



PON GOVERNANCE 2014-2020

Rischio Sismico e Vulcanico

Attività PUG_F4.4 | Predisposizione della metodologia per l'individuazione delle priorità di intervento (MS3 e edifici strategici) e definizione delle procedure di intervento

Metodologia per la definizione delle priorità di intervento

Regione Puglia

Versione 1.1

Pubblicato in data 18/02/2019



Consiglio Nazionale delle Ricerche





PON GOVERNANCE 2014-2020

Rischio Sismico e Vulcanico

Attività PUG_F4.4 | Predisposizione della metodologia per l'individuazione delle priorità di intervento (MS3 e edifici strategici) e definizione delle procedure di intervento

Metodologia per la definizione delle priorità di intervento Regione Puglia

Versione 1.1

Pubblicato in data 18/02/2019



Consiglio Nazionale delle Ricerche



PON GOVERNANCE E CAPACITA' ISTITUZIONALE 2014-2020

PROGRAMMA PER IL SUPPORTO AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO E VULCANICO AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE

Struttura responsabile dell'attuazione del Programma

Angelo Borrelli (responsabile), Anna Natili (supporto)

Coordinamento

Fabrizio Bramerini, Angelo Corazza, Biagio Costa, Italo Giulivo, Gaetano Mignone, Paolo Molinari, Francesca Romana Paneforte

Unità operativa rischi

Paola Bertuccioli, Sergio Castenetto, Stefano Ciolfi, Andrea Duro, Emilio De Francesco, Antonio Gioia, Pietro Giordano, Giuseppe Naso, Stefania Renzulli, Daniele Spina

Unità di raccordo DPC

Sara Babusci, Lavinia Di Meo, Valter Germani, Biagio Prezioso, Chiara Salustri Galli

Amministrazione

Gabriella Carunchio, Pietro Colicchio, Francesca De Sandro, Stefania Nardella

Referenti Regioni

Campania: Mauro Biafore (coordinatore), Claudia Campobasso, Luigi Cristiano, Nicola Di Benedetto, Luigi Gentilella, Maurizio Giannattasio, Francesca Maggiò; Puglia: Tiziana Bisantino, Luca Limongelli (coordinatore), Mario Greco, Pierluigi Loiacono, Giuseppe Pastore, Francesco Ronco, Isabella Trulli; Calabria: Domenico Pallaria, Francesco Russo (coordinatore), Giuseppe Iritano, Carlo Tansi; Sicilia: Nicola Alleruzzo, Aldo Guadagnino, Antonio Torrisi.

CNR

Massimiliano Moscatelli (referente)

Struttura tecnica

Gianluca Carbone, Federico Mori, Edoardo Peronace, Andrea Rampa, Francesco Stigliano (coordinatore operativo), Eleonora Cianci, Giuseppe Cosentino, Rosa Marina Donolo, Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Francesco Fazio, Biagio Giacco, Angelo Gigliotti, Amerigo Mendicelli, Marco Nocentini, Giuseppe Occhipinti, Federica Polpetta, Attilio Porchia, Gino Romagnoli, Valentina Tomassoni, Vitantonio Vacca

Struttura gestionale

Lucia Paciucci (coordinatore gestionale), Francesco Petracchini, Laura Ragazzi

Referee

Paolo Boncio, Paolo Clemente, Maria Ioannilli, Massimo Mazzanti, Roberto Santacroce, Carlo Viggiani

Commissione tecnica interistituzionale

Mauro Dolce (presidente)

Laura Albani, Salvo Anzà, Walter Baricchi, Lorenzo Benedetto, Michele Brigante, Gennaro Capasso, Vincenzo Chieppa, Luigi D'Angelo, Lucia Di Lauro, Calogero Foti, Luca Lo Bianco, Giuseppe Marchese, Paolo Marsan, Mario Nicoletti, Mario Occhiuto, Ezio Piantedosi, Roberta Santaniello, Luciano Sulli, Carlo Tansi, Federica Tarducci, Carmela Zarra

Segreteria: Elda Catà, Carletto Ciardiello, Giuseppe Tiberti

PUG_F4.4 – Metodologia per la definizione delle priorità di intervento Regione Puglia

Responsabile DPC: Daniele Spina

Responsabile CNR-IGAG: Federico Mori

A cura di

Andrea Gena (CNR-IGAG), Amerigo Mendicelli (CNR-IGAG), Federico Mori (CNR-IGAG).

Con il supporto tecnico-amministrativo di: Francesca Argiolas, Patrizia Capparella, Martina De Angelis, Marco Gozzi, Alessandro Leli, Patrizia Mirelli, Simona Rosselli

Sommario

Introduzione	5
1. Frane sismoindotte	6
1.1 Metodologia	6
1.2 <i>Dati di base</i>	11
1.3 <i>Risultati delle elaborazioni</i>	11
1.4 <i>Validazione</i>	13
2. Liquefazione	16
2.1 <i>Metodologia</i>	16
2.2 <i>Dati di base</i>	20
2.3 <i>Risultati delle elaborazioni</i>	20
2.4 <i>Validazione</i>	23
3. Danneggiamento edilizia residenziale	25
3.1 <i>Metodologia</i>	25
3.2 <i>Dati di base</i>	32
3.3 <i>Risultati delle elaborazioni</i>	33
3.4 <i>Validazione</i>	40
3.4.1 Terremoto di Santo Stefano del 26/12/2018	41
3.4.2 Terremoto Lunigiana del 21/06/2013	41
3.4.3 Terremoto San Giuliano di Puglia del 31/10/2002	41
3.4.4 Terremoto Mormanno del 25/10/2012	41
3.4.5 Terremoto Abruzzo del 07/05/1984	42
3.4.6 Terremoto Umbria Marche del 26/09/1997	42
3.4.7 Terremoto L'Aquila 06/04/2009	42
3.4.8 Terremoto Emilia 20/05/2012	42
Bibliografia	43

Introduzione

Il presente documento descrive le metodologie semplificate sviluppate al fine di fornire ad una specifica Regione una graduatoria di priorità di intervento multi-criteria dei Contesti Territoriali.

Allo stato attuale le metodologie semplificate, quindi i criteri di ordinamento della graduatoria di priorità di intervento, sono legati ai seguenti aspetti:

- > Valutazione della probabilità di frane sismo-indotte con il modello Nowicki et al. (2018) e relative modifiche proposte dall'USGS;
- > Valutazione della probabilità di liquefazione con il modello Zhu et al. (2017) e relative modifiche proposte dall'USGS;
- > Valutazione della condizione di danneggiamento dell'edilizia residenziale con il modello Lagomarsino e Giovinazzi (2006) come proxy della condizione limite degli insediamenti urbani.

Per ciascuna, in primo luogo, viene descritta la metodologia, poi i dati di base necessari e prodotta la mappa della specifica variabile a livello regionale. Infine viene prodotta una validazione di tali metodologie attraverso il confronto di scenari sismici e cosismici predittivi con dati sperimentali di fenomeni osservati a seguito di alcuni eventi sismici italiani particolarmente significativi.

Un requisito comune per i dati di input delle metodologie semplificate proposte è la facile reperibilità su scala territoriale e la flessibilità di applicazione in qualsiasi ambito territoriale.

Infine è stato sviluppato un primo software in GIS in grado di produrre i risultati sia partendo dalla mappa di pericolosità INGV che da eventi di scenario.

Nel prosieguo delle attività tali metodologie verranno ulteriormente estese e potenziate al fine di produrre una classificazione preliminare di operatività strutturale dei Contesti Territoriali

1. Frane sismoindotte

Descrizione degli aspetti metodologici, dei risultati e delle validazioni

1.1 Metodologia

Il fenomeno delle frane sismo-indotte rappresenta un elevato fattore di rischio nelle zone sismicamente attive. Queste, infatti, sono spesso associate a perdite di vite umane, e rappresentano una delle maggiori cause di danni infrastrutturali. Il loro impatto, inoltre, è notevole anche in termini di peggioramento della raggiungibilità e quindi della intera risposta di un sistema di gestione in caso di emergenza.

La possibilità di stimare l'entità del complesso dei movimenti franosi che possono innescarsi a seguito di un evento, pertanto, può avere notevole interesse sia nella fase di gestione dell'emergenza che in ambito di programmazione e allocazione delle risorse.

Il primo modello disponibile in letteratura e applicabile su ampia scala territoriale è quello di Nowicki et al., sviluppato nel 2014 e affinato in un successivo lavoro pubblicato nel 2018. Questo metodo, di tipo statistico, è stato sviluppato a partire da un database di frane ampio mediante l'utilizzo della regressione logistica. Lo scopo è quello di stimare la probabilità di frana in un determinato sito a partire da un valore di un parametro di scuotimento sismico e da dati di suscettibilità globalmente reperibili che descrivono le condizioni locali del sito.

Il metodo, capace di previsioni su scala territoriale in un breve lasso di tempo, è stato migliorato nel corso del tempo tramite l'espansione del data-set di input: una delle condizioni fondamentali per ottenere un buon modello empirico è, infatti, quella di allenarlo tramite dei dati di qualità che rappresentino il più fedelmente possibile la variabilità delle condizioni nelle quali il modello dovrà operare.

La procedura viene costruita tramite i seguenti passi:

1 - Creazione del database e individuazione delle variabili indipendenti

I fattori che controllano il fenomeno delle frane sismo-indotte sono riportati in numerosi studi empirici e riguardano, in via generale: litologia del bedrock, pendenza topografica, intensità dell'input sismico, amplificazione topografica, sistema di fratturazione del bedrock, condizioni idrogeologiche e distribuzione delle frane preesistenti.

I parametri scelti per rappresentare gli aspetti che governano il fenomeno, visto lo scopo del modello, devono essere facilmente reperibili a livello globale. Pertanto vengono scelti i seguenti fattori:

- > Scuotimento sismico;
- > Pendenza topografica;
- > Altitudine;
- > Litologia;
- > Contenuto idrico del suolo;
- > Precipitazioni;
- > Copertura del suolo;
- > Magnitudo.

