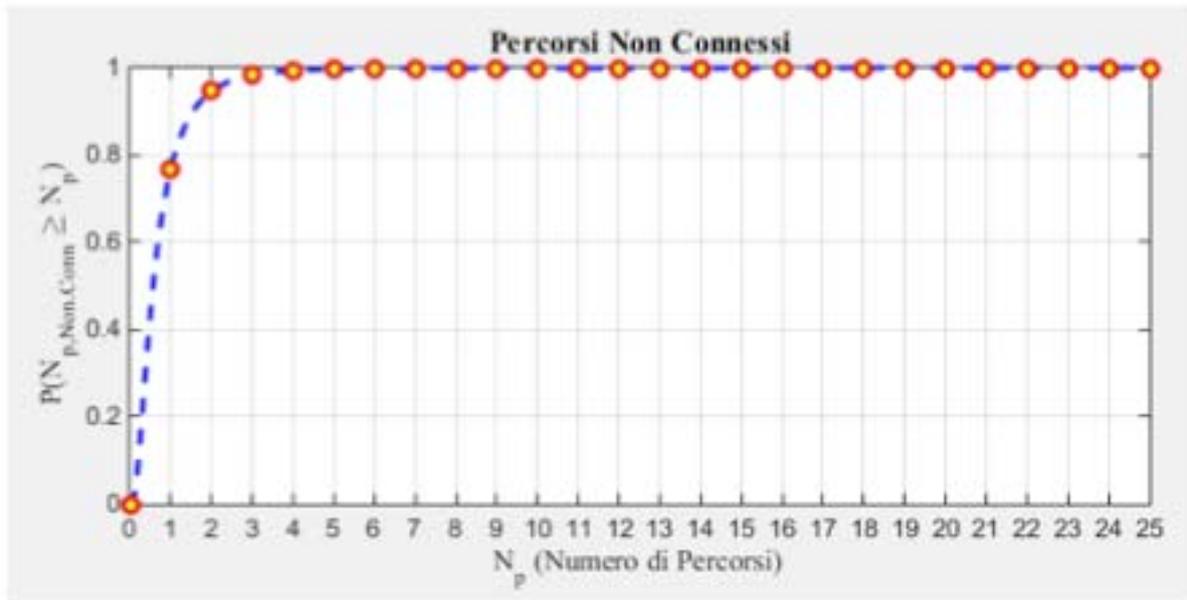


Figura 56– Percorsi non connessi

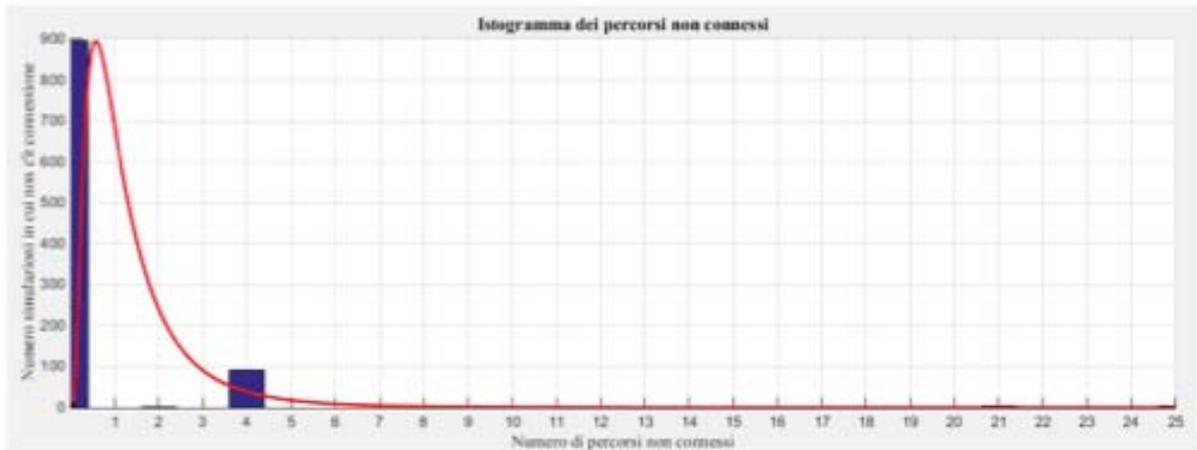


Figura 57– Istogramma dei percorsi non connessi

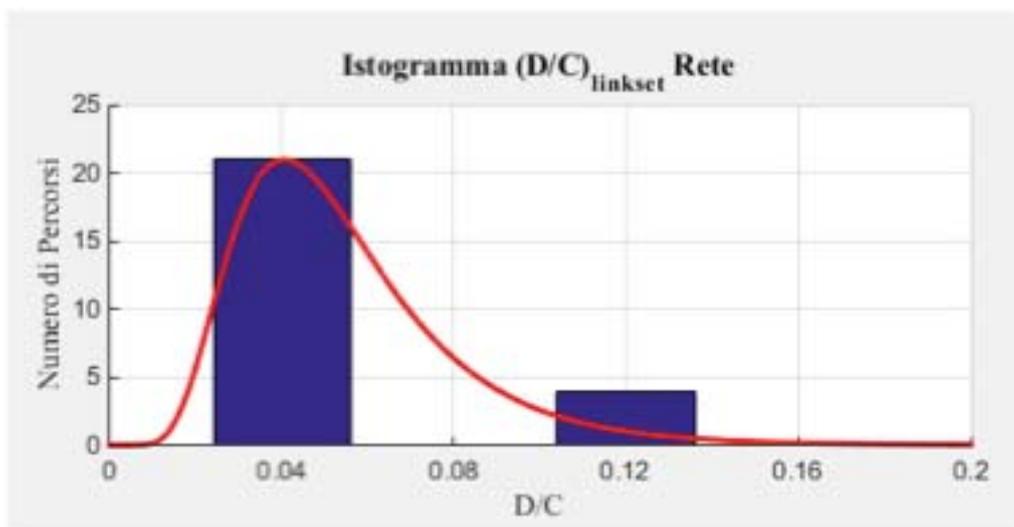


Figura 58– Istogramma DC di rete

A valle dell'esecuzione della routine `network_reliability`, attraverso l'apposito pulsante di figura 51 ("Ottimizza perc.") l'utente potrà eseguire l'ottimizzazione dei percorsi trovati attraverso l'inserimento dei valori numerici dei tre coefficienti c_1 , c_2 e c_3 (vedi figura 59; i valori di default per i tre coefficienti possono essere rispettivamente 0.5, 0.25 e 0.25).

c_1 :	<input type="text" value="0,05"/>
c_2 :	<input type="text" value="0,15"/>
c_3 :	<input type="text" value="0,15"/>

Submit

Figura 59– Ottimizzazione dei percorsi

Attraverso la pressione del pulsante "Submit" presente sul form di inserimento dei coefficienti si eseguirà la routine `optim_multicriteria.jar` che genererà direttamente a video la tabella ottenuta ordinando i percorsi trovati (figura 60).

Percorso	Lunghezza [km]	% tratti autostradali	Tempo di percorrenza [min]	N ponti	Lunghezza ponti [km]	Perdite attese [min]	Probabilità di perdita percorso	Indice di affidabilità percorso
4	203.492	0.36692	113	51	6.34971	0.899917	0	999
1	47.5268	0	31	5	1.6394	0.0197824	0	999
2	177.178	0.630767	91	60	9.65035	0.782691	0	999
3	47.4563	0	31	5	1.6394	0.0214981	0	999
5	47.5044	0	31	5	1.6394	0.023457	0	999

Figura 60– Tabella riepilogativa dei percorsi individuati dopo l’ottimizzazione

6.5 Interfaccia per la NETWORK MANAGER

Cliccando sul pulsante per l’attivazione della funzione network_generator del toolbox STRIT (in basso in figura 61) si avvierà l’interfaccia per l’inserimento di tutti i parametri necessari alla simulazione (figura 62).

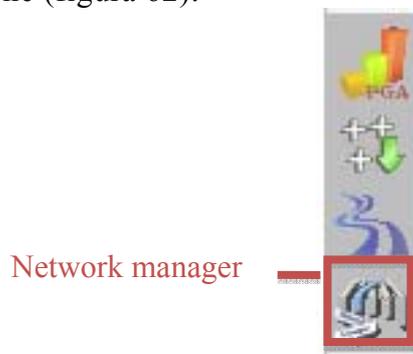


Figura 61– Toolbar strit completa

L’interfaccia grafica per l’esecuzione di questa routine è uguale a quella presentata per pga_generator (paragrafo 6.2) in quanto i parametri di input aggiuntivi (fEstr, shapePonti, fPonti, fESP, fstatC, f_ecdfC, f_cdfC) sono statici e, quindi, non è necessario che vengano passati in input dall’utente.

Il file txt e' stato caricato con successo !!

Selezione faglia:

Selezione da file locale: Nessun file selezionato.

E' stata scelta la faglia: Irpinia-Basilicata_(1980,_Nov_23)

Selezione ponti Nessun file selezionato.

E' stato caricato come file dei ponti: Ponti.txt

Aggiornamento PGA

Carica nuovo txt delle stazioni: Nessun file selezionato.

E' stato caricato come file delle stazioni: STAZIONI.txt

Legge di attenuazione:

Correlazione:

Magnitudo:

Tipo di fagliazione:

Numero di simulazioni:

Figura 62– Interfaccia network manager

Alla fine dell'esecuzione della routine verrà mostrata la schermata riportata in figura 63.

Network manager e' stato eseguito con successo !!!

Figura 63– Risultato dell'elaborazione

Attraverso questa interfaccia l'utente potrà visualizzare la mappa con la disaggregazione dei costi in cui per ogni ponte viene rappresentato in una scala di colori dinamica il valore associato di percentuale di perdita attesa (figura 64).

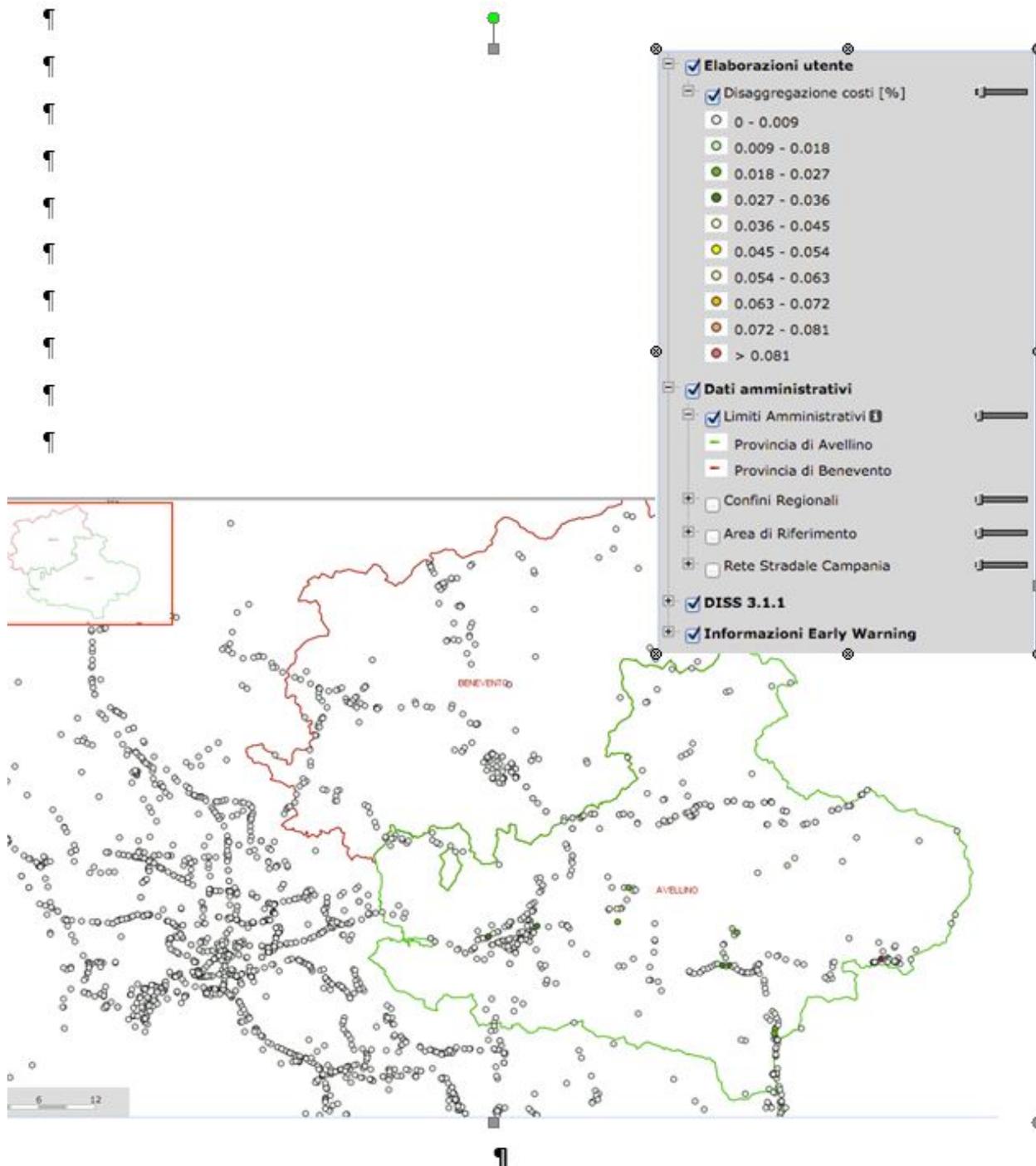


Figura 64– Mappa di disaggregazione dei costi

Attraverso gli appositi pulsanti di figura 63 l’utente potrà, poi, visualizzare il diagramma con la sovrapposizione della CCDF empirica e della CCDF calcolata (pulsante “Visualizza ccdf”) e le informazioni statistiche sui costi (pulsante “Statistiche perdite”) riportati, rispettivamente, in figura 65 e 66.