Per ciascuno di questi vengono prese in considerazione e testate diverse possibili variabili indipendenti che li rappresentano, così come le loro combinazioni e interazioni, valutando tutte le diverse possibili forme del modello prima di scegliere quello con la migliore performance.

Le variabili candidate a far parte del modello sono riassunte nella seguente immagine:

<i>Independent Variables Evaluated for Use in the Logistic Regression Model</i>			
Factor	Variable representation	Data source	Resolution
Shaking	Peak Ground Acceleration (PGA) Peak Ground Velocity (PGV)	USGS ShakeMap System (Worden & Wald, 2016)	1 km ²
Slope	Modified Mercalli Intensity (MMI) Slope calculated from GMTED median elevation data	USGS ShakeMap System (Worden & Wald, 2016) Danielson and Gesch (2011)	1 km ² 7.5c (~250 m ²)
Lithology	Maximum Slope GLiM Global Lithology Data	Verdin et al. (2007) Hartmann and Moosdorf (2012)	30c (~1 km ²) Vector Data
Elevation	Friction Angle Inferred Strength Mean Elevation	Godt et al. (2008) Hartmann and Moosdorf (2012) and Nadim et al. (2006)	30c (~1 km ²) Vector Data
Soil Wetness	Median Elevation Compound Topographic Index	Danielson and Gesch (2011)	7.5c (~250 m ²)
Temporal Wetness	WorldClim mean monthly precipitation CGIAR-CSI Global Aridity	Moore et al. (1991) Hijmans et al. (2005)	7.5c (~250 m ²) 30c (~1 km ²)
Vegetation Cover (Land Cover)	CGIAR-CSI Global-Monthly Potential Evapotranspiration (PET) Globcover 2009 Land Cover	Trabucco and Zomer (2009)	30c (~1 km ²)
Earthquake Magnitude/Duration	MODIS Land Cover Global Land Cover Share 2014 Percent Green Vegetation Cover Moment Magnitude	Arino et al. (2012) Broxton, Zeng, Sulla-Menashe, and Troch (2014) Latham et al. (2014) Broxton, Zeng, Scheftic, and Troch (2014) USGS	300 m 15c (~500 m ²) 30c (~1 km ²) 30c (~1 km ²) —

Figura 1 Variabili candidate ad entrare a far parte del modello predittivo (Nowicki et al. 2018)

Per ciascuno di questi parametri viene preliminarmente testata la correlazione con i dati sperimentali per mezzo di istogrammi in cui questi vengono rapportati alle osservazioni empiriche stabilendone il grado di correlazione.

Tali osservazioni qualitative vengono supportate quantitativamente costruendo i coefficienti di Pearson e Cramer, entrambe misure di correlazione tra due variabili. Nella valutazione dei modelli vengono considerate anche i possibili termini di interazione tra le diverse variabili.

A valle di questa analisi vengono individuati i seguenti proxies dei suddetti fattori:

- > PGV (Peak Ground Velocity);
- > Pendenza topografica (slope);
- > Litologia (lithology);
- > Uso del suolo (landcover);
- > CTI (Compound topographic index);
- > Termine di interazione tra PGV e pendenza (il quale può essere interpretato come un termine rappresentativo dell'amplificazione topografica).

Poiché lo scopo è quello di fornire un modello predittivo di applicabilità globale, e che l'affidabilità del modello empirico è strettamente legata alla qualità del data-set in input, viene considerato un insieme di 36 osservazioni di frane sismo-indotte. Queste si differenziano per il metodo di mappatura dei movimenti franosi rilevati: areale o puntuale.

Per ridurre al massimo i dati di scarsa qualità, a ciascuna delle osservazioni viene assegnato un punteggio sulla base di alcune caratteristiche proprie della campagna di indagine. Dai dati di input del modello sono escluse quelle osservazioni che non superano una soglia minima. A seguito di questa operazione il database iniziale si riduce a 23 eventi.

In questo modo, vista la natura predittiva del modello da costruire, viene creato un set di dati con notevole varietà in termini di magnitudo, di caratteristiche del sisma e dell'assetto geologico del sito suscettibile di frana.

2 - Campionamento

Per includere nel modello sia i dati areali che puntuali, vista la scarsità di osservazioni complete, viene approntato uno schema di selezione con un algoritmo di buffer circolare che definisce le zone di campionamento a partire dai dati reali, così da creare un set equamente distribuito tra fenomeni osservati e non. Tramite un'analisi di sensibilità è stato confermato che le ipotesi sui raggi del buffer non influenzano il comportamento del modello. In ciascuno dei terremoti si hanno, pertanto, il 50% di osservazioni di frane ed il 50% di non-frane. In questo modo è possibile allenare correttamente il modello conferendogli l'abilità di predire entrambe le possibili situazioni.

Summary of Landslide Inventories Currently Available							
Event (location)	Date	Year	M _w	Landslide data type	Number of landslide observations	Data quality score	Reference
San Fernando, California	9 February	1971	6.6	Points	391	0.8	Morton (1971)
Guatemala	4 February	1976	7.5	Polygons	6224	3.5	Harp et al. (1981)
Friuli, Italy	5 May	1976	6.5	Points	1007	2.3	Govi (1977)
Coalinga, California	2 May	1983	6.7	Polygons	3980	3.5	Harp and Keefer (1990)
San Salvador, El Salvador	10 October	1986	5.7	Points	268	1.3	Rymer (1987)
Loma Prieta, California	17 October	1989	6.9	Points	528	1.5	Keefer and Manson (1998)
Northridge, California	17 January	1994	6.7	Polygons	11111	3.1	Harp and Jibson (1996)
Kobe, Japan	16 January	1995	6.9	Polygons	2353	3.6	Uchida et al. (2004)
Chi-Chi, Taiwan	20 September	1999	7.7	Polygons	9272	2.4	Liao and Lee (2000)
El Salvador	13 January	2001	7.7	Points	139	1.5	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017)
El Salvador	13 February	2001	6.6	Points	62	1.5	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador (2017)
Avaj, Iran	22 June	2002	6.5	Points	50	1.2	Mahdavifar et al. (2006)
Denali, Alaska	3 November	2002	7.9	Polygons	1579	2.6	Gorum et al. (2014)
Lefkada, Greece	14 August	2003	6.3	Polygons	274	2.3	Papathanassiou et al. (2013)
Niigata-Chuetsu, Japan	23 October	2004	6.6	Polygons	4615	3.5	Sekiguchi and Sato (2006)
Kashmir, Pakistan	8 October	2005	7.6	Points	2424	3.5	Sato et al. (2007)
Kiholo Bay, Hawaii	15 October	2006	6.7	Polygons	383	3	Harp et al. (2014)
Niigata-Chuetsu-oki, Japan	16 July	2007	6.6	Points	312	2.4	Kokusai Kogyo (2007)
Aysen Fjord, Chile	21 April	2007	6.2	Polygons	517	3.3	Gorum et al. (2014)
Wenchuan, China	12 May	2008	7.9	Polygons	197481	3.4	Xu, Xu, Yao, et al. (2014)
Iwate-Miyagi-Nairiku, Japan	14 June	2008	6.9	Polygons	4211	3.6	Yagi et al. (2009)
Abruzzo, Italy	6 April	2009	6.3	Polygons	89	3	Piacentini et al. (2013)
Sumatra, Indonesia	30 September	2009	7.6	Points	87	1	Umar et al. (2014)
Haiti	12 January	2010	7	Polygons	23567	3.8	Harp et al. (2016)
Sierra Cucapah, Mexico	4 April	2010	7.2	Polygons	453	3.6	Barlow et al. (2015)
Yushu, China	14 April	2010	6.9	Polygons	2036	3.8	Xu et al. (2013)
Locra, Spain	11 May	2011	5.1	Points	166	0.6	Alfaro et al. (2012)
Tohoku, Japan	11 March	2011	9.1	Polygons	3477	3.4	Wartman et al. (2013)
Lushan, China	20 April	2013	6.6	Polygons	15546	3.8	Xu et al. (2015)
Cook Straight, N.Z.	21 July	2013	6.5	Points	35	0.5	Van Dissen et al. (2013)
Minxian-Zhangxian, China	21 July	2013	5.9	Polygons	2330	3.8	Xu, Xu, Shyu, et al. (2014)
Lake Grassmere, N.Z.	16 August	2013	6.5	Points	501	0.6	Van Dissen et al. (2013)
Eketahuna, N.Z.	20 January	2014	6.1	Points	176	0.5	Rosser et al. (2014)
Ludian, China	3 August	2014	6.2	Polygons	1024	3.4	Ying-Ying et al. (2015)
Wilberforce, N.Z.	6 January	2015	5.6	Points	265	0.5	GNS Science (2015)
Kumamoto, Japan	15 April	2016	7	Polygons	336	3.5	DSPR-KU (2016)

Figura 2 Lista degli eventi sismici considerati e di quelli effettivamente selezionati (in grassetto) per la costruzione del modello (Nowicki et al. 2018)



Figura 3 Distribuzione geografica degli eventi sismici considerati nella costruzione del modello (Nowicki et al. 2018)

Occorre precisare che il modello non introduce differenze sul meccanismo di frana che si manifesta trattando egualmente fenomeni di scivolamento e crolli in roccia.

3 – Regressione logistica

Per modellare la probabilità di frana viene impiegata la regressione logistica, un approccio che può essere efficacemente usato per relazionare un insieme di variabili indipendenti ad una variabile dipendente binaria:

$$P(X) = 1/(1 + e^{-t})$$

In cui $t = k_0 + k_1 \cdot \ln(PGV) + k_2 \cdot slope + k_3 \cdot lithology + k_4 \cdot landcover + k_5 \cdot CTI + k_6 \cdot \ln(PGV) \cdot slope$ e i valori k sono i coefficienti stimati tramite la regressione.

4 – Valutazione e validazione del modello

Le predizioni dei 133 possibili modelli sono state valutate dal punto di vista statistico con le seguenti misure:

- > A.I.C. – Akaike Information Criteria;
- > Area sottostante il R.O.C. – Receiver Operating Curve;
- > Log likelihood;
- > Tre misure pseudo-R².