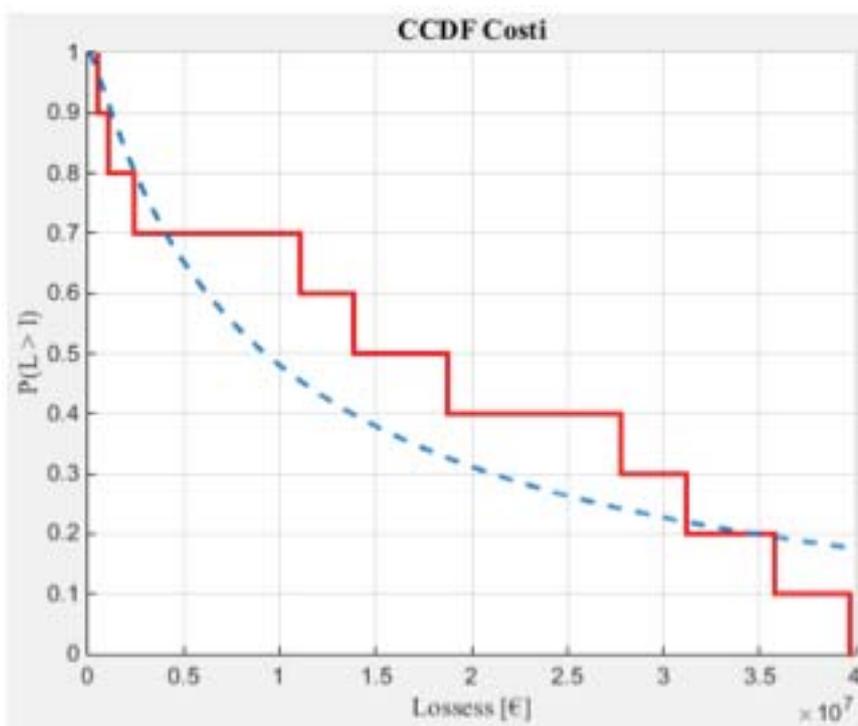


Figura 65– Diagramma CCDF costi

Valore atteso delle perdite economiche [Milioni di €]	Coefficiente di variazione percentuale delle perdite [%]	Mediana delle perdite economiche [Milioni di €]
111.1727	0	111.1727

Figura 66– Tabella statistiche perdite

7 Conclusioni

Nel pianificare e coordinare interventi di emergenza, gli enti locali e le diverse organizzazioni coinvolte sono interessati ad effettuare simulazioni di eventi sismici realistici che presentino la maggiore probabilità di verificarsi in termini di magnitudo e distanza. Le mappe di scenario, possono essere utilizzate per esaminare le perdite attese per le strutture o infrastrutture, esposte a specifici terremoti potenziali. La procedura sviluppata in questo lavoro può essere implementata per un qualsiasi terremoto futuro, in modo da produrre una mappatura della pericolosità sismica immediata e facilmente consultabile e gestibile. Infatti gli scenari di terremoto sono parte integrante della pianificazione di risposta alle emergenze. Nello specifico, in questo lavoro, a partire dalla creazione di un database geo-spaziale che consiste in una serie di dati di input che hanno consentito l'implementazione di una legge di attenuazione (dove, in particolare, tali dati consistono in una carta geologica della Campania, nella definizione di un evento sismico di scenario (terremoto dell'Irpinia del 1980 di magnitudo $M=6.9$), nella posizione e nella tipologia della faglia in esame nonché nella posizione degli epicentri per il suddetto evento sismico), è stato possibile implementare la legge di attenuazione di Bindi, Pacor et al. (2011) e generare campi di PGA sulla base dello scenario in esame.

Grande importanza è stata data in questo lavoro alla valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture. In questo contesto, con riferimento ad un ampio portafoglio di ponti, è di grande rilievo una valutazione precisa di come i diversi modelli di vulnerabilità possano influenzare la valutazione delle perdite economiche per l'intera rete di ponti considerata ed in particolare come gli effetti di aggiornamento bayesiano delle curve di fragilità possano modificare le stime pregresse nell'ambito della gestione del rischio. Nello specifico, nell'ambito di tale analisi di rischio sismico, tre diversi modelli di vulnerabilità, sempre con riferimento ai ponti a travata in cemento armato, sono stati valutati e comparati: 1) un modello che considera le curve di fragilità mediane provenienti dal modello generato nell'ambito della procedura "Britney"; 2) un altro che considera un aggiornamento di tali curve di fragilità mediane di Britney in forma chiusa; 3) un ultimo che considera un aggiornamento bayesiano delle curve di fragilità (16%, 50%, 84%), laddove si sottolinea che lo scopo principale dell'aggiornamento è, quindi, quello di avere curve di fragilità più precise.

Il controllo e la conoscenza del livello prestazionale di una rete di infrastrutture viarie può avvenire analizzando differenti aspetti. Una rete viaria, intesa come sistema complesso di elementi che hanno una vita e talvolta un'indipendenza propria, ha come scopo il collegamento tra differenti e molteplici punti geografici nella maniera più naturale e diretta possibile. Il collegamento e quindi la comunicazione tra differenti aree di una città o, a scala più grande, tra differenti città non è tuttavia un requisito sufficiente a garantire un certo livello prestazionale della rete. Infatti, affinché si possa parlare di qualità (in termini prestazionali) di una rete stradale è necessario che la stessa abbia due caratteristiche fondamentali: la sicurezza del collegamento (affidabilità di percorso) e la presenza di numerose alternative (da cui dipende fortemente l'affidabilità di rete). Nell'affrontare lo studio affidabilistico di un sistema di infrastrutture viarie, sia dal punto di vista del percorso che della rete, il parametro rappresentativo del livello prestazionale del sistema è sicuramente la connettività che il sistema può garantire per tanto l'analisi di connettività, combinata opportunamente con lo studio



affidabilistico (così come visto in questo lavoro), sono lo strumento per la misura del livello di prestazione sistemica di una rete di infrastrutture.

Le metodologie studiate sono state poi adattate e rese sistematicamente utilizzabili in due diversi DSS: uno per la gestione della rete in condizioni di post-emergenza e l'altro per la gestione ordinaria della rete di infrastrutture. Dal lato post-emergenza, il DSS si preoccupa di fornire supporto per la conoscenza dello stato della rete nell'immediato post-evento attraverso la valutazione della connettività della rete e dell'affidabilità dei collegamenti. Ciò consente in primo luogo la mobilità attraverso collegamenti sicuri, ed in secondo luogo fornisce una fotografia dello stato di danneggiamento dell'intero patrimonio infrastrutturale coinvolto. Per quanto riguarda invece la gestione ordinaria delle infrastrutture, diverse voci di costo sono tenute in conto per la determinazione dei potenziali investimenti necessari a conservare un certo livello di performance della rete. Una PSHA è condotta per stimare l'hazard sismico al quale ognuna delle infrastrutture può essere soggetto nel corso della sua vita utile e costi di riparazione, manutenzione e downtime sono considerati nella determinazione del valore complessivo e disaggregato della manutenzione delle infrastrutture.

8 BIBLIOGRAFIA

- Bindi, D., F. Pacor, L. Luzi, R. Puglia, M. Massa, G. Ameri and R. Paolucci (2011). "Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database." Bulletin of Earthquake Engineering **9**(6): 1899-1920.
- Boore, D. M. and G. M. Atkinson (2008). "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s." Earthquake Spectra **24**(1): 99-138.
- Cardone, D., G. Perrone and S. Sofia (2011). "A performance-based adaptive methodology for the seismic evaluation of multi-span simply supported deck bridges." Bulletin of Earthquake Engineering **9**(5): 1463-1498.
- Cornell, C. A. (1969). A probability-based structural code, ACI.
- Dijkstra, E. W. (1959). "A note on two problems in connexion with graphs." Numerische mathematik **1**(1): 269-271.
- Ditlevsen, O. and H. O. Madsen (1996). Structural reliability methods, Citeseer.
- Ebrahimian, H. and R. De Risi (2014). "Seismic reliability assessment, alternative methods for." Encyclopedia of Earthquake Engineering edited by Michael Beer, Edoardo Patelli, Ioannis Kouglioumtzoglou and Siu-Kui Au. Section Editors Fatemeh Jalayer and Carmine Galasso, Springer.
- Eposito, S. and I. Iervolino (2012). "Spatial correlation of spectral acceleration in European data." Bulletin of the Seismological Society of America **102**(6): 2781-2788.
- Faccioli, E. and R. Paolucci (2005). Elementi di Sismologia applicata all'Ingegneria, Pitagora.
- Gutenberg, B. and C. Richter (1954). Seismicity of the earth and associated phenomena, Princeton University Press.
- Jaiswal, K. S. and D. J. Wald (2010). Development of a semi-empirical loss model within the USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER) System.
- Landolfi, L., M. Caccavale, A. d'Onofrio, F. Silvestri and G. Tropeano (2011). "Preliminary assessment of site stratigraphic amplification for shakemap processing." 5th ICEGE, Santiago, Chile: 10-13.
- Noto, F. and P. Franchin (2012). "BRIT.N.E.Y BRIDGE AUTOMATIC NLTHA-BASED EARTHQUAKE FRAGILITY." Opensees Days Italia.
- Padgett, J. E., B. G. Nielson and R. DesRoches (2008). "Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios." Earthquake Engineering & Structural Dynamics **37**(5): 711-725.
- Park, J., P. Bazzurro and J. W. Baker (2007). "Modeling spatial correlation of ground motion intensity measures for regional seismic hazard and portfolio loss estimation." Applications of statistics and probability in civil engineering. Taylor & Francis Group, London: 1-8.
- Singhal, A. and A. S. Kiremidjian (1998). "Bayesian updating of fragilities with application to RC frames." Journal of structural Engineering **124**(8): 922-929.
- Thulasiraman, K. and M. N. Swamy (2011). Graphs: theory and algorithms, John Wiley & Sons.
- Veritas, N. (1992). Structural reliability analysis of marine structures, Det Norske Veritas.
- Wald, D. J. (2005). ShakeMap manual: technical manual, user's guide, and software guide, US Geological Survey.
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994). "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement." Bulletin of the seismological Society of America **84**(4): 974-1002.



West, D. B. (2001). Introduction to graph theory, Prentice hall Upper Saddle River.

Zhang, Q. (2005). Road network generalization based on connection analysis. Developments in Spatial Data Handling, Springer: 343-353.

9 Allegato A: Note tecniche per l'implementazione delle routine

A 2.3.1

Ricerca e sviluppo sull'analisi di pericolosità di una rete

NOME DLL PER WEB-GIS: pga_generator.jar

Note tecniche per il funzionamento del Java Archive (jar)

Raffaele De Risi, Stefano Carozza, Fatemeh Jalayer, Andrea Miano

INFORMAZIONI PRELIMINARI DI CARATTERE GENERALE RELATIVE ALLA MACCHINA SU CUI LA ROUTINE DOVRÀ GIRARE.

Affinché la routine funzioni è necessario installare l'**MCR installer** (versione da aggiornare insieme alle versioni di Matlab e che deve tenere conto del sistema su cui si installa, ovvero 32 o 64 bit) sul server. Inoltre, è necessario che sia installata una versione **Java™ SE Development Kit** (possibilmente la più recente, anche in questo caso si deve tenere conto della versione del sistema su cui si installa).

[Se si usa windows, dopo aver installato il Development Kit, è necessario aggiornare le variabili d'ambiente con il percorso contenente la cartella bin di java; es. *C:\Program Files\Java\jdkX.X.X\bin*. Per aggiornare le variabili d'ambiente si va in risorse del computer, tasto destro, proprietà, protezione sistema, avanzate, variabili d'ambiente; nella sezione *Path*, se sono presenti altri percorsi aggiungere dopo un punto e virgola il percorso (es. *C:\Program Files\Java\jdkX.X.X\bin*) seguito a sua volta da un punto e virgola].