Queste indicano la capacità del metodo di riprodurre i dati sperimentali e possono essere usate per un confronto tra i vari modelli con tutte le possibili combinazioni di variabili.

Ad ulteriore conferma della bontà del modello individuato (best fitting model) sono stati eseguiti il test V.I.F. (Variance Inflation Factor), per valutare che le variabili indipendenti del modello non abbiano una mutua dipendenza, e altri test quali il Blind Test, applicando il modello ad eventi non inclusi nel training set, ed il Leave One Event Out Cross Validation Test, dal quale emerge che in alcuni eventi questo è più performante che in altri.

Oltre a valutare la bontà del modello tramite metriche di performance, ne è stata verificata la capacità di riprodurre il pattern geografico dei fenomeni franosi (trasformando le probabilità ottenute in dati binari si/no applicando una soglia del 50% in accordo con il bilanciamento del modello adottato nella selezione degli input) rispetto a dati realmente osservati, trovando un buon accordo.

Nel best fitting model è stato scelto l'utilizzo della PGV, come parametro di scuotimento sismico, in quanto questa permette di evitare fenomeni di saturazione per alte magnitudo che, invece, si avrebbero utilizzando la PGA.

6 – Conversione della probabilità in percentuale di area in frana

Al fine di calibrare i risultati del modello con le osservazioni sperimentali relative alle aree di validazione (situazioni mappate in termini di area e nelle quali il rapporto tra condizioni stabili e instabili non è necessariamente pari ad 1:1) è stata sviluppata un'equazione correttiva che trasforma la probabilità P di frana sismo-indotta (priva di significato fisico in quanto dipendente dalle modalità di sviluppo del modello) in termini di porzione di ciascuna cella che è attesa avere un comportamento franoso (areal coverage L_p):

$$L_p(P) = \exp[a + bP + cP^2 + dP^3]$$

In cui:

I coefficienti valgono: $a = -7592$, $b = 5.237$, $c = -3.042$ e $d = 4.035$ e vengono stabiliti dal fitting del grafico seguente, che esprime la relazione tra le probabilità predette dal modello (campionate su una serie di punti equispaziati che, pertanto, non risentono del bilanciamento del dato di input) e la percentuale di fenomeni franosi da osservazioni reali.

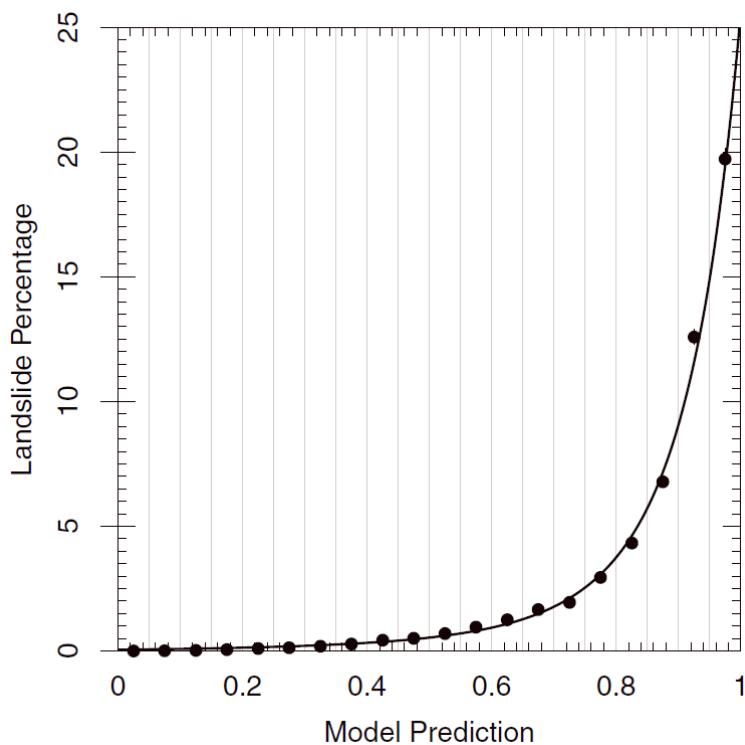


Figura 4 Relazione tra le predizioni del modello in termini di probabilità e percentuale di frana osservata (Nowicki et al. 2018)

7 – USGS: modifiche del modello

L'USGS adotta il modello di Nowicki lievemente modificato, ovvero escludendo le aree con pendenza inferiore a 5°, introducendo una soglia di probabilità pari a 0.002 e modificando alcuni coefficienti sulla litologia.

1.2 Dati di base

Per l'applicazione del modello sono necessari i dati riportati nella seguente tabella:

Parametro	Fonte
ln(PGV)	INGV fissato un tempo di ritorno $T_R = 475$ anni. Validazione del modello attraverso mappa di PGV derivata da scenario sismico (Akkar et. al ,2013)
slope	ALOS DEM – Global Digital Terrain Model
lithology	ISPRA – Servizio geologico d'Italia
landcover	ISPRA – Corine Land Cover 2006
CTI	GIS – GRASS V.7.4 (algoritmo r.topidx)

Tabella 1 Lista dei parametri di input del modello e delle fonti presso cui questi sono reperibili

Al fine di eseguire il calcolo della metodologia su tutto il territorio regionale, senza essere quindi vincolati ad uno specifico evento, la mappa di PGV è stata calcolata sulla maglia INGV, per un tempo di ritorno di 475 anni, applicando la relazione proposta da Paolucci et. al (2017):

$$PGV = 0.75 \cdot \left(\frac{S_{0.2}}{g} \cdot \frac{S_1}{g} \right)^{0.55}$$

1.3 Risultati delle elaborazioni

Vengono presentati i risultati relativi alle elaborazioni sulle frane sismo-indotte secondo il metodo di Nowicki et al. (2018) in termini di probabilità, di areal coverage e di area in frana relativa al contesto territoriale.