CHIAMATA DELLA FUNZIONE

Il file **pga_generator.jar** contiene una classe di nome **Class1** con un unico metodo di nome **pga_generator**. Si riporta di seguito come la funzione deve essere richiamata (ad esempio da ambiente DOS, una volta che si è entrati all'interno della cartella contenente il **javabuilder** e la funzione stessa **pga_generator.jar**):

```
java -classpath javabuilder.jar;pga_generator.jar pga_generator.Class1 num1 char1 string1 string2
string3 string4 num2 string5 string6 string7 string8 num3 string9 string10 string11 string12 string13
string14 string15 string16 num4 char2 num5 num6
```

Le stringhe (string) ed i caratteri (char) dovranno essere poste tra apici. Tutti gli input vanno separati da uno spazio.

INFORMAZIONI SPECIFICHE ALLA FUNZIONE *pga_generator.jar*

Informazioni relative ai file di Input

num1: tale numero dovrà essere uguale a **0** o ad **1**. Se l'utente vuole scegliere la faglia tra quelle caricate sul sistema sarà pari a **0**, altrimenti, se vuole caricarla da un proprio shapefile, sarà uguale ad **1**.

char1: tale carattere dovrà essere **'E'** o **'S'**. Se l'utente vuole scegliere una faglia per riprodurre un evento del passato dovrà essere posto pari ad **'E'** altrimenti, se l'utente intende impiegare una sorgente sismogenetica, il carattere dovrà essere pari a **'S'**. Se **num1=1**, **char1** deve essere posto pari a **'n'** (ovvero none)

string1: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile delle faglie attivate dagli eventi storici. Se **num1=1**, **string1** deve essere posto pari a **'none'**.

string2: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile delle faglie intese quali sorgenti sismogenetiche. Se **num1=1**, **string2** deve essere posto pari a **'none'**.

string3: tale stringa deve contenere il nome della faglia che si intende esaminare. Tale stringa dovrà essere pari ad una qualsiasi delle stringhe contenute nei fogli di testo **NomiEventi.txt** e **NomiSorgente.txt** contenuti nella cartella **TXTNecessari** (forniti con la presente routine). Tali nomi, sono gli stessi che caratterizzano le faglie contenute negli shapefiles **Eventi.shp** e **Sorgenti.shp** contenuti nella cartella **Faglie** (forniti con la presente routine).

string4: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile (*.shp) relativo alla proiezione in superficie della faglia di interesse. Nell'immediato post-evento, tale faglia è relativa a dove è avvenuto l'evento e quindi viene identificata dai sismologi. In tempo di pace, è l'utente che può scegliere (o caricare) lo shapefile relativo alla faglia di interesse. In particolare se l'utente vuole caricarla (**num1=1**) lo shapefile può essere qualsiasi in termini geometrici (poligono, linea, punto) ed una volta caricato esso sarà indicato da **string4**. Se l'utente vuole scegliere la faglia (**num1=0** e specifica di **char1** e **string3**) lo shapefile di lavoro sarà salvato come indicato nel percorso completo **string4** a seguito di una opportuna lavorazione a partire dagli shapefiles presenti sulla piattaforma (definiti precedentemente da **string1** e **string2**). È importante specificare che gli shapefiles (come quelli forniti con la presente routine) devono essere di coordinate **WGS_1984_UTM_Zone_33N**.

num2: tale numero dovrà essere uguale a **0** o ad **1**. Se l'utente vuole scegliere i ponti tra quelli caricati sul sistema sarà pari a **0**, altrimenti, se vuole caricare da un proprio foglio di testo, sarà uguale ad **1**.

string5: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile dei ponti (fornito con la presente routine). Se **num2=1**, **string5** deve essere posto pari a 'none'.

string6: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo contenente gli ID di tutti i ponti contenuti all'interno dello shapefile di tutti i ponti (fornito con la presente routine). Se **num2=1**, **string6** deve essere posto pari a 'none'.

string7: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo contenente gli ID dei soli ponti di interesse per la routine. Tale foglio di testo contiene gli ID a seguito della selezione dei ponti sulla piattaforma. Se **num2=1**, **string7** deve essere posto pari a 'none'.

string8: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo (*.txt) contenente alcune informazioni sui ponti. Tale foglio contiene una matrice con un numero di righe pari al numero di ponti, mentre le colonne hanno la seguente specifica:

ID	Longitudine	Latitudine	Nome Ponte	Tip di Suolo
----	-------------	------------	------------	--------------

Anche in questo caso le coordinate devono essere fornite come **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Il tipo di suolo, coerentemente a quanto previsto dalle leggi di attenuazione, potrà essere A, B, C, D o E. Nell'immediato post-evento questo calcolo può riguardare tutti i ponti (file *.txt già in memoria per tutti i ponti). In tempo di pace, l'utente può essere interessato ad un solo ponte, o ad un gruppo di ponti. In tal caso, il foglio di testo con le caratteristiche dei ponti selezionati deve essere generato ad hoc su server. Se **num2=1**, l'utente potrà caricare un foglio di testo (identificato esattamente con il percorso **string8**) che dovrà avere le stesse specifiche riportate sopra. Se **num2=0**, l'utente sceglierà uno o un gruppo di ponti. A seguito di tale scelta, sul server dovrà essere creato un foglio di testo (identificato da **string7**) nel quale sono contenuti gli ID degli elementi dello shapefile selezionati.

num3: tale numero dovrà essere uguale a **0** o ad **1**. Se s'intende usare le stazioni caricate sul sistema sarà pari a **0**, altrimenti, se l'utente vuole caricare da un proprio foglio di testo, sarà uguale ad **1**. L'opzione di porre tale numero pari a 0, consiste nell'impiegare il sistema immediatamente dopo l'emergenza, quindi si presuppone che il gestore della rete fornisca i dati registrati dell'evento in termini di massima PGA nelle due direzioni per ogni stazione.

string9: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile delle stazioni ISNET (fornito con la presente routine).

String10: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo (*.txt) contenente le registrazioni per ciascuna stazione in termini di massima PGA lungo x. Se **num3=1**, **string9** deve essere posto pari a 'none'.

string11: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo (*.txt) contenente le registrazioni per ciascuna stazione in termini di massima PGA lungo y. Se **num3=1**, **string10** deve essere posto pari a 'none'.

string12: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo (*.txt) contenente le informazioni delle stazioni accelerometriche a disposizione. Tale foglio contiene una matrice con un numero di righe pari al numero di ponti, mentre le colonne hanno la seguente specifica:

ID	Longitudine	Latitudine	Nome Stazione	Tipo di suolo	PGA EW	PGA NS
----	-------------	------------	---------------	---------------	--------	--------

Anche in questo caso, coerentemente con le altre informazioni di base, le coordinate devono essere fornite come **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Il tipo di suolo, coerentemente a quanto previsto dalle leggi di attenuazione, potrà essere A, B, C, D o E. Le misure delle accelerazioni di picco (**PGA EW** e **PGA NS**) dovranno essere fornite in cm/s^2 .

Qualora non si volesse eseguire l'aggiornamento delle PGA basato sui dati provenienti dalle registrazioni, la **string12** dovrà essere semplicemente posta pari a **'none'**.

Nell'immediato post-evento i dati possono essere automaticamente scaricati dalle stazioni collegate al sistema. In tempo di pace l'utente potrà fare l'upload di un proprio file.

string13, string14, string15: queste tre stringhe sono i percorsi completi dei file di testo (*.txt), descritti più avanti, nei quali saranno memorizzati gli output del calcolo.

string16: questa stringa contiene la tipologia della legge di attenuazione da utilizzare. Per ora è implementata solo la legge di attenuazione di Bindi et al. 2011, indicata dalla stringa **'BP2011'**.

num4: questo numero è il valore di Magnitudo dell'evento considerato. Nell'immediato post-evento sarà fornito dai sismologi. Per eventi del passato, l'utente potrà inserire autonomamente il valore appropriato.

char1: questo carattere contiene il tipo di fagliazione, che potrà essere normale **'N'**, inversa **'R'**, trascorrente **'O'**, o nessuna delle tre. Nell'immediato post-evento sarà fornito dai sismologi. Per eventi del passato, l'utente potrà inserire autonomamente il valore appropriato.

num5: questo numero è rappresentativo del tipo di correlazione che si intende impiegare. Per ora è implementata l'assenza di correlazione (**0**) o la correlazione Esposito Iervolino 2011 (**1**).

num6: questo numero è rappresentativo del numero di simulazioni che si intende realizzare.

Informazioni relative ai file di Output

Output1 (string13): Il file di testo creato consiste in una matrice di PGA generate mediante simulazione. Il numero di righe è pari al numero di ponti che si intende esaminare. Il numero di colonne è pari al numero di simulazioni che sono state richieste. A partire da questo file è possibile eseguire un istogramma delle PGA simulate per ogni ponte.

Output2 (string14): Il file di testo generato consiste in una matrice contenente le pdf (Probability Density Function) relative alla legge di attenuazione scelta per ogni ponte. La prima riga è l'asse delle ascisse su cui la funzione è definita. Le altre righe sono relative ai ponti. (Quindi il file avrà un numero di righe pari al numero di ponti +1). Il numero di colonne è pari alla lunghezza del vettore delle ascisse.

Output3 (string15): Il file di testo generato consiste in una matrice contenente le statistiche delle pdf della legge di attenuazione scelte e delle simulazioni relative al ciascun ponte. I dati sono organizzati in una matrice con numero di righe pari al numero di ponti e con numero di colonne pari a 4 (mediana legge di attenuazione; deviazione standard legge di attenuazione; mediana simulazioni; deviazione standard simulazioni).

ISTRUZIONI DI FUNZIONAMENTO

Il file **pga_generator.jar** contiene una classe di nome **Class1** con un unico metodo di nome **pga_generator**. Nella stessa cartella in cui è contenuto **pga_generator.jar** deve essere contenuto anche il file **javabuilder.jar** specifico per la macchina (es. 32bit). La funzione restituisce in output tre files di testo contenenti solo i risultati da visualizzare. Una volta all'interno della cartella contenente la funzione, la chiamata da prompt sarà quella mostrata nel seguente esempio:

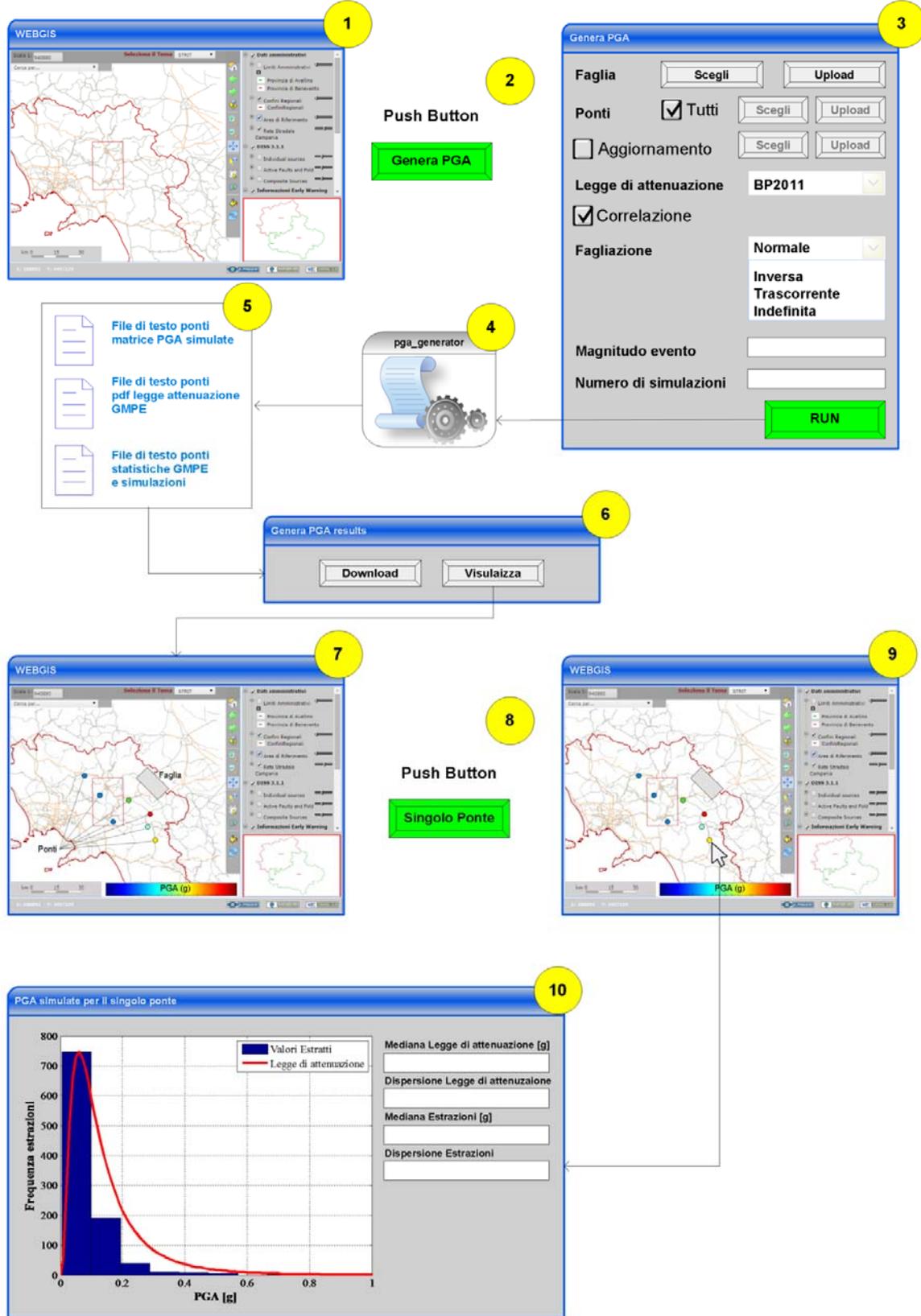
Esempio:

```
java -classpath javabuilder.jar;pga_generator.jar pga_generator.Class1
0
```



'E'
'Faglie\Eventi.shp'
'Faglie\Sorgenti.shp'
'Vallo_di_Diano_(1561,_Aug_19)'
'Faglie\FAGLIA.shp'
0
'PONTI\Ponti.shp'
'TXTNecessari\IDTuttiPonti.txt'
'TXTNecessari\IDPontiDiStudio.txt'
'PONTI\PUNTI.txt'
0
'Stazioni\STAZIONI_ISNET.shp'
'TXTNecessari\IMX.txt'
'TXTNecessari\IMY.txt'
'Stazioni\STAZIONI.txt'
'Output\ESTRAZIONI.txt'
'Output\pdfGMPE.txt'
'Output\statistiche.txt'
'BP2011'
5.9
'N'
1
1000

SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'INTERFACCIA GRAFICA



SPIEGAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELL'INTERFACCIA GRAFICA

Cliccando sull'apposito pulsante destinato alla funzione di generazione di campi di PGA associati al generico evento sismico (pga_generator), si prevede l'apertura di un apposita finestra (indicata con il numero 3 nel grafico) nella quale sarà necessario inserire tutte le informazioni necessarie.

In primo luogo dovrà essere indicata la faglia da impiegare per la generazione del campo di PGA da scenario. Tale faglia potrà essere o scelta tra quelli già caricata nel sistema (cliccando sul tasto scegli ci aspettiamo di tornare nella schermata del webgis e li poter scegliere una delle sorgenti caricate) oppure eventualmente potrà essere caricata dall'utente, purché essa risulti nello stesso formato di quelle già presenti in termini di sistema di riferimento. Cliccare sul tasto scegli o upload significa porre **num1** uguale a 0 oppure 1 rispettivamente. Quando si sceglie l'opzione "Scegli", l'interfaccia dovrà chiedere se usare una faglia da Eventi storici o da Sorgente sismo genetica (in modo che **char1** potrà essere messo pari a 'E' o 'S'). A seconda che l'utente scelga la faglia o carichi la faglia si avrà che **string3** dovrà essere rispettivamente o il percorso del file che viene generato a partire dagli shapefiles caricati sulla piattaforma (es. Faglia\Faglia.shp), oppure il percorso completo dello shapefile caricato dall'utente.

Quindi sarà necessario identificare il punto o i punti per i quali calcolare il campo di PGA. In particolare tali punti sono coincidenti con le posizioni dei ponti di interesse. L'utente potrà selezionarli tutti spuntando l'apposito check-box (il che significa porre **num2** pari a 0 e **string7** pari a **string6**), oppure potrà sceglierne solo alcuni (con l'apposito tasto scegli, cliccato il quale sarà possibile rientrare nella schermata webgis e selezionare con cursore i ponti di interesse, in modo che il sistema estragga gli ID e crei uno txt di ID il cui percorso è **string7**). Inoltre, l'utente potrà eventualmente caricare il file dei ponti a cui è interessato, purché risulti nello stesso formato di quello già presente (in tal caso **num2** è pari a 1 e **string7** è il percorso del file caricato).

Qualora l'utente volesse eseguire l'aggiornamento nella procedura di generazione del campo di PGA, spuntando la check-box aggiornamento (**string12** diversa da 'none'), si potrà prevedere o la selezione delle stazioni accelerometriche ISNET congiuntamente ai file delle registrazioni di massima PGA nelle due direzioni (**string10** e **string11**) contenenti le registrazioni storiche dell'evento oppure l'utente potrà caricare un proprio file, purché risulti nello stesso formato di quello già presente (il cui nome è contenuto nel percorso identificato da **string12**). Nel caso di scelta della rete ISNET, se il proprietario della rete fornirà i vettori di PGA massima in direzione X ed Y associati a vari eventi storici, allora sarà possibile prendere questi in input come **string10** e **string11**, altrimenti il tasto può rimanere temporaneamente disabilitato.

L'utente potrà quindi scegliere la legge di attenuazione (nella versione attuale c'è una sola legge di attenuazione) da impiegare per la generazione del campo di PGA e se considerare la correlazione spaziale mediante l'apposito check-box.

Potrà quindi essere selezionata la tipologia di fagellazione mediante l'apposita list-box (che potrà essere Normale, Inversa, Trascorrente o Indefinita) e dovrà essere inserito il valore della Magnitudo Momento dell'evento che si intende studiare.

Infine l'utente dovrà inserire il numero di simulazioni che intende eseguire.

Cliccando sul tasto RUN si farà partire la routine che genererà i due file di output.

Al termine dell'esecuzione della funzione, dovrà aprirsi una finestra (indicata con il numero 6 nel grafico) che consentirà all'utente o di scaricare i file di output, o di visualizzare i risultati.

Alla richiesta di visualizzazione, nella finestra principale del webgis, dovrà essere visualizzata la mappa delle PGA da legge di attenuazione (valore mediano) o la mediana delle simulazioni, per tutti i ponti che si è inteso studiare, usando una color-bar che va da 0.1 a 5 [g] con intervallo di 0.1 (possibilmente con colori che vanno dal verde al rosso).

Cliccando sul singolo ponte, dovrà aprirsi una finestra (indicata con il numero 10 nel grafico) nella quale mostrare l'istogramma dei valori ottenuti dalla procedura di simulazione, la pdf corrispondente alla legge di attenuazione ed un riassunto dei valori ottenuti dalle elaborazioni per quel ponte come mostrato in figura.

A1.4.2 A2.3.1 A 2.3.2 A2.3.3
Ricerca e sviluppo sull'analisi di pericolosità di una rete;
Ricerca e sviluppo su Decision Making multi-criterio su una rete di infrastrutture;
DSS per la gestione e programmazione integrata di interventi di adeguamento sismico o
manutenzione regolare della rete di infrastrutture.

NOME DLL PER WEB-GIS: network_analyzer.jar

Note tecniche per il funzionamento del Java Archive (jar)

Stefano Carozza, Raffaele De Risi, Fatemeh Jalayer

INFORMAZIONI PRELIMINARI DI CARATTERE GENERALE RELATIVE ALLA MACCHINA SU CUI LA ROUTINE DOVRÀ GIRARE.

Affinché la routine funzioni è necessario installare l'MCR installer (versione da aggiornare insieme alle versioni di Matlab e che deve tenere conto del sistema su cui si installa, ovvero 32 o 64 bit) sul server. Inoltre, è necessario che sia installata una versione **JavaTM SE Development Kit** (possibilmente la più recente, anche in questo caso si deve tenere conto della versione del sistema su cui si installa).

[Se si usa windows, dopo aver installato il Development Kit, è necessario aggiornare le variabili d'ambiente con il percorso contenente la cartella bin di java; es. *C:\Program Files\Java\jdkX.X.X\bin*. Per aggiornare le variabili d'ambiente si va in risorse del computer, tasto destro, proprietà, protezione sistema, avanzate, variabili d'ambiente; nella sezione *Path*, se sono presenti altri percorsi aggiungere dopo un punto e virgola il percorso (es. *C:\Program Files\Java\jdkX.X.X\bin*) seguito a sua volta da un punto e virgola].

CHIAMATA DELLA FUNZIONE

Il file **network_analyzer.jar** contiene una classe di nome **Class1** con un unico metodo di nome **network_analyzer**. Si riporta di seguito come la funzione deve essere richiamata (ad esempio da ambiente DOS, una volta che si è entrati all'interno della cartella contenente il **javabuilder** e la funzione stessa **network_analyzer.jar**):

```
java -classpath javabuilder.jar; network_analyzer.jar network_analyzer.Class1 string1 string2 string3
string4 num1 num2 num3 num4 num5 num6 num7
```

Le stringhe (string) ed i caratteri (char) dovranno essere poste tra apici. Tutti gli input vanno separati da uno spazio. Nella stessa cartella della funzione deve essere presente anche l'eseguibile **NetPatResearch.exe**.

INFORMAZIONI SPECIFICHE ALLA FUNZIONE *network_analyzer.jar*

Informazioni relative ai file di Input

string1: la prima stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile (*.shp) nel quale è contenuto il grafo della rete. È importante specificare che gli shapefile devono essere di coordinate **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Lo standard dello shapefile deve essere quello delle precedenti trasmissioni dal gruppo di lavoro OR2.3 a STRESS.

string2: la seconda stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile (*.shp) contenente le informazioni sui ponti. Anche in questo caso le coordinate devono essere fornite come **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Lo standard dello shapefile deve essere quello delle precedenti trasmissioni dal gruppo di lavoro OR2.3 a STRESS.

string3, string4: queste due stringhe sono i percorsi completi dei file di testo (*.txt), descritti più avanti, nei quali saranno memorizzati gli output del calcolo.

num1, num2: rispettivamente la coordinata X ed Y del punto di partenza A.

num3, num4: rispettivamente la coordinata X ed Y del punto di arrivo B.

num5, num6, num7: parametri dell'algoritmo di ricerca dei percorsi alternativi sulla rete, rispettivamente numero massimo di percorsi alternativi da ricercare, numero massimo di percorsi da indagare (parametro che limita le possibilità da indagare per evitare l'overflow, si consiglia comunque un numero > 50000), ed infine

numero massimo di iterazioni per ciascun percorso indagato (parametro di convergenza, si consiglia almeno pari a 500).

Informazioni relative ai file di Output

Output1 (string3): Il file di testo creato consiste in un file di testo (*.txt) contenente alcune informazioni sui ponti. Tale foglio contiene una matrice con un numero di righe pari al numero di ponti, mentre le colonne hanno la seguente specifica:

ID	Longitudine	Latitudine	Nome Ponte	Tip di Suolo
----	-------------	------------	------------	--------------

Le coordinate sono fornite con sistema di riferimento WGS_1984_UTM_Zone_33N. Il tipo di suolo, coerentemente a quanto previsto dalle leggi di attenuazione, potrà essere A, B, C, D o E.

Output2 (string4): Il file di testo generato consiste in una matrice contenente i percorsi alternativi identificati per raggiungere il punto B dal punto A. In particolare la prima colonna corrisponde all'ID del percorso, ed a seguire per ciascuna riga sono riportati gli ID dei nodi collegati:

ID Percorso	ID Nodo1	ID Nodo2	...	ID Nodoi	...	ID Nodo finale
-------------	----------	----------	-----	----------	-----	----------------

Output3: Il file di testo generato consiste in una matrice contenente i percorsi alternativi identificati per raggiungere il punto B dal punto A. In particolare la prima colonna corrisponde all'ID del percorso, ed a seguire per ciascuna riga sono riportati gli ID degli archi con riferimento allo shapefile di input (string1):

ID Percorso	ID Arco1	ID Arco2	...	ID Arcoi	...	ID Arco finale
-------------	----------	----------	-----	----------	-----	----------------

Questo ultimo file generato come output3 ha lo stesso nome di output2 con l'aggiunta di "_archi" dopo il nome del file (es. xxx_archi.txt).

A 2.3.2 A2.3.3

Ricerca e sviluppo su Decision Making multi-criterio su una rete di infrastrutture; DSS per la gestione e programmazione integrata di interventi di adeguamento sismico o manutenzione regolare della rete di infrastrutture.

NOME DLL PER WEB-GIS: network_reliability.jar

Note tecniche per il funzionamento del Java Archive (jar)

Stefano Carozza, Raffaele De Risi, Fatemeh Jalayer, Andrea Miano

INFORMAZIONI PRELIMINARI DI CARATTERE GENERALE RELATIVE ALLA MACCHINA SU CUI LA ROUTINE DOVRÀ GIRARE.

Affinché la routine funzioni è necessario installare l'MCR installer (versione da aggiornare insieme alle versioni di Matlab e che deve tenere conto del sistema su cui si installa, ovvero 32 o 64 bit) sul server. Inoltre, è necessario che sia installata una versione **Java™ SE Development Kit** (possibilmente la più recente, anche in questo caso si deve tenere conto della versione del sistema su cui si installa).