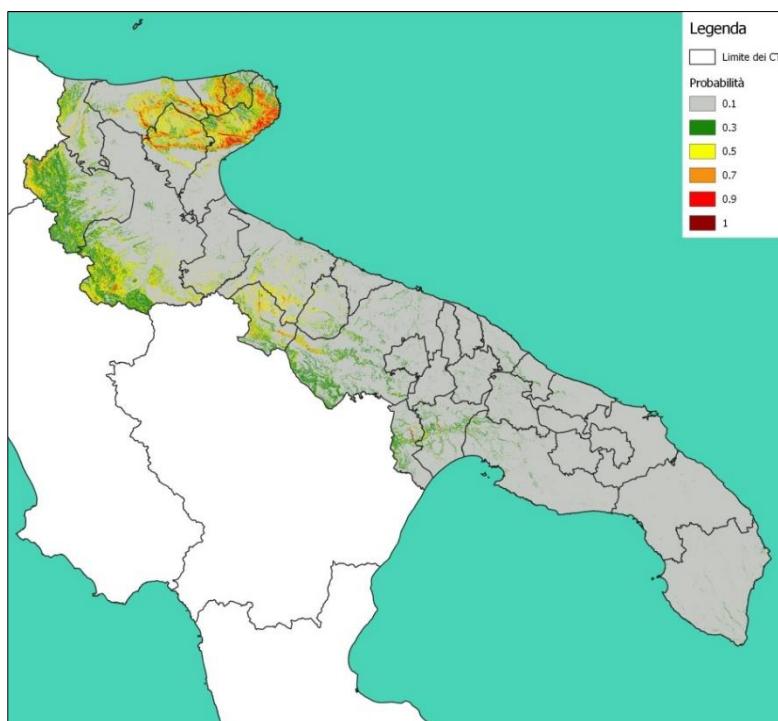


Figura 5 Mappa regionale delle probabilità di frana sismo-indotta

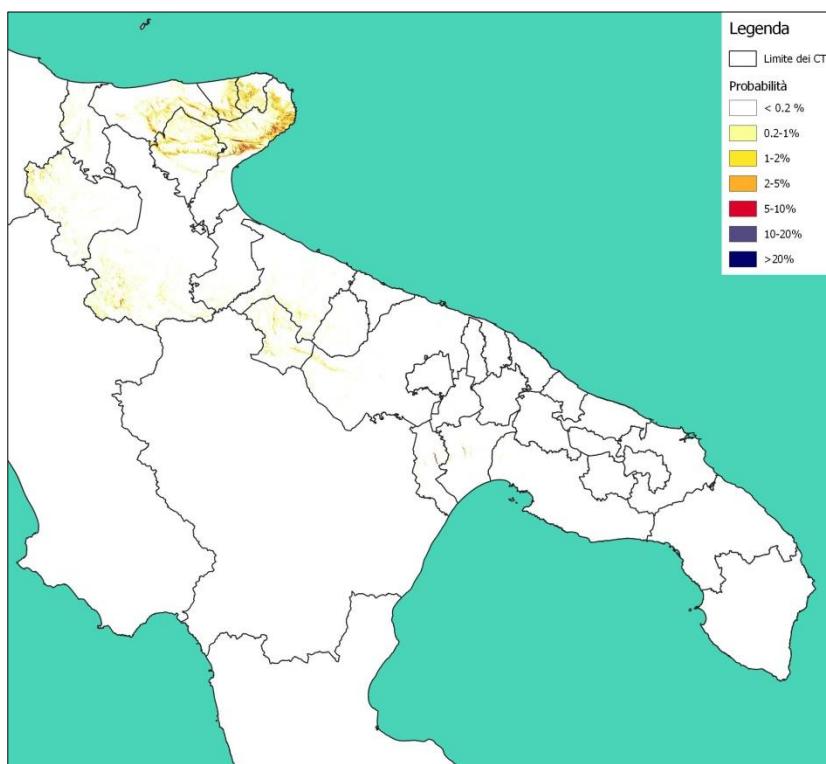


Figura 6 Mappa regionale delle probabilità di percentuale di frana sismo-indotta

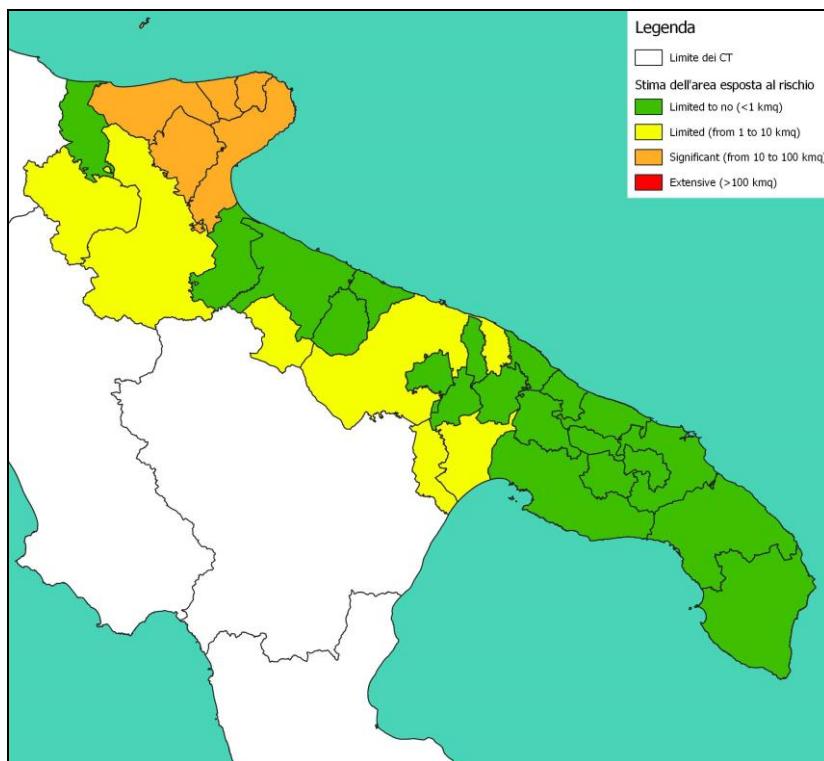


Figura 7 Mappa regionale di area esposta a probabilità di frana sismo-indotta

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, la priorità in base alla superficie esposta al fenomeno.

N°	Contesto Territoriale	Area in frana [km ²]	Superficie totale [km ²]
1	MANFREDONIA	95.917	837.421
2	SAN GIOVANNI ROTONDO	32.295	582.398
3	APRICENA	30.497	722.152
4	RODI GARGANICO	19.024	181.103
5	VICO DEL GARGANO	18.797	159.507
6	FOGGIA	9.414	2268.598
7	LUCERA	7.507	1085.485
8	MINERVINO MURGE	5.203	438.72
9	GINOSA	1.839	346.945
10	BARI	1.797	2020.582
11	CASTELLANETA	1.062	565.371
12	BARLETTA	0.936	1025.737
13	TORREMAGGIORE	0.772	503.889
14	CERIGNOLA	0.451	632.098
15	TARANTO	0.078	1271.755
16	CORATO	0.055	390.475
17	OTRANTO	0.048	1469.348
18	MOLFETTA	0.037	239.988
19	GIOIA DEL COLLE	0.018	241.181
20	ACQUAVIVA DELLE FONTI	0.002	220.47
21	LECCE	0	1296.352
22	MARTINA FRANCA	0	384.141
23	MESAGNE	0	177.523
24	CEGLIE MESSAPICA	0	156.98
25	FASANO	0	184.104
26	FRANCAVILLA FONTANA	0	258.964
27	MONOPOLI	0	218.96
28	OSTUNI	0	328.815
29	PUTIGNANO	0	317.086
30	BRINDISI	0	700.541
31	RUTIGLIANO	0	164.644

Tabella 2 Classifica regionale della priorità di intervento in base alla percentuale di area esposta alla probabilità di frana

1.4 Validazione

La metodologia è stata applicata a 4 eventi sismici in modo da poter costruire un utile confronto tra i risultati delle elaborazioni e l'occorrenza reale del fenomeno cosismico, estrapolata dai cataloghi o da alcuni lavori presenti in letteratura.

La PGV è stata calcolata da scenario sismico attraverso la legge di attenuazione di Akkar et al. (2013).

Di seguito sono riassunte i casi ai quali è stata applicata la metodologia e i risultatati ottenuti per l'evento del Friuli del 06-05-1976:

Evento	X WGS UTM Zone 33N	Y WGS UTM Zone 33N	M_w	Stile di faglia	Profondità [km]
1. Friuli 06-05-1976	368906.779	5124245.367	6.4	Thrust Fault	5.7
2. L'aquila 06-04-2009	366474.729	4688688.606	6.3	Normal	8.3
3. Central Italy 30-10-2016	345446.149	4743561.256	6.5	Normal	9.2
4. Calabria 05-02-1783	584967	423970	7.1	Normal	10

Tabella 3 Eventi sismici per i quali la metodologia è stata applicata



Figura 8 ShakeMap, in termini di PGV, dell'evento del Friuli 06-05-1976 calcolata attraverso la legge di attenuazione di Akkar et al (2013).

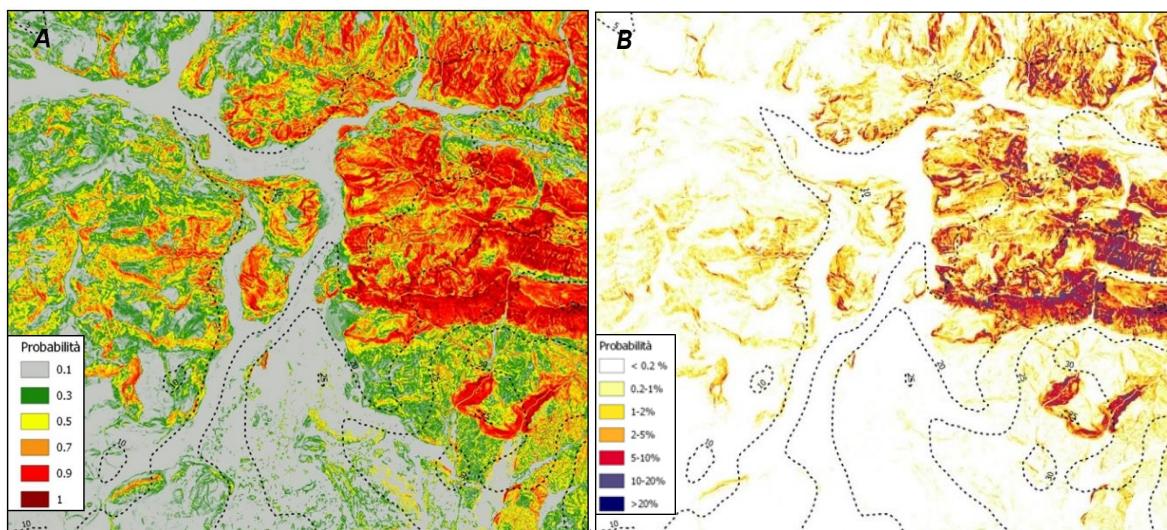


Figura 9 Mappa delle probabilità di frana sismo-indotta (A) e di areal coverage (B) ricavate dall'applicazione del modello

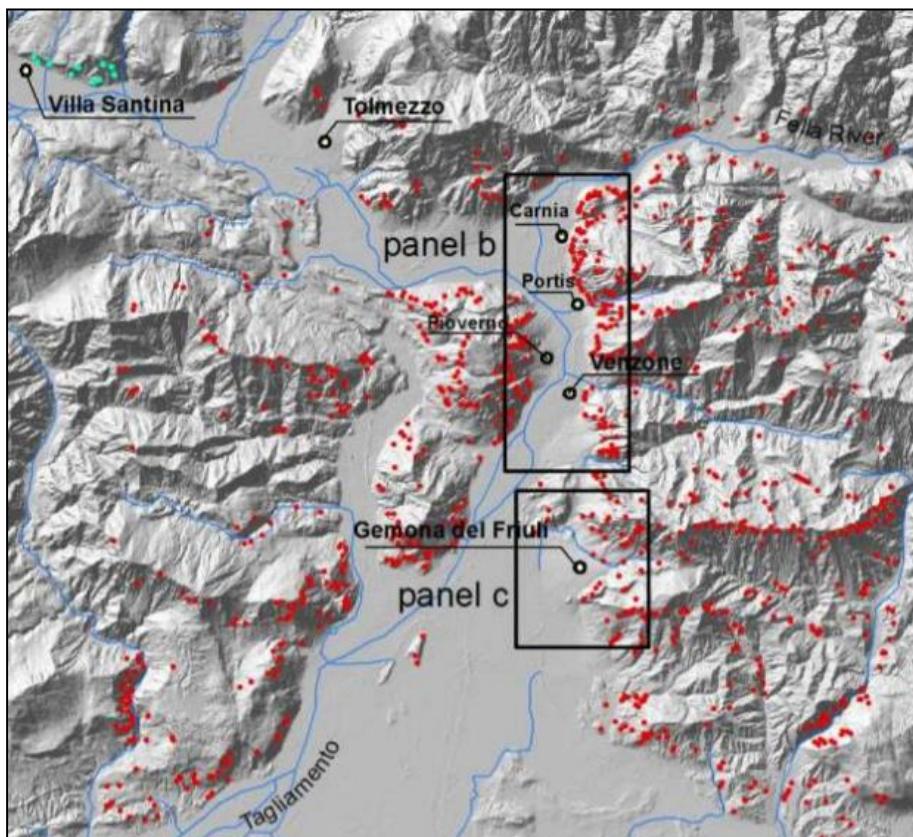


Figura 10 Distribuzione dei fenomeni di instabilità sismo-indotta (punti rossi) relativi all'evento del Friuli 06-05-1976, Valagussa et. al (2014)

Dal confronto della mappa di distribuzione fenomeni di instabilità sismo-indotta Valagussa et. al (2014), con le mappe di probabilità prodotte dal modello, si può notare come i punti rossi, che rappresentano i movimenti franosi rilevati in seguito del sisma, si concentrano proprio nelle aree dove il modello associa una maggiore probabilità di occorrenza del fenomeno.