[Se si usa windows, dopo aver installato il Development Kit, è necessario aggiornare le variabili d'ambiente con il percorso contenente la cartella bin di java; es. *C:\Program Files\Java\jdkX.X.X\bin*. Per aggiornare le variabili d'ambiente si va in risorse del computer, tasto destro, proprietà, protezione sistema, avanzate, variabili d'ambiente; nella sezione *Path*, se sono presenti altri percorsi aggiungere dopo un punto e virgola il percorso (es. *C:\Program Files\Java\jdkX.X.X\bin*) seguito a sua volta da un punto e virgola].

CHIAMATA DELLA FUNZIONE

Il file **network_reliability.jar** contiene una classe di nome **Class1** con un unico metodo di nome **network_reliability**. Si riporta di seguito come la funzione deve essere richiamata (ad esempio da ambiente DOS, una volta che si è entrati all'interno della cartella contenente il **javabuilder** e la funzione stessa **network_reliability.jar**):

```
java -classpath javabuilder.jar; network_reliability.jar network_reliability.Class1 string1, string2, string3, string4, num1, char1, string01, string02, string03, string5, num2, strr0, strr1, strr2, num3, strrr0, IMX, IMY, string6, string7, string8, string9, string10, string11, string12, num4, num5, char2, num6, num7
```

Le stringhe (string) ed i caratteri (char) dovranno essere poste tra apici. Tutti gli input vanno separati da uno spazio.

INFORMAZIONI SPECIFICHE ALLA FUNZIONE *network_reliability.jar*

Informazioni relative ai file di Input

string1: la prima stringa deve contenere il percorso completo del file di testo dei percorsi alternativi identificati per raggiungere il punto B dal punto A. In particolare la matrice dei risultati ha la prima colonna corrisponde all'ID del percorso, ed a seguire per ciascuna riga sono riportati gli ID dei nodi collegati:

ID Percorso ID Nodo1 ID Nodo2 ... ID Nodoi ... ID Nodo finale

NB: **string1** è un file di output della routine **network analyzer**.

string2: la seconda stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile (*.shp) nel quale è contenuto il grafo della rete. È importante specificare che gli shapefile devono essere di coordinate **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Lo standard dello shapefile deve essere quello delle precedenti trasmissioni dal gruppo di lavoro OR2.3 a STRESS.

string3: la terza stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile (*.shp) contenente le informazioni sui ponti. Anche in questo caso le coordinate devono essere fornite come **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Lo standard dello shapefile deve essere quello delle precedenti trasmissioni dal gruppo di lavoro OR2.3 a STRESS.

string4: la quarta stringa deve contenere il percorso completo del file di testo contenente alcune informazioni sui ponti interessati dai percorsi trovati. Tale foglio contiene una matrice con un numero di righe pari al numero di ponti, mentre le colonne hanno la seguente specifica:

ID	Longitudine	Latitudine	Nome Ponte	Tip di Suolo
----	-------------	------------	------------	--------------

Le coordinate devono essere fornite con sistema di riferimento **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Il tipo di suolo, coerentemente a quanto previsto dalle leggi di attenuazione, potrà essere A, B, C, D o E.

NB: string4 è un file di output della routine network analyzer.

num1: tale numero dovrà essere uguale a **0** o ad **1**. Se l'utente vuole scegliere la faglia tra quelle caricate sul sistema sarà pari a **0**, altrimenti, se vuole caricarla da un proprio shapefile, sarà uguale ad **1**.

char1: tale carattere dovrà essere 'E' o 'S'. Se l'utente vuole scegliere una faglia per riprodurre un evento del passato dovrà essere posto pari ad 'E' altrimenti, se l'utente intende impiegare una sorgente sismogenetica, il carattere dovrà essere pari a 'S'. Se **num1=1**, **char1** deve essere posto pari a 'n' (ovvero none)

string01: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile delle faglie attivate dagli eventi storici. Se **num1=1**, **string01** deve essere posto pari a 'none'.

String02: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile delle faglie intese quali sorgenti sismogenetiche. Se **num1=1**, **string02** deve essere posto pari a 'none'.

String03: tale stringa deve contenere il nome della faglia che si intende esaminare. Tale stringa dovrà essere pari ad una qualsiasi delle stringhe contenute nei fogli di testo **NomiEventi.txt** e **NomiSorgente.txt** contenuti nella cartella **TXTNecessari** (forniti con la presente routine). Tali nomi, sono gli stessi che caratterizzano le faglie contenute negli shapefiles **Eventi.shp** e **Sorgenti.shp** contenuti nella cartella **Faglie** (forniti con la presente routine).

String5: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile (*.shp) relativo alla proiezione in superficie della faglia di interesse. Nell'immediato post-evento, tale faglia è relativa a dove è avvenuto l'evento e quindi viene identificata dai sismologi. In tempo di pace, è l'utente che può scegliere (o caricare) lo shapefile relativo alla faglia di interesse. In particolare se l'utente vuole caricarla (**num1=1**) lo shapefile può essere qualsiasi in termini geometrici (poligono, linea, punto) ed una volta caricato esso sarà indicato da **string5**. Se l'utente vuole scegliere la faglia (**num1=0** e specifica di **char1** e **string03**) lo shapefile di lavoro sarà salvato come indicato nel percorso completo **string5** a seguito di una opportuna lavorazione a partire dagli shapefiles presenti sulla piattaforma (definiti precedentemente da **string01** e **string02**). È importante specificare che gli shapefiles (come quelli forniti con la presente routine) devono essere di coordinate **WGS_1984_UTM_Zone_33N**.

num2: tale numero dovrà essere uguale a **0** o ad **1**. Se l'utente vuole scegliere i ponti tra quelli caricati sul sistema sarà pari a **0**, altrimenti, se vuole caricare da un proprio foglio di testo, sarà uguale ad **1**. **NB: Per questa routine deve essere posto sempre pari a 1.**

strr0: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile dei ponti (fornito con la presente routine). Se **num2=1**, **string5** deve essere posto pari a 'none'. **NB: Per questa routine strr0 è posto pari a string3.**

strr1: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo contenente gli ID di tutti i ponti contenuti all'interno dello shapefile di tutti i ponti (fornito con la presente routine). Se **num2=1**, **strr1** deve essere posto pari a 'none'.

strr2: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo contenente gli ID dei soli ponti di interesse per la routine. Tale foglio di testo contiene gli ID a seguito della selezione dei ponti sulla piattaforma. Se **num2=1**, **strr2** deve essere posto pari a 'none'.

num3: tale numero dovrà essere uguale a **0** o ad **1**. Se s'intende usare le stazioni caricate sul sistema sarà pari a **0**, altrimenti, se l'utente vuole caricare da un proprio foglio di testo, sarà uguale ad **1**. L'opzione di porre

tale numero pari a 0, consiste nell'impiegare il sistema immediatamente dopo l'emergenza, quindi si presuppone che il gestore della rete fornisca i dati registrati dell'evento in termini di massima PGA nelle due direzioni per ogni stazione.

strrr0: tale stringa deve contenere il percorso completo dello shapefile delle stazioni ISNET (fornito con la presente routine).

IMX: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo (*.txt) contenente le registrazioni per ciascuna stazione in termini di massima PGA lungo x. Se **num3=1**, **IMX** deve essere posto pari a 'none'.

IMY: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo (*.txt) contenente le registrazioni per ciascuna stazione in termini di massima PGA lungo y. Se **num3=1**, **IMY** deve essere posto pari a 'none'.

String6: tale stringa deve contenere il percorso completo del foglio di testo (*.txt) contenente le informazioni delle stazioni accelerometriche a disposizione. Tale foglio contiene una matrice con un numero di righe pari al numero di ponti, mentre le colonne hanno la seguente specifica:

ID	Longitudine	Latitudine	Nome Stazione	Tipo di suolo	PGA EW	PGA NS
----	-------------	------------	---------------	---------------	--------	--------

Anche in questo caso, coerentemente con le altre informazioni di base, le coordinate devono essere fornite come **WGS_1984_UTM_Zone_33N**. Il tipo di suolo, coerentemente a quanto previsto dalle leggi di attenuazione, potrà essere A, B, C, D o E. Le misure delle accelerazioni di picco (**PGA EW** e **PGA NS**) dovranno essere fornite in cm/s^2 .

Qualora non si volesse eseguire l'aggiornamento delle PGA basato sui dati provenienti dalle registrazioni, la **string6** dovrà essere semplicemente posta pari a 'none'.

Nell'immediato post-evento i dati possono essere automaticamente scaricati dalle stazioni collegate al sistema. In tempo di pace l'utente potrà fare l'upload di un proprio file.

string7, string8, string9: queste tre stringhe sono i percorsi completi dei file di testo (*.txt), descritti più avanti, nei quali saranno memorizzati i primi tre dei cinque output del calcolo.

string10: questa stringa contiene la tipologia della legge di attenuazione da utilizzare. Per ora è implementata solo la legge di attenuazione di Bindi et al. 2011, indicata dalla stringa **'BP2011'**.

string11, string12: queste due stringhe contengono rispettivamente i percorsi completi in cui verranno salvati gli ultimi due output dei cinque forniti dalla routine, meglio illustrati di seguito.

num4: questo numero è identificativo dello stato limite che si vuole considerare. È pari a 0 per lo stato limite di danno e pari ad 1 per lo stato limite di collasso.

num5: questo numero è il valore di Magnitudo dell'evento considerato. Nell'immediato post-evento sarà fornito dai sismologi. Per eventi del passato, l'utente potrà inserire autonomamente il valore appropriato.

char2: questo carattere contiene il tipo di fagliazione, che potrà essere normale '**N**', inversa '**R**', trascorrente '**O**', o nessuna delle tre. Nell'immediato post-evento sarà fornito dai sismologi. Per eventi del passato, l'utente potrà inserire autonomamente il valore appropriato.

num6: questo numero è rappresentativo del tipo di correlazione che si intende impiegare. Per ora è implementata l'assenza di correlazione (**0**) o la correlazione Esposito Iervolino 2011 (**1**).

num7: questo numero è rappresentativo del numero di simulazioni che si intende realizzare.

Informazioni relative ai file di Output

Output1 (string7): Il file di testo creato consiste in una matrice di PGA generate mediante simulazione. Il numero di righe è pari al numero di ponti che si intende esaminare. Il numero di colonne è pari al numero di simulazioni che sono state richieste. A partire da questo file è possibile eseguire un istogramma delle PGA simulate per ogni ponte.

Output2 (string8): Il file di testo generato consiste in una matrice contenente le pdf (Probability Density Function) relative alla legge di attenuazione scelta per ogni ponte. La prima riga è l'asse delle ascisse su cui la funzione è definita. Le altre righe sono relative ai ponti. (Quindi il file avrà un numero di righe pari al numero di ponti +1). Il numero di colonne è pari alla lunghezza del vettore delle ascisse.

Output3 (string9): Il file di testo generato consiste in una matrice contenente le statistiche delle pdf della legge di attenuazione scelte e delle simulazioni relative al ciascun ponte. I dati sono organizzati in una matrice con numero di righe pari al numero di ponti e con numero di colonne pari a 4 (mediana legge di attenuazione; deviazione standard legge di attenuazione; mediana simulazioni; deviazione standard simulazioni).

Output4 (string11): Il file di testo generato consiste in due valori: la probabilità di superamento dello stato limite considerato (P) ed il relativo indice di affidabilità (β) dell'intera rete.

Output5 (string12): Il file di testo generato consiste in una matrice contenente le informazioni affidabilistiche per ciascun percorso alternativo trovato. I dati sono organizzati in colonne secondo il seguente schema:

ID percorso | Lunghezza [km] | % tratto autostradale | tempo di percorrenza [min] | n° ponti interessati | Lunghezza ponti [km] | Perdita attesa[mIn€] | Probabilità di failure percorso | Indice di affidabilità percorso

ISTRUZIONI DI FUNZIONAMENTO

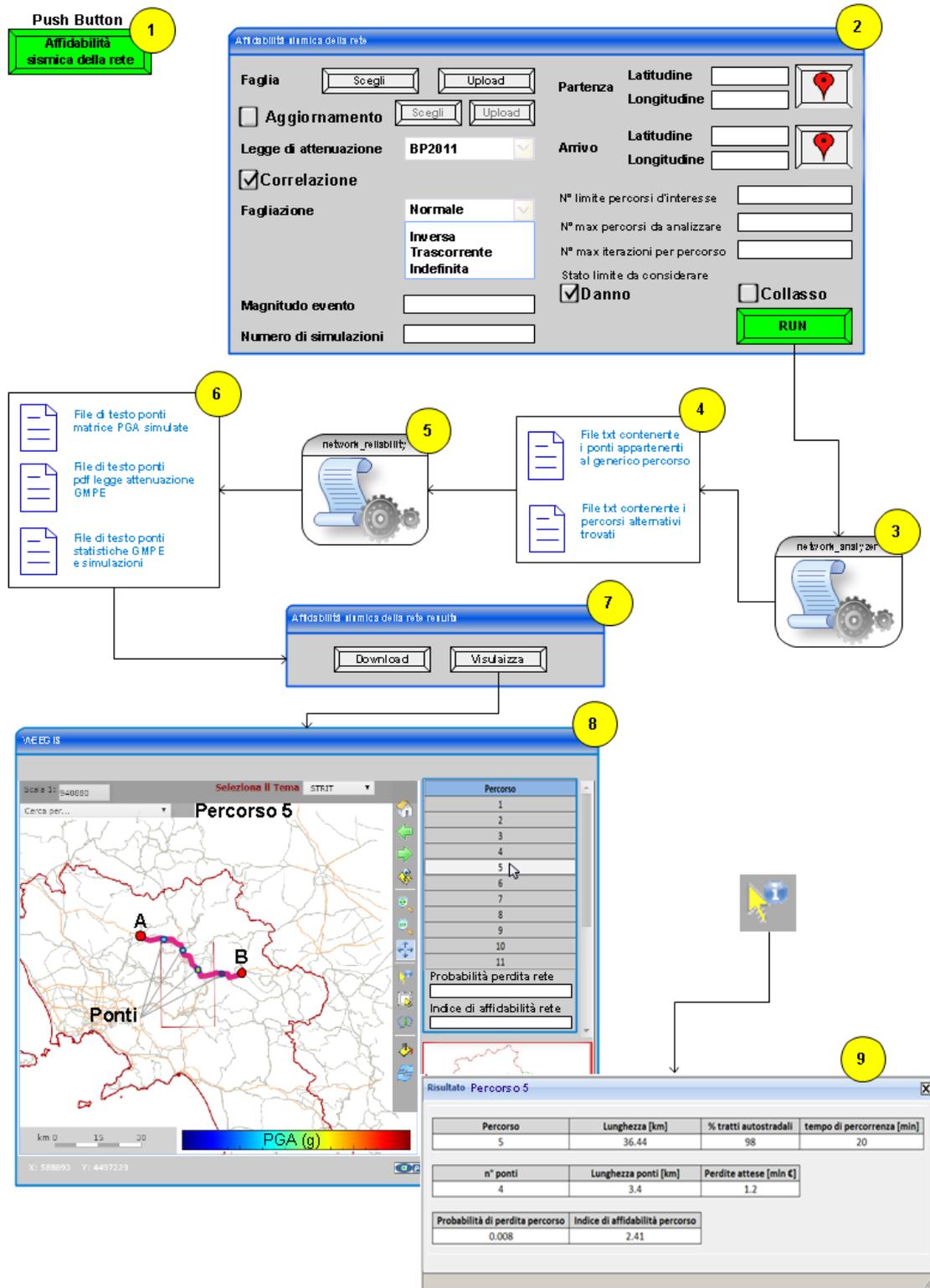
Il file **network_reliability.jar** contiene una classe di nome **Class1** con un unico metodo di nome **network_reliability**. Nella stessa cartella in cui è contenuto **pga_generator.jar** deve essere contenuto anche il file **javabuilder.jar** specifico per la macchina(es. 32bit). La funzione restituisce in output tre files di testo contenenti solo i risultati da visualizzare. Una volta all'interno della cartella contenente la funzione, la chiamata da prompt sarà quella mostrata nel seguente esempio:

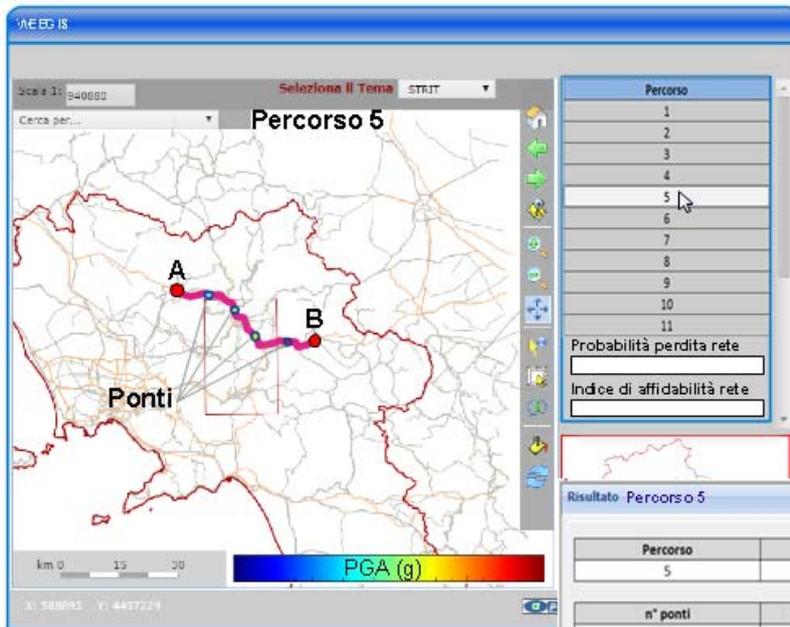
Esempio:

```
java -classpath javabuilder.jar; network_reliability.jar network_reliability.Class1
```

```
'PERCORSI.txt';
'Rete\ReteCampaniaWEBGIS3.shp';
'Ponti\Ponti.shp';
'PONTI.txt';
0
'E'
'Faglie\Eventi.shp'
'Faglie\Sorgenti.shp'
'Vallo_di_Diano_(1561,_Aug_19)'
'Faglie\FAGLIA.shp'
1
'Ponti\Ponti.shp'
'TXTNecessari\IDTuttiPonti.txt'
'TXTNecessari\IDTuttiPonti.txt'
0
'Stazioni\STAZIONI_ISNET.shp'
'TXTNecessari\IMX.txt'
'TXTNecessari\IMY.txt'
'Output\STAZIONI.txt'
'Estrazioni.txt'
'pdf.txt'
'statistiche.txt'
'BP2011'
'failureRete.txt'
'tabella.txt'
1
5
'N'
0
50
```

SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'INTERFACCIA GRAFICA





Percorso
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

Probabilità perdita rete
Indice di affidabilità rete

Risultato Percorso 5

Percorso	Lunghezza [km]	% tratti autostradali	tempo di percorrenza [min]
5	36.44	98	20

n° ponti	Lunghezza ponti [km]	Perdite attese [min €]
4	3.4	1.2

Probabilità di perdita percorso	Indice di affidabilità percorso
0.008	2.41

Push Button

Tutti i percorsi

10

Risultato

Percorso	Lunghezza [km]	% tratti autostradali	tempo di percorrenza [min]	n° ponti	Lunghezza ponti [km]	Perdite attese [min €]	Probabilità di perdita percorso	Indice di affidabilità percorso
1	20.43	92	12	5	4.3	1.5	0.01	2.3263
2	22.52	91	13	4	3.4	1.2	0.008	2.4089
3	27.91	94	16	3	2.6	0.9	0.006	2.5121
4	29.44	99	17	7	6.0	2.1	0.014	2.1973
5	36.44	98	20	4	3.4	1.2	0.008	2.4089
6	37.54	97	20	2	1.7	0.6	0.004	2.6521
7	38.64	96	21	9	7.7	2.7	0.018	2.0969
8	39.45	94	21	8	6.8	2.4	0.016	2.1444
9	41.42	95	22	4	3.4	1.2	0.008	2.4089
10	43.54	90	23	3	2.6	0.9	0.006	2.5121
11	48.56	88	25	5	4.3	1.5	0.01	2.3263

N.B.: Cliccando sull'header di ogni colonna della tabella dovrà essere possibile ordinare i dati delle colonne in ordine crescente o decrescente, in modo che l'utente potrà identificare autonomamente qual'è il percorso migliore in termini del parametro che meglio ritiene interessante per la sua ricerca.

SPIEGAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELL'INTERFACCIA GRAFICA

Cliccando sull'apposito pulsante destinato alla funzione di ricerca dei percorsi (network_reliability), si prevede l'apertura di un apposita finestra (indicata con il numero 2 nel grafico) nella quale sarà necessario inserire tutti i dati necessari.

In primo luogo dovrà essere indicata la faglia da impiegare per la generazione del campo di PGA da scenario. Tale faglia potrà essere o scelta tra quelli già caricata nel sistema (cliccando sul tasto scegli ci aspettiamo di tornare nella schermata del webgis e li poter scegliere una delle sorgenti caricate) oppure eventualmente potrà essere caricata dall'utente, purché essa risulti nello stesso formato di quelle già presenti.

Qualora l'utente volesse eseguire l'aggiornamento nella procedura di generazione del campo di PGA, spuntando la check-box aggiornamento, si potrà prevedere o la selezione delle stazioni accelerometriche da cui estrarre le registrazioni storiche dell'evento oppure l'utente potrà caricare un proprio file, purché risulti nello stesso formato di quello già presente.

L'utente potrà quindi scegliere la legge di attenuazione (nella versione attuale c'è una sola legge di attenuazione) da impiegare per la generazione del campo di PGA e se considerare la correlazione spaziale mediante l'apposito check-box.

Potrà quindi essere selezionata la tipologia di fagliazione mediante l'apposita list-box (che potrà essere Normale, Inversa, Trascorrente o Indefinita) e dovrà essere inserito il valore della Magnitudo Momento dell'evento che si intende studiare.

Dovranno essere inserite (o scelte direttamente dalla finestra webgis) le coordinate del nodo iniziale e finale.

Quindi l'utente potrà scegliere i tre parametri di convergenza dell'algorithm. Si consiglia di mostrare di default i tre parametri indicati nei fogli illustrativi della funzione (ovvero 50 50000 e 500).

Prima di far girare la routine dovrà essere inserito lo stato limite al quale sono associati i calcoli (potrà essere spuntato solo una delle due opzioni, quindi quando sarà spuntata una (ad esempio collasso), sarà spuntata l'altra (ad esempio collasso) e viceversa).

Cliccando sul tasto RUN si farà partire in primo luogo la routine "network_analyzer" che restituirà i due file di output necessari al fine di eseguire le rimanenti analisi. Quindi dovrà partire "network_reliability" la routine che genererà i file di output finali.

Al termine dell'esecuzione della funzione, dovrà aprirsi una finestra (indicata con il numero 7 nel grafico) che consentirà all'utente o di scaricare i file di output, o di visualizzare i risultati.

Alla richiesta di visualizzazione, nella finestra principale del webgis, sarebbe opportuno avere una colonna di scelte dei percorsi trovati. Cliccando sull'i-esimo percorso, sarà necessario visualizzare il percorso sulla mappa, indicando i punti iniziale e finale, ed inoltre sarà necessario mostrare la posizione dei ponti appartenenti al percorso, e per ciascun ponte sarà necessario mostrare la PGA mediana delle simulazioni eseguite con un opportuna color-bar che va da 0.1 a 5 [g] con colori possibilmente dal verde al rosso.

Come risultato immediato in opportune text-box al di sotto della colonna di scelta dei percorsi (come mostrato in figura nella finestra 8) dovranno essere mostrati i valori di probabilità di fallimento della rete ed il relativo indice di affidabilità associato allo stato limite scelto.

Cliccando il testo informazioni, e quindi selezionando l'i-esimo percorso, dovrà aprirsi una finestra riepilogativa di percorso come quella mostrata in figura con il numero 9.

Infine, dovrà prevedersi anche la possibilità di far apparire, cliccando su di un appositi tasto, la tabella riepilogativa di tutti i percorsi individuati, come mostrato nella figura al numero 10.



10 Allegato B: Ricerca dei percorsi minimi

1. INTRODUZIONE

Il problema della ricerca di percorsi per la circolazione di mezzi di soccorso specifici a seconda delle origini e delle destinazioni del servizio da erogare e dello stato della rete è di particolare importanza nello scenario post-sismico. Posto che comunque l'esperienza umana in queste situazioni è un fattore imprescindibile nelle operazioni di soccorso, avere a disposizione le informazioni sistematizzate, rappresenta già un ausilio di grande importanza. Sulla base di queste informazioni è, inoltre, possibile sviluppare algoritmi che consentano di analizzare lo stato della rete di trasporto stradale e che propongano insiemi di percorsi, a supporto al decisore al fine di far muovere i soccorsi nel modo più razionale possibile.

Il problema può essere affrontato in differenti maniere a seconda delle informazioni disponibili e del livello di dettaglio che la soluzione deve provvedere:

- definire una matrice di connettività che descriva la rete utilizzabile nella fase post-sismica, ed esplorarla con un algoritmo a prescindere da ogni altra informazione, per esempio come suggerito da Baratta e alt. (1991);
- associare al grafo della rete disponibile informazioni quali il tempo di attraversamento, l'efficienza residua dell'arco al fine di definire una funzione che permetta di classificare i percorsi ottenuti mediante un algoritmo di ottimizzazione;

Nell'ambito del presente progetto si è valutato come adeguata l'implementazione del secondo punto e nel proseguo è definita una procedura che consente di implementare una ricerca ed ottimizzazione dei percorsi per date origini e destinazioni in presenza di una specifica funzione di peso associata agli archi della rete.