2. Liquefazione

Descrizione degli aspetti metodologici, dei risultati e delle validazioni

2.1 Metodologia

Il fenomeno della liquefazione in conseguenza ad un sisma può indurre danni strutturali ed infrastrutturali significativi a causa dei sedimenti verticali e degli spostamenti laterali permanenti indotti nel suolo. La produzione di mappe di probabilità di liquefazione a scala territoriale, pertanto, rappresenta un importante strumento di programmazione e di allocazione di risorse. La maggior parte dei metodi per mappare il rischio di liquefazione sono basati su carte geologiche dettagliate e su dati geotecnici. In un sistema territorialmente esteso risulta di fondamentale importanza l'utilizzo di un metodo fondato esclusivamente su parametri geospaziali, facilmente reperibili su scala mondiale, nell'ottica di previsione dell'entità del rischio di liquefazione a scala regionale. Le caratteristiche del metodo rispondono alle esigenze di facile reperibilità dei dati di input, necessarie per l'analisi di contesti spazialmente estesi.

La metodologia di riferimento è quella di Zhu et al. (2017) la quale viene costruita in maniera empirica secondo i seguenti passi:

1 - Creazione del database

Poiché lo scopo è quello di fornire un modello predittivo di applicabilità globale, e la affidabilità del modello empirico è strettamente legata alla qualità del data-set, vengono impiegati i record di 27 eventi sismici, relativi a diverse parti del globo, riassunti nella figura successiva.

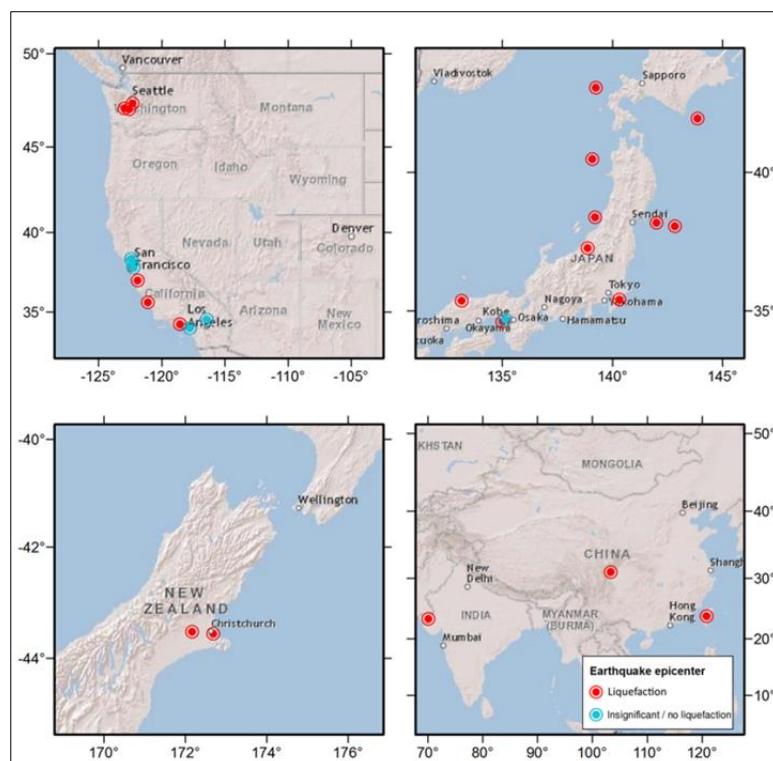


Figura 11 Mappa degli eventi sismici impiegati per il database (Zhu et al. 2017)

Vista la natura predittiva del modello da costruire viene creato un database con notevole varietà in termini di magnitudo degli eventi e assetto geologico dei siti suscettibili di liquefazione. Si considerano, per lo stesso motivo, sia gli eventi che hanno attivato fenomeni di liquefazione che eventi per i quali questi non si sono verificati.

La maggior parte degli eventi sismici considerati si trova in aree costiere le quali, tuttavia, sono le più suscettibili di liquefazioni e sono quelle caratterizzate dalla maggiore attività tettonica.

Il database globale è stato ottenuto dall'unione di più fonti, a seguito di un massiccio lavoro di revisione di letteratura. I diversi singoli data-set possono essere completi, con identificazione di poligoni di liquefazione e corredati da numerosi altri parametri, e incompleti, con informazioni limitate e puntuali.

2 - Individuazione dei parametri rilevanti

In parallelo alla creazione del database sono stati esplorati i parametri predittivi migliori per l'implementazione del modello. Gli aspetti che governano il fenomeno della liquefazione presi in considerazione sono: densità del suolo, grado di saturazione, input sismico. Restano esclusi altri parametri importanti, quali l'indice di plasticità, che non soddisfano il requisito di facile reperibilità su scala globale.

Vengono individuati delle variabili proxy candidate ad entrare a far parte del modello, riassunte nella tabella seguente.

Summary of All Candidate Explanatory Variables

Variable Description	Variable Name	Density	Saturation	Load
Shear-wave velocity over the first 30 m (slope derived)	V_{S30}	•		
Elevation	<i>elev</i>	•		
Topographic slope	<i>slope</i>	•		
Roughness	<i>rough</i>	•		
Topographic position index	TPI	•		
Terrain roughness index	TRI	•		
Distance to the nearest coast	<i>dc</i>	•	•	
Compound topographic index	CTI		•	
Global water table depth	<i>wtd</i>		•	
Distance to the nearest river	<i>dr</i>		•	
Distance to the nearest water body	<i>dw</i>		•	
Elevation above the nearest water body	<i>hwater</i>		•	
Mean annual precipitation	<i>precip</i>		•	
Aridity index	AI		•	
Peak ground acceleration	PGA			•
Peak ground velocity	PGV			•
Magnitude	M_w			•
Magnitude-scaling factor	MSF			•

Figura 12 Lista delle variabili candidate a far parte del modello (Zhu et al. 2017)

Per ciascuna di queste è possibile costruire delle mappe georeferenziate a partire da dati "poveri" facilmente ricavabili su scala mondiale.

Ai fini della selezione delle variabili di ingresso del modello è stato considerato anche l'effetto di interazione tra le coppie dei parametri stessi.

Alla fine della procedura è possibile identificare i seguenti parametri quali input ottimale per il modello:

- > ln(PGV) - Peak Ground Velocity;
- > ln(Vs,30) - Velocità equivalente di propagazione delle onde sismiche S nei primi 30 m di suolo;
- > precip – Precipitazioni;
- > dw - Distanza dalla costa o dai corsi d'acqua;
- > wtd - Profondità della falda.

3 - Campionamento

Per ciascuno degli eventi sismici i parametri sono stati campionati su una griglia regolare di passo 100 m. Le soglie di campionamento sono state ottimizzate sulla base dei risultati ottenuti ed è stata predisposta una apposita routine per l'estrazione di dati di 'non liquefazione' che, generalmente, risulta poco documentata, così da garantire un set di dati bilanciato.

Specifiche procedure sono state impiegate per ottenere la massima stabilità del modello e scongiurare fenomeni di overfitting.

4 – Regressione logistica

Per modellare la probabilità di frana viene impiegata la regressione logistica, un approccio che può essere efficacemente usato per relazionare un insieme di variabili indipendenti ad una variabile dipendente binaria:

$$P(X) = 1/(1 + e^{-t})$$

In cui $t = k_0 + k_1 \cdot \ln(PGV) + k_2 \cdot \ln(V_{s,30}) + k_3 \cdot precip + k_4 \cdot dw + k_5 \cdot wtd$ e i valori k sono i coefficienti stimati tramite la regressione.

5 – Valutazione e validazione del modello

Le predizioni statistiche sono state positivamente valutate tramite il punteggio Brier, i parametri true positive rate TPR e false positive rate FPR, utili per metodi binari, oltre alla curva ROC e al parametro AUC.

Oltre a valutare la bontà del modello tramite metriche di performance, ne è stata verificata la capacità di riprodurre il pattern geografico dei fenomeni di liquefazione rispetto a dati realmente osservati, trovando un sostanziale accordo.

Inoltre il modello è stato validato, escludendo il parametro rappresentativo dello scuotimento sismico, in termini di mappe di suscettibilità alla liquefazione, tramite il confronto con predizioni su studi geologici.

6 – Conversione della probabilità in percentuale di area in liquefazione

Anche nel modello di Zhu et al. (2017) occorre mettere in relazione le probabilità effettivamente stimate dal modello con la percentuale di aree in liquefazione effettivamente registrate in eventi mappati completamente e in relazione alla versione precedente del modello Zhu et al. (2015) (nella quale il database non era bilanciato e ben si accordava ai risultati sperimentali). La relazione tra la probabilità e l'area effettivamente in liquefazione è espressa dalla figura seguente.

La relazione tra P ed L è data dalla seguente formula:

$$L(P) = \frac{a}{(1 + be^{-cp})^2}$$

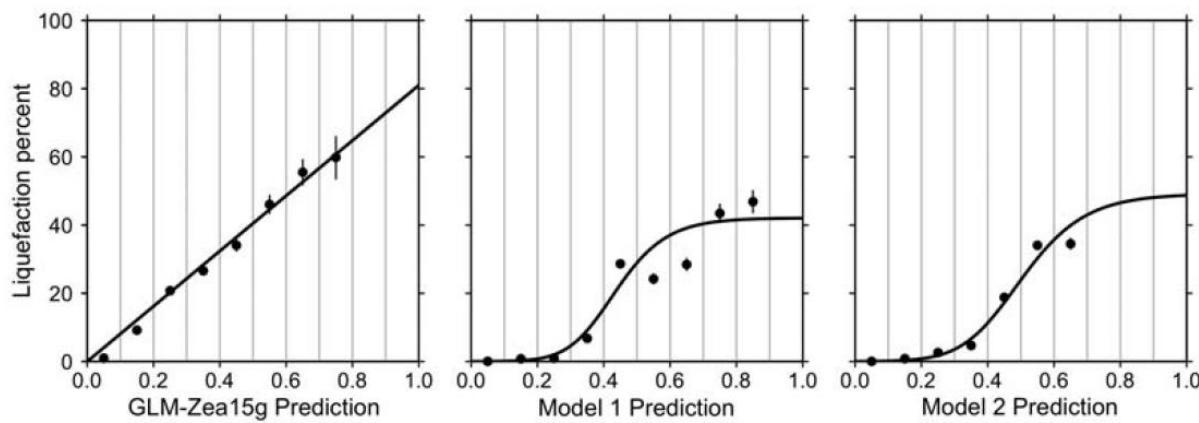


Figura 13 Relazione tra la probabilità di frana e la sua estensione percentuale

Parameters	Model 1	Model 2
<i>a</i>	42.08	49.15
<i>b</i>	62.59	42.40
<i>c</i>	11.43	9.165

Figura 14 Parametri della legge $L(P)$

Nel lavoro di Zhu et. al vengono proposti due modelli predittivi. Il primo modello (model costal) si può applicare, esclusivamente, ad aree di studio poco distanti dalle coste (fino ad un massimo di 20 km dalla linea di costa). Il secondo modello (model general) si applica anche nelle aree più interne rispetto alla linea di costa. Nel presente lavoro vengono riportati i risultati riferiti al solo model general.

7 – Correzione della PGV in base alla magnitudo

Vista la tendenza del modello alla sovrastima delle probabilità di liquefazione a seguito di eventi di magnitudo moderata, viene introdotto il fattore moltiplicativo della PGV SF, così definito in base alla magnitudo:

$$SF = \frac{1}{1 + e^{-(m-6)}}$$

2.2 Dati di base

Per l'applicazione del modello sono necessari i dati riportati nella seguente tabella:

Parametro	Fonte
ln(PGV)	INGV per un tempo di ritorno di 475 anni. Validazione del modello attraverso mappa di PGV derivata da scenario sismico (Akkar et. al ,2013)
ln(Vs,30)	Raster USGS slope-based
precip	WorldClim - CGIAR-CSI
dw	Metodi GIS – Reticolo idrografico, acque interne e linea di riva (ISPRA)
wtd	Global dataset - Fan et al. (2013)

Tabella 4 Lista dei parametri di input del modello e delle fonti presso cui questi sono reperibili

Al fine di eseguire il calcolo della metodologia su tutto il territorio regionale, senza essere quindi vincolati ad uno specifico evento, la mappa di PGV è stata calcolata sulla maglia INGV, per un tempo di ritorno di 475 anni, applicando la relazione proposta da Paolucci et. al (2017):

$$PGV = 0.75 \cdot \left(\frac{S_{0.2}}{g} \cdot \frac{S_1}{g} \right)^{0.55}$$

2.3 Risultati delle elaborazioni

Vengono presentati i risultati relativi alle elaborazioni sulle liquefazioni secondo il metodo di Zhu et al. (2017) sia in termini probabilistici sia di percentuale di area in liquefazione.

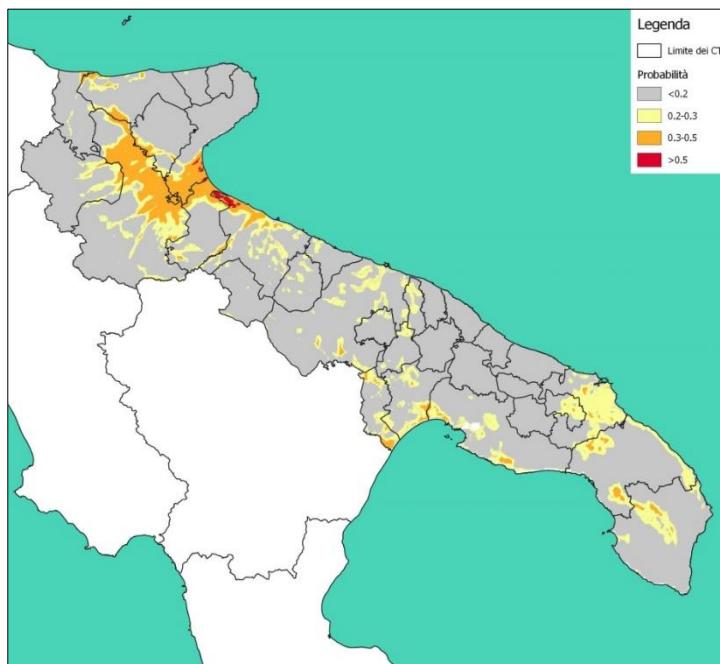


Figura 15 Mappa regionale delle probabilità di liquefazione

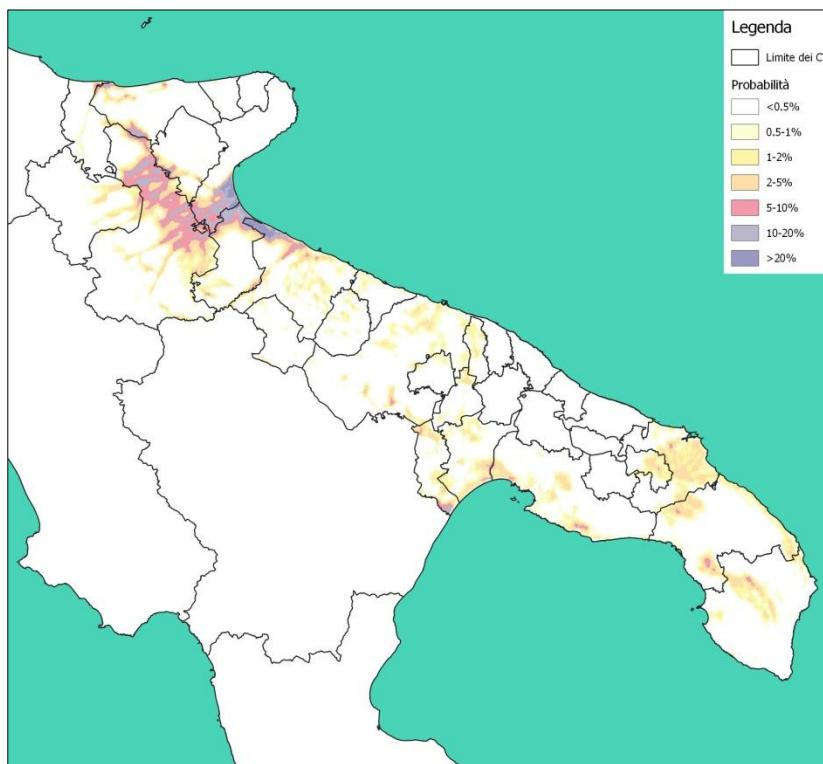


Figura 16 Mappa regionale delle probabilità di percentuale di liquefazione

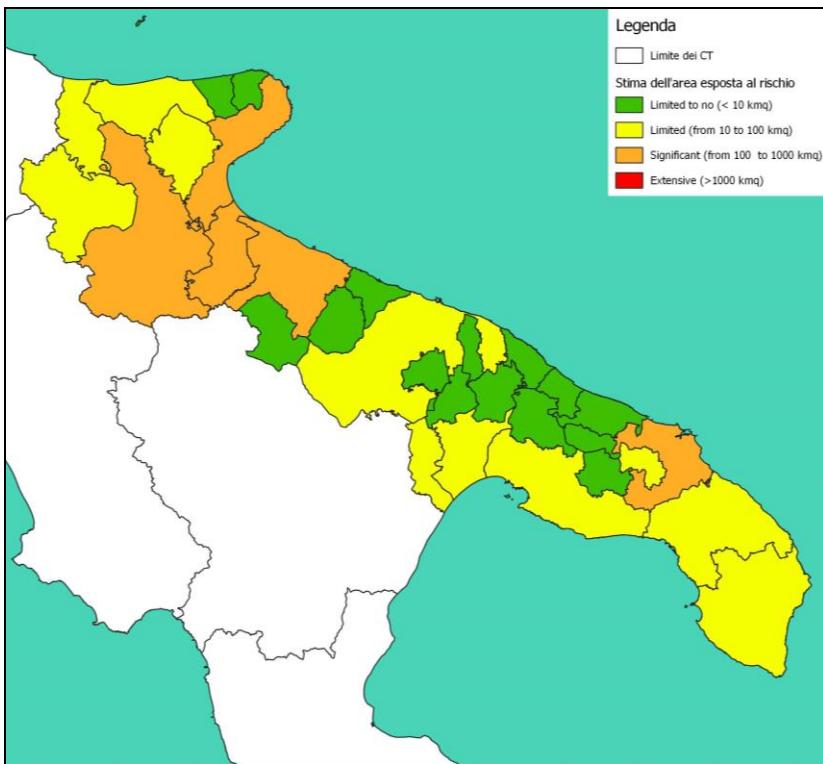


Figura 17 Mappa regionale di area esposta a probabilità di liquefazione

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, l'area esposta a probabilità di liquefazione.

N°	Contesto Territoriale	Area in liquefazione [km ²]	Superficie totale [km ²]
1	FOGGIA	680.033	2268.598
2	MANFREDONIA	209.379	837.421
3	BARLETTA	156.5	1025.737
4	CERIGNOLA	139.013	632.098
5	BRINDISI	127.967	700.541
6	LECCE	99.065	1296.352
7	APRICENA	78.082	722.152
8	TARANTO	77.762	1271.755
9	OTRANTO	66.377	1469.348
10	LUCERA	62.128	1085.485
11	SAN GIOVANNI ROTONDO	59.025	582.398
12	CASTELLANETA	55.654	565.371
13	GINOSA	54.795	346.945
14	BARI	40.106	2020.582
15	MESAGNE	25.105	177.523
16	TORREMAGGIORE	10.854	503.889
17	GIOIA DEL COLLE	9.921	241.181
18	RUTIGLIANO	3.431	164.644
19	MINERVINO MURGE	2.144	438.72
20	CORATO	1.472	390.475
21	ACQUAVIVA DELLE FONTI	0.978	220.47
22	RODI GARGANICO	0.11	181.103
23	VICO DEL GARGANO	0	159.507
24	MOLFETTA	0	239.988
25	MARTINA FRANCA	0	384.141
26	CEGLIE MESSAPICA	0	156.98
27	FASANO	0	184.104
28	FRANCAVILLA FONTANA	0	258.964
29	MONOPOLI	0	218.96
30	OSTUNI	0	328.815
31	PUTIGNANO	0	317.086

Tabella 5 Classifica regionale della priorità di intervento in base all' area esposta a probabilità di liquefazione

2.4 Validazione

La metodologia è stata applicata per diversi eventi sismici in modo da poter costruire un utile confronto tra i risultati delle elaborazioni e l'occorrenza reale del fenomeno cosismico, estrapolata dai cataloghi o da alcuni lavori presenti in letteratura.