1.1 Algoritmo di dijkstra

Il problema dell'individuazione di un percorso di costo totale minimo in un grafo (orientato o meno), con un nodo origine (o sorgente) ed un nodo destinazione (o terminale), può, in molti casi, essere facilmente formulato come un problema di flusso su reti di costo minimo. Si può infatti pensare che un percorso orientato da un'origine ad una destinazione possa essere individuato immaginando di immettere una unità di flusso dal nodo sorgente e prelevando tale unità dal nodo terminale. Se valgono alcune semplici ipotesi (in particolare se si assume che nel grafo non esistano circuiti chiusi di costo totale negativo), allora si può facilmente dimostrare che tra le soluzioni ottimali della formulazione del problema in termini di programmazione lineare ne esiste sempre almeno una (nel caso in cui il percorso minimo esista) binaria; gli archi corrispondenti alle componenti della soluzione pari ad uno formano un percorso di costo minimo sorgente/destinazione (Schoen, 2003).

L'algoritmo di Dijkstra procede attraverso un'etichettatura dei nodi del grafo (cioè ad una attribuzione di valori numerici ai nodi); tali etichette vengono variate nel corso dell'algoritmo, ma, da una certa iterazione in poi, divengono "definitive": l'algoritmo rientra nella categoria dei metodi cosiddetti "label-setting", nei quali cioè le etichette vengono gradualmente fissate a valori definitivi e procedono fino al momento in cui tutte le etichette non vengono fissate. Esiste un'altra categoria

di metodi, detti “label-correcting”, nei quali le etichette subiscono modificazioni ad ogni iterazione, che terminano non appena nel corso di due iterazioni successive nessuna etichetta viene modificata.

E’ importante notare che l’algoritmo di Dijkstra può essere applicato esclusivamente a grafi con archi di costo non negativo. La sua applicazione a grafi con archi di costo negativo tipicamente porta alla determinazione di soluzioni subottimali.

Lo schema dell’algoritmo di Dijkstra è il seguente:

Inizializzazione: siano $R = \emptyset, \rho(s) = 0, \rho(v) = +\infty \forall v \in V \setminus \{s\}$;

Ciclo: finché $t \notin R$;

Grafo sconnesso: se $\min\{\rho(v) : v \notin R\} = +\infty$ l’algoritmo termina: il nodo t non è raggiungibile da s ; altrimenti:

etichetta minima: sia $v_{\min} \in \arg \min\{\rho(v) : v \notin R\}$;

etichetta definitiva: $R = R \cup \{v_{\min}\}$;

aggiornamento: $\rho(v) = \min\{\rho(v), \rho(v_{\min}) + c_{v_{\min},v}\} \forall v \notin R$;

fine ciclo.

Nella fase di aggiornamento delle etichette viene adottata la convenzione di porre $c_{ij} = +\infty$ se $(i, j) \notin E$. In alternativa, si può pensare che l’aggiornamento venga effettuato solo per i nodi v direttamente connessi a v_{\min} .

Se l’algoritmo venisse eseguito fino all’etichettatura definitiva di ogni nodo di V (cioè fino a quando non si verificasse che $R = V$), il risultato sarebbe un albero di percorsi di minimo costo dall’origine s ad ogni altro nodo del grafo. Naturalmente, se il grafo G non fosse connesso, ed, in particolare, non esistesse alcun cammino orientato da s ad un certo nodo v , l’etichetta di v resterebbe pari a $+\infty$.

L’algoritmo di Dijkstra, se eseguito su un grafo con costi non negativi, determina, in un numero finito di passi, una soluzione ottimale al problema del cammino di costo minimo. Infatti valgono le proprietà seguenti.

Dato un grafo $G = \langle V, E \rangle$ pesato con costi non negativi, le etichette definitive assegnate dall’algoritmo di Dijkstra ad ogni nodo $v \in R$ rappresentano il costo di un cammino minimo da s a tale nodo. Inoltre, ad ogni iterazione intermedia, l’etichetta temporanea di ogni nodo rappresenta il minimo costo di un cammino da s a tale nodo in cui i nodi intermedi sono tutti in R .

Dato un grafo pesato (con costi di segno qualunque), se v_1, v_2, \dots, v_k è un cammino di costo minimo tra due nodi v_1 e v_k , allora, per ogni coppia di nodi intermedi v_i e v_j di questo cammino, si ha che il sottocammino $v_i \dots v_j$ rappresenta un cammino di costo minimo da v_i a v_j .

1.1.1 Esempio

In questo esempio si mostreranno le iterazioni compiute dall'algoritmo di Dijkstra su un semplice grafo orientato (Schoen, 2003). Nelle successive figure sono riportati i differenti passaggi della ricerca del percorso minimo tra la sorgente s e l'obiettivo (target) t . Gli archi sono caratterizzati dai pesi riportati in valore al fianco dei segmenti.

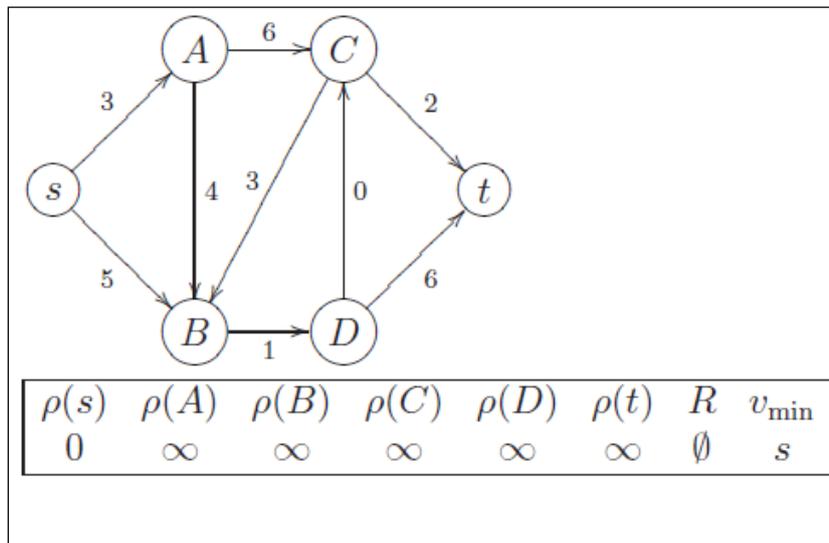


Figura A. 1: **Passo 0 - Descrizione del grafo e funzione di analisi**

In Figura A. 1 è riportata la topologia del grafo analizzato comprensivo del valore assunto dalla funzione di peso per i differenti archi e la tabella in cui è riportata la funzione di labelling dei differenti nodi.

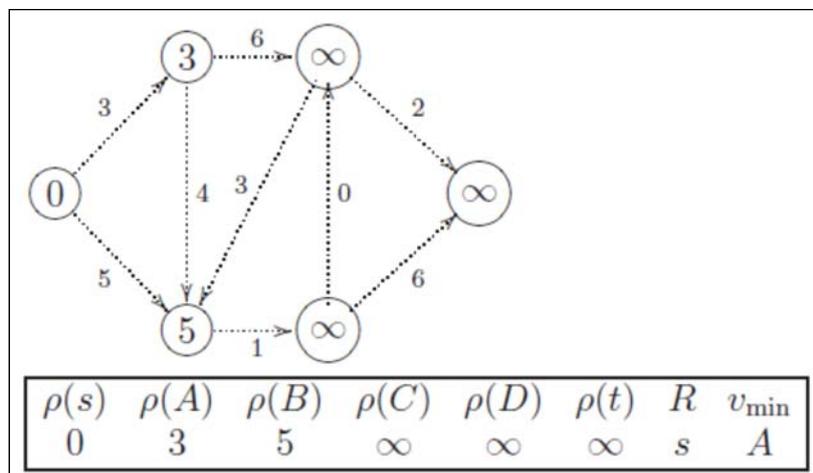


Figura A. 2: **Passo 1 - Analisi dei nodi A e B**

In Figura A. 2 è riportato il primo passo dell'analisi in cui sono definiti i valori di labelling dei nodi A e B sulla base delle funzioni i peso dei primi due archi.

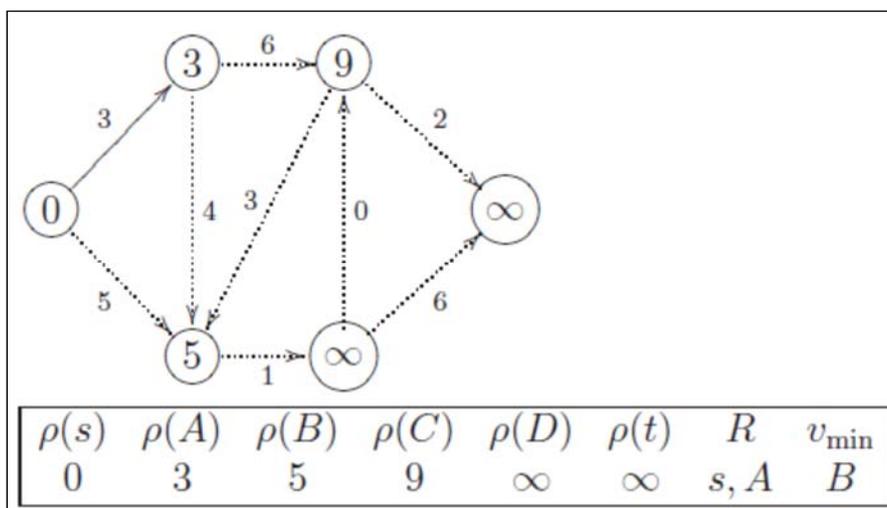


Figura A. 3: **Passo 2 - Analisi del nodo C**

In Figura A. 3 è riportato il secondo passo dell'analisi in cui è assegnata la funzione di labelling al nodo C mediante l'unico percorso possibile dal nodo A.

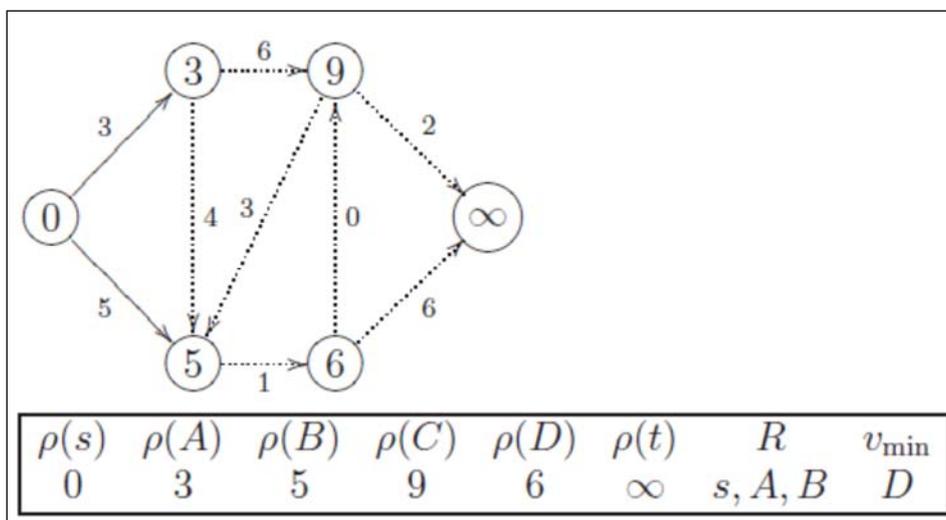


Figura A. 4: **Passo 3 - Analisi del nodo D**

In Figura A. 4 è riportato il terzo passo dell'analisi in cui è assegnato il valore della funzioni di labelling al nodo D mediante il percorso possibile dal nodo B.

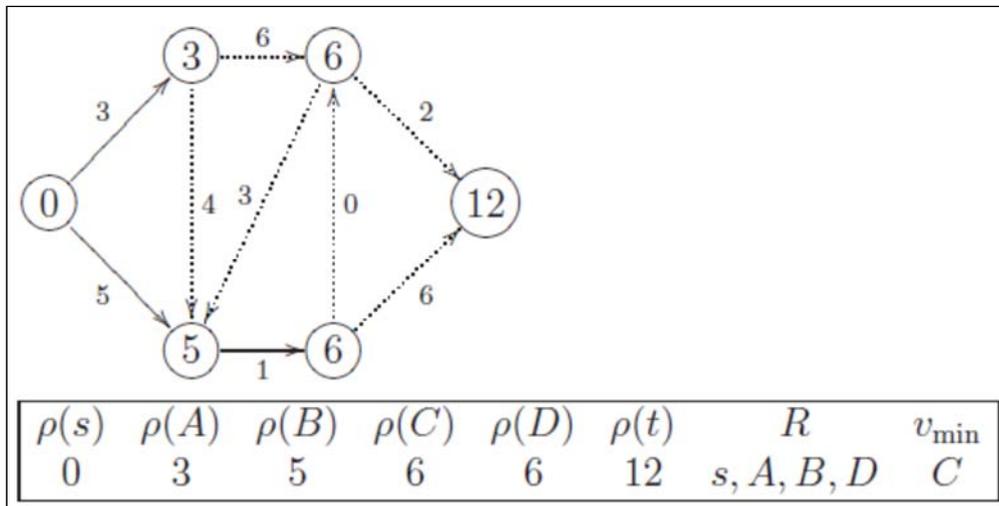


Figura A. 5: **Passo 4 - Primo percorso s,A,B,D**

In Figura A. 5 è riportato il quarto passo della procedura in cui il valore della funzioni di labelling del nodo C è aggiornata a partire dal nodo D mediante l'arco a peso 0 e il valore della funzione di labelling del target t è posto pari a 12 a partire dal nodo D mediante l'arco di peso 6.