La PGV è stata calcolata da scenario sismico attraverso la legge di attenuazione di Akkar et. al (2013).

Di seguito sono riassunte i casi ai quali è stata applicata la metodologia e i risultati ottenuti per l'evento della Marsica del 13-01-1915:

Evento	X WGS UTM Zone 33N	Y WGS UTM Zone 33N	M_w	Stile di faglia	Profondità [km]
1. Friuli 06-05-1976	368906.779	5124245.367	6.4	Thrust Fault	5.7
2. L'Aquila 06-04-2009	366474.729	4688688.606	6.3	Normal	8.3
3. Marsica 13-01-1915	378208.491	4652265.309	7.1	Normal	8
4. Bologna 20-05-2012	204635.475	4978548.741	5.8	Thrust Fault	10
5. Calabria 05-02-1783	584967	423970	7.1	Normal	10

Tabella 6 Eventi sismici per i quali la metodologia è stata applicata



Figura 18 ShakeMap, in termini di PGV, dell'evento della Marsica del 13-01-1915 calcolata attraverso la legge di attenuazione di Akkar et. al (2013)

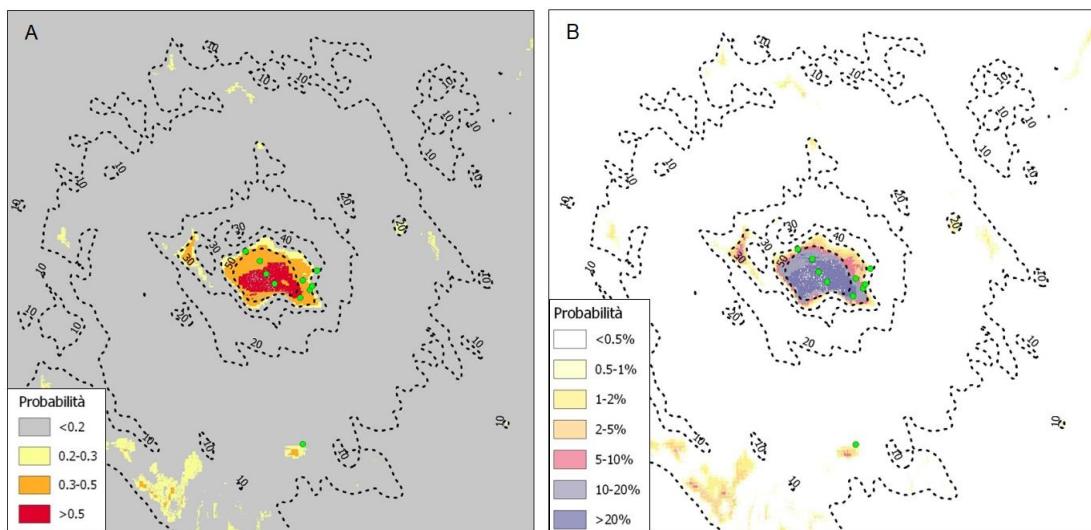


Figura 19 Mappa delle probabilità di liquefazione(A) e di areal coverage (B) ricavate dall'applicazione del modello, i punti in verde indicano i siti dove è stata rilevata la liquefazione a seguito dell'evento (Galli 2000).

Dalla sovrapposizione del catalogo di Galli (2000) (punti in verde) con le mappe di probabilità prodotte dal modello si può notare come questi ricadono quasi del tutto nelle aree dove il modello attribuisce una maggiore probabilità di occorrenza del fenomeno.

3. Danneggiamento edilizia residenziale

Descrizione degli aspetti metodologici, dei risultati e delle validazioni

3.1 Metodologia

La procedura delineata conduce alla determinazione di scenari di danno a scala territoriale sulla base di mappe statiche di pericolosità sismica e dati censuari “poveri” sull’edilizia residenziale. Il fine ultimo della metodologia è quello di produrre mappe regionali sulle quali, per ciascuno dei Contesti Territoriali, vengono riportati dei parametri indicatori “proxy” del raggiungimento o meno di una Condizione Limite in quell’ambito territoriale.

Le basi teoriche si radicano nell’approccio macrosismico di Lagomarsino e Giovinazzi, 2006 sviluppato nell’ambito del progetto Risk-UE e cross-validato, all’interno della stessa memoria, con metodi meccanici. Precedenti calibrazioni e validazioni del metodo erano state effettuate dagli autori nell’anno 2011 sulla base di dati, desunti da terremoti reali, in termini di intensità macrosismica EMS-98, che rappresenta una misura della severità dell’evento sulla base del danno osservato.

Il metodo macrosismico consente la valutazione in forma chiusa del danno atteso in funzione della vulnerabilità degli edifici oggetto di valutazione e dell’input sismico.

La vulnerabilità è espressa sulla base di dati tipologici e costruttivi tramite due parametri detti, rispettivamente, indice di duttilità Q e indice di vulnerabilità V.

La forzante sismica è descritta in termini di intensità macrosismica in accordo con la scala europea EMS-98, considerato come una variabile continua su suolo rigido.

Il danno strutturale e non strutturale sugli edifici è suddiviso in cinque gradi D_k (k = 0/5): D1 lieve, D2 moderato, D3 grave, D4 molto grave, D5 distruttivo con l’aggiunta del livello D0 relativo all’assenza di danno.

La correlazione che intercorre tra il danno atteso medio μ_D ($0 < \mu_D < 5$) e gli altri parametri introdotti è data da:

$$\mu_D = 2.5 \cdot \{1 + \tanh[(I + 6.25 \cdot V - 13.1)/Q]\}$$

La probabilità p_k di avere un grado di danno D_k segue una distribuzione binomiale la cui densità di probabilità può essere espressa tramite:

$$p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k}$$

Anche la deviazione standard può essere espressa in funzione del valor medio del danno:

$$\sigma_D = \sqrt{\mu_D \cdot (1 - \frac{\mu_D}{5})}$$

La distribuzione binomiale è stata impiegata essendosi dimostrata adatta a descrivere statisticamente le distribuzioni di danno realmente osservate a seguito del terremoto dell’Irpinia nel 1980.

E’ possibile associare, ad una data tipologia edilizia, un valore convenzionale dell’indice di vulnerabilità V. Infatti, seguendo la filosofia della tabella di vulnerabilità EMS-98 (Grunthal, 1998), il comportamento sismico delle tipologie costruttive è

collegato al comportamento sismico di classi di vulnerabilità. Più in dettaglio, per ciascuna tipologia, viene fornito il valore di classe di vulnerabilità più probabile e un range di variazione.

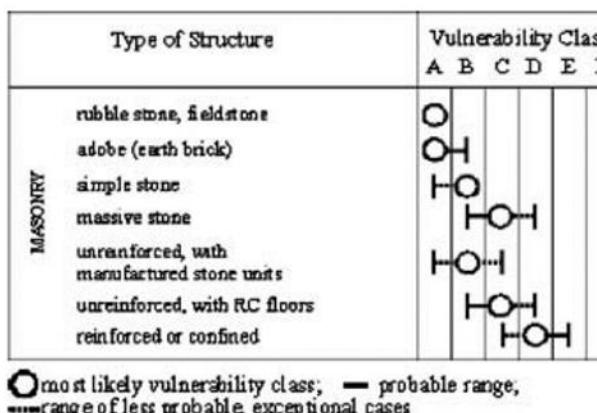


Figura 20 Classi di vulnerabilità secondo EMS98

La corrispondenza tra classe di vulnerabilità ed indice di vulnerabilità convenzionale è riportato nella figura successiva, dove si trovano anche i range di variazione, descritti da una funzione $\chi(V)$.

Il fattore di duttilità Q, in questa fase, può essere fissato pari ad un valore 2.3.

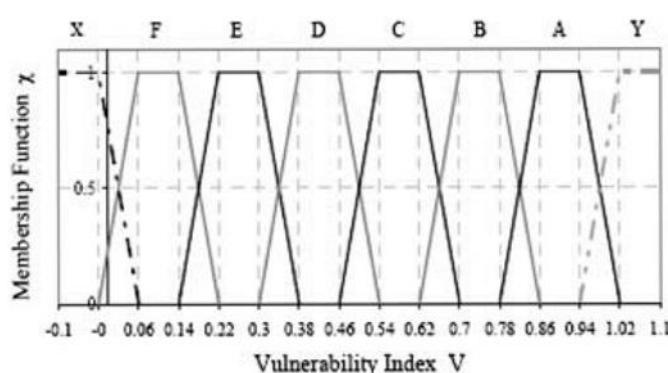


Figura 21 Funzione $\chi(V)$

Numericamente è possibile identificare i seguenti valori per l'indice di vulnerabilità V delle classi da A a D:

	Indice di vulnerabilità V			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Minimo	0.82	0.66	0.50	0.34
Medio	0.90	0.74	0.58	0.42
Massimo	0.98	0.82	0.66	0.50

Tabella 7 Indice di vulnerabilità in base alla classe

Il legame tra i dati tipologici e la distribuzione del costruito in classi di vulnerabilità può essere ritrovato nella procedura BINC (Building Inventory at National scaled based on Census data) il cui scopo è quello di individuare, fissato l'ambito di territoriale di riferimento, la distribuzione in termini di classi di vulnerabilità, in accordo con la scala macroismica europea EMS-98, sulla base di soli dati censuari. L'approccio è descritto in Cacace et al. (2016) e si fonda su due database: ISTAT 2001, a scala nazionale e con informazioni di carattere aggregato, e PLINIVS, a scala regionale (circa 180000 edifici appartenenti a 800 Comuni italiani), in cui le informazioni sono di carattere disaggregato.