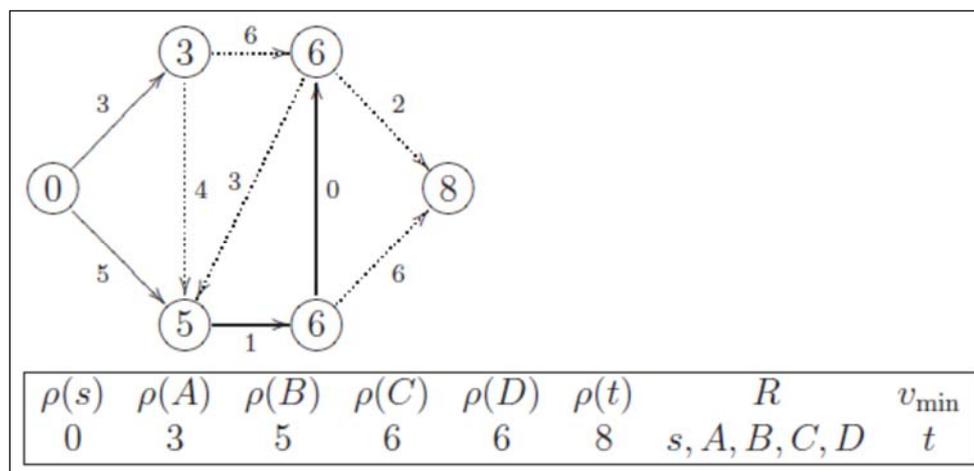


Figura A. 6: **Passo 6 - Secondo percorso s,A,B,C,D**

In Figura A. 6 è raggiunto il target t dal nodo C mediante l'arco a peso 2.

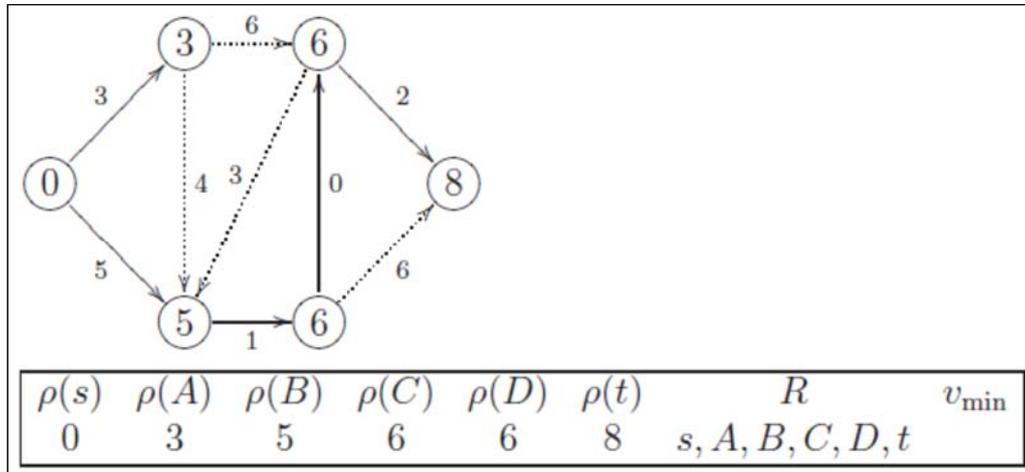


Figura A. 7: **Passo 6 - Secondo minimo s,A,B,C,D,t**

In Figura A. 7 avendo esaurito tutti i percorsi possibili si determina che il percorso ottimo per andare da s a t è S,A,B,C,D,t ed ha un peso complessivo $\rho(t) = 8$.

Modelli di utilità aleatoria per la simulazione della scelta del percorso

Il presente paragrafo particularizza l'applicazione al contesto di scelta del percorso dei modelli di utilità aleatoria illustrando in particolare come ciò comporti, in molti casi, una sostanziale modifica o riformulazione del modello stesso.

Un percorso può definirsi come una sequenza ordinata di archi che collega una coppia origine-destinazione senza passare per due volte attraverso lo stesso nodo. Per quanto attiene alla simbologia adottata per descrivere la topologia della rete, a seconda dei casi si parlerà indifferentemente di un generico arco indicandolo con una lettera minuscola dell'alfabeto latino ovvero identificandolo come una coppia di nodi.

Coerentemente con le ipotesi generali alla base della teoria dell'utilità aleatoria a ciascun percorso k è associata un'utilità percepita U_k , espressa come:

$$U = V + \varepsilon = -C + \varepsilon$$

nella quale si è evidenziato che l'utilità sistematica rappresenta, in realtà, una disutilità che può essere definita in termini del costo C_k del percorso considerato. In particolare, C_k può essere espresso nel seguente modo:

$$C_k = \sum c_l + C_{kNA}$$

dove c_l è il costo dell'arco l, la sommatoria è estesa a tutti gli archi del percorso k e C_{kNA} rappresenta una componente di costo cosiddetta non additiva, ovvero specifica del percorso stesso e dunque non riconducibile a combinazione di costi di arco;

In generale, si ipotizza che l'utilità di percorso U_k sia data dalla somma delle utilità percepite u_l di tutti gli archi che lo compongono per cui, in assenza della componente non additiva, indicando con η il residuo aleatorio delle variabili di arco, si può scrivere:

$$U_k = \sum u_l$$

$$u = -c + \eta$$

1.1.2. Logit Multinomiale

L'applicazione del modello Logit Multinomiale al contesto di scelta del percorso può essere formalmente espressa come:

$$p[k] = \frac{e^{-C_k/\theta_0}}{\sum_h e^{-C_h/\theta_0}}$$

Nella pratica, l'impossibilità di simulare la correlazione tra alternative di scelta a seguito dell'ipotesi di indipendenza delle utilità percepite rende di solito non conveniente l'adozione tout court di modelli di scelta del percorso di tipo Logit Multinomiale, in conseguenza del forte grado di sovrapposizione che in genere caratterizza i percorsi disponibili, a meno che non si adottino euristiche di selezione dell'insieme di scelta che escludano a priori la presenza di alternative correlate. Peraltro, sulla base del modello Logit Multinomiale è stato storicamente proposto in letteratura da Dial il primo algoritmo per il calcolo dei flussi di arco con approccio implicito e selettivo. Per descrivere l'algoritmo occorre definire in primo luogo il concetto di efficienza di un arco rispetto all'origine e/o rispetto alla destinazione: seguendo la definizione di Dial, un arco ij è efficiente rispetto all'origine se il costo $Z_{o,j}$ del minimo percorso per raggiungerne la testa j è maggiore del costo $Z_{o,i}$ del minimo percorso per raggiungerne la coda i , ed analogamente è efficiente rispetto alla destinazione se $Z_{j,d} > Z_{i,d}$. Si osservi che dalla definizione posta segue che gli archi appartenenti all'albero di minimo costo di radice sono per definizione efficienti rispetto all'origine, ed analogamente accade rispetto alla destinazione. E' allora immediato estendere la definizione di efficienza ad un percorso, affermando che un percorso è efficiente se e solo se lo sono tutti i suoi archi.

Dal punto di vista teorico, l'algoritmo prende avvio dalla constatazione che la probabilità di scegliere un percorso k nell'insieme K_{od} dei percorsi disponibili da o a d risulta proporzionale al costo del percorso stesso:

$$p[k] \propto \exp(-C_k/\theta)$$

Ricordando che C_k si può esprimere in funzione dei costi di arco c_{ij} la precedente relazione può scriversi come:

$$p[k] \propto \exp(-C_k/\theta) = \prod_{ij \in k} \exp(-c_{ij}/\theta)$$

La probabilità di scelta $p[k/od]$ si può esprimere a sua volta come la probabilità $p[ij/j]$ di scegliere ciascun arco ij del percorso condizionata alla scelta del nodo finale j :

$$p[k] = \prod p[ij/j]$$

1.2.3. C-Logit

Come osservato, il modello Logit Multinomiale non è in grado di tenere in considerazione gli effetti delle covarianze tra le alternative di scelta, in virtù dell'ipotesi di indipendenza delle utilità percepite delle alternative di scelta; per questo motivo, in letteratura si sono proposti approcci modellistici alternativi che consentissero di superare questo limite, pur basandosi sulla stessa forma funzionale e quindi conservandone i vantaggi computazionali ed operativi. Il modello C-Logit introduce una correlazione tra percorsi attraverso un attributo di costo aggiuntivo CF_k , detto fattore di sovrapposizione o commonality factor. Attraverso tale fattore si esprime la correlazione tra due percorsi in funzione del loro grado di sovrapposizione, valutato in termini di costo degli archi condivisi dei due percorsi; da ciò consegue che CF_k è nullo se nessun arco di k è condiviso con altri percorsi della rete, ed è tanto maggiore quanti più numerosi sono i percorsi che condividono gli archi più rilevanti del percorso k . In questo modo, attraverso il CF_k si riduce l'utilità sistematica e quindi la probabilità di scelta dei percorsi molto correlati rispetto a quelli indipendenti. Ricordando l'espressione del Logit Multinomiale si può formulare in forma chiusa la probabilità di scelta di ciascun percorso come:

$$p[k] = \frac{e^{-(C_k + CF_k)/\theta_0}}{\sum_h e^{-(C_h + CF_h)/\theta_0}}$$

Tale modello riproduce in maniera approssimata gli effetti delle covarianze tra i residui aleatori delle utilità percepite delle alternative di scelta, in quanto da un punto di vista concettuale tali residui restano indipendenti in senso statistico, dal momento che la forma funzionale utilizzata è di tipo Logit Multinomiale. L'idea di base è quella che l'effetto delle covarianze sia quello di ridurre la probabilità di scelta dell'alternativa più correlata che è il percorso con maggior grado di sovrapposizione; pertanto, il C-Logit non introduce esplicitamente delle covarianze tra le utilità dei percorsi, ma assegna ugualmente probabilità di scelta minore al percorso più correlato penalizzandone l'utilità sistematica attraverso il fattore di sovrapposizione. Sulla bontà di questa approssimazione si tornerà in dettaglio nel seguito testandola attraverso opportune prove numeriche. In letteratura è possibile reperire differenti formulazioni del fattore di sovrapposizione CF_k . L'espressione originariamente proposta da Cascetta è data da:

$$CF_k^1 = \beta_0 \ln \left(1 + \sum_{h \neq k} \frac{X_{hk}}{\sqrt{X_h X_k}} \right)$$

nella quale la sommatoria presenta al numeratore un attributo di costo X_{hk} comune fra i due percorsi h e k , pesato rispetto alla radice quadrata del prodotto dei medesimi attributi di costo X_h ed X_k dei due percorsi. In altri termini, se h e k sono perfettamente coincidenti la sommatoria vale 1 mentre se non hanno alcun arco in comune la sommatoria vale 0.

La necessità di valutare in simulazione le probabilità di scelta fornite dal modello C-Logit risulta evidente se si inquadra dal punto di vista teorico il modo in cui il modello cerca di riprodurre gli effetti della correlazione tra le alternative di scelta; in particolare, è importante sottolineare che tali effetti non sono stati ancora formalmente chiariti in letteratura, se non in casi particolarmente semplici. E' infatti noto che, date due alternative A e B di pari utilità sistematica, la prima indipendente e la seconda correlata con una o più alternative ci si aspetta che A sia scelta

mediamente con maggiore frequenza. Inoltre, se ρ_{AB} è il livello di correlazione tra A e B e ρ_{CD} quello tra C e D, A e B saranno scelte con minore frequenza rispetto a C e D se risulta $\rho_{AB} > \rho_{CD}$ e viceversa. Infine, se A è correlata con una sola alternativa B mentre C è correlata con due alternative D ed E ed il livello di correlazione tra le alternative è il medesimo, ovvero $\rho_{AB} = \rho_{CD} = \rho_{CE} = \rho_{DE}$, le alternative C, D ed E saranno scelte con minore frequenza rispetto ad A e B. Tutti i modelli probabilistici in grado di introdurre esplicitamente delle covarianze tra le alternative, ad esempio Logit Gerarchizzato e Probit, riproducono coerentemente i risultati precedentemente descritti.

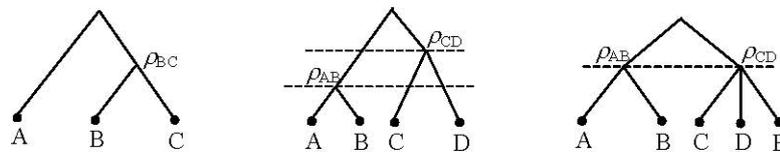


Figura A. 8: Esempi di strutture di correlazione