I parametri tipologici considerati sono sei: posizione dell'edificio nell'aggregato, materiale costituente le strutture verticali, età di costruzione, numero di piani fuori terra, altimetria del Comune e classe demografica.

Per ciascun edificio la classe di vulnerabilità sismica è individuata sulla base delle sue caratteristiche secondo il metodo statistico 'SAVE' (Strumenti Aggiornati per la Vulnerabilità sismica del patrimonio Edilizio e dei sistemi urbani) partendo dalla scala macroismica europea e definendo, in base agli aspetti tipologici rilevanti (età dell'edificio, regolarità geometrica, strutture orizzontali, presenza di incatenamenti, posizione nell'aggregato tipologia di copertura), dei modificatori di vulnerabilità aventi un determinato peso, calibrato sull'osservazione di reali danneggiamenti indotti nei più severi terremoti italiani successivi a quello avvenuto in Irpinia nel 1980.

La procedura 'SAVE', applicata a ciascun edificio, lo iscrive in una classe di vulnerabilità sulla base di un parametro numerico detto Synthetic Parameter of Damage (SPD) il quale considera l'influenza di ciascun aspetto tipologico rilevante.

In termini di età di costruzione è possibile ricavare le seguenti frequenze di ricorrenza delle classi di vulnerabilità (A, B, C, e D):

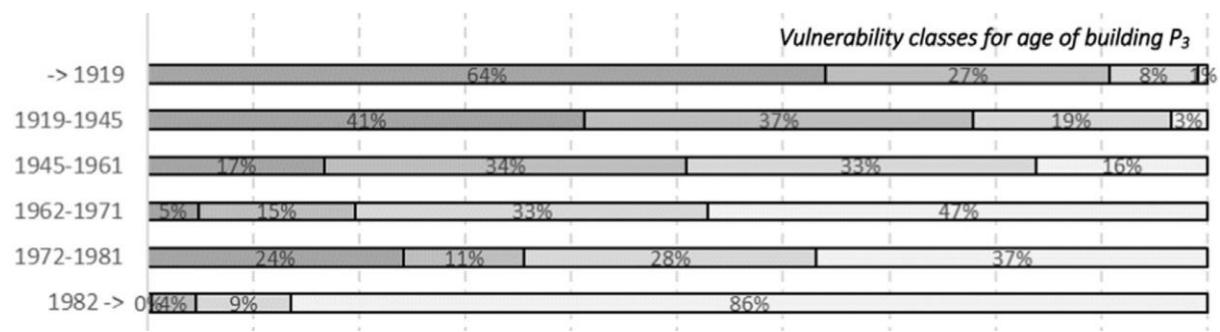


Figura 22 Classi di vulnerabilità del costruito per anno di costruzione (Cacace et al. 2016)

Questi risultati sono riassunti nella seguente tabella:

Anno di costruzione	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
<1919	64%	27%	8%	1%
1919 - 1945	41%	37%	19%	3%
1946 - 1961	17%	34%	33%	16%
1962 - 1971	5%	15%	33%	47%
1972 - 1981	24%	11%	28%	37%
> 1982	1%	4%	19%	76%

Tabella 8 Classi di vulnerabilità del costruito per anno di costruzione (Cacace et al. 2016)

Considerando un insieme generico di N edifici, per ciascuno dei quali sia noto l'anno di costruzione, è possibile ottenerne la distribuzione in classi di vulnerabilità secondo le seguenti espressioni:

$$A[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i1}}{N}$$

$$B[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i2}}{N}$$

$$C[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i3}}{N}$$

$$D[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i4}}{N}$$

In cui:

- > i=1:6 è un indice che rappresenta la classe di età (righe della tabella di inferenza);
- > n_i è il numero di edifici relativo alla classe di età i-esima;
- > Z_{ij} è la matrice di inferenza con l'indice j, variabile da 1 a 4, rappresentativo della classe di vulnerabilità (colonne della matrice);

Una volta nota lo spettro di vulnerabilità del costruito dell'unità territoriale considerata è possibile ottenere il valore medio dell'indice di vulnerabilità V_m come media ponderata rispetto a questa distribuzione:

$$V_m = \frac{A \cdot v_{m,A} + B \cdot v_{m,B} + C \cdot v_{m,C} + D \cdot v_{m,D}}{100}$$

In cui con v_m sono stati indicati i valori dell'indice di vulnerabilità medio associato a ciascuna classe.

Il parametro appena ricavato può essere modificato per tenere conto di un incremento o un decremento di vulnerabilità sulla base dell'altezza dell'edificio. Si somma un fattore pari a -0.08 per edifici di uno o due piani, riducendo l'indice di vulnerabilità, e un fattore +0.08 per edifici con un numero di piani superiore a 3. Considerando l'insieme degli edifici in esame, il valore del modificatore può essere ottenuto come media pesata rispetto al numero di edifici aventi una determinata altezza:

$$Mod_h = \frac{(-0.08) \cdot n_{np \leq 2} + n_{np=3} + 0.08 \cdot n_{np > 3}}{N}$$

Una ulteriore modifica al valore dell'indice di vulnerabilità può essere ottenuta considerando lo stato di conservazione dei manufatti. In relazione alla tipologia edilizia (M: muratura, RC: calcestruzzo armato) e dell'età di costruzione si adottano i seguenti modificatori di comportamento per tenere conto dell'influenza sulla risposta sismica dello stato di conservazione:

Categorie	Ottimo	Buono	Mediocre	Pessimo
I M<1919	-0.04	-0.02	0.06	0.08
II M=1919 ÷ 1945	-0.03	-0.02	0.04	0.06
III M =1945 1971	-0.02	-0.01	0.02	0.04
IV M=1971 ÷ 1981	-0.01	0	0.02	0.04
V M>1981	-0.01	0	0.02	0.04
VI RC<1971	-0.02	0	0.02	0.04

VII RC=1971÷1981	-0.01	0	0.01	0.02
VIII RC >1981	0	0	0	0

Tabella 9 Modificatori di comportamento sullo stato di conservazione (Cacace et al. 2016)

Ancora una volta, dovendo attribuire un valore del modificatore di comportamento Mod_{cons} non ad un singolo manufatto ma ad un insieme di edifici, è possibile procedere tramite una media pesata sul numero di edifici appartenenti ad una determinata classe.

Una volta quantificato l'effetto dell'altezza e dello stato di conservazione sul comportamento sismico, questi termini vengono sommati all'indice di vulnerabilità iniziale:

$$V = V_m + Mod_h + Mod_{cons}$$

Una volta ricavato il parametro di vulnerabilità finale, nota la forzante in termini di intensità macrosismica, è possibile ottenere la distribuzione in classi di danno degli edifici in esame.

Per determinare l'input sismico è possibile sfruttare le correlazioni esistenti tra intensità macrosismica e altre misure di scuotimento quali, ad esempio, la PGA. Possono essere condotte sia analisi di scenario tramite l'utilizzo di leggi di attenuazione, una volta note le caratteristiche dell'evento sismico, che valutazioni facenti uso di mappe statiche di accelerazione sismica di riferimento.

Tali approcci possono essere impiegati con successo, rispettivamente, in validazioni della procedura e nella produzione di mappe di danno.

Nell'applicazione della metodologia di scenario può essere impiegata la legge GMPE empirica sviluppata da Akkar, Bommer e Sandikkaya nel 2013 per mezzo di un ampio database europeo. Questa permette la valutazione dello spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione, nonché di altri parametri quali PGA e PGV, indotti a seguito di eventi sismici crostali puntiformi ed estesi. Rispetto ad altre leggi di attenuazione si ha il vantaggio di poter utilizzare una funzione di amplificazione del moto sismico non lineare, in funzione del parametro Vs,30.

Le espressioni impiegate da questo modello predittivo per l'accelerazione spettrale mediana Y sono le seguenti:

$$\ln(Y) = \ln[Y_{REF}(M_w, R, SoF)] + \ln[S(V_{s,30}, PGA_{REF})] + \epsilon\sigma$$

In cui:

Se $M_w \leq c_1$

$$\ln(Y_{REF}) = a_1 + a_2(M_w - c_1) + a_3(8.5 - c_1)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \cdot \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) + a_8F_N + a_9F_R + S$$

Se $M_w > c_1$

$$\ln(Y_{REF}) = a_1 + a_7(M_w - c_1) + a_3(8.5 - c_1)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \cdot \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) + a_8F_N + a_9F_R + S$$

Dove:

Se $V_{s,30} \leq V_{ref}$

$$\ln(S) = b_1 \ln\left(\frac{V_{s,30}}{V_{ref}}\right) + b_2 \ln\left(\frac{PGA_{REF} + c \left(\frac{V_{s,30}}{V_{ref}}\right)^n}{(PGA_{REF} + c) \left(\frac{V_{s,30}}{V_{ref}}\right)^n}\right)$$

Se $V_{s,30} > V_{ref}$

$$\ln(S) = b_1 \ln\left(\frac{\min(V_{s,30}, V_{CON})}{V_{ref}}\right)$$

Da cui si osserva che l'accelerazione spettrale mediana si ottiene modificando un termine di riferimento $\ln(V_{ref})$ attraverso una funzione di amplificazione non lineare $\ln(S)$.

Gli altri termini del modello sono la magnitudo momento Mw, la distanza sorgente-sito R (che può essere, a seconda del modello, la distanza epicentrale, ipocentrale o la distanza di Joyner-Boore), due fattori F_N e F_R uguali ad uno se il meccanismo di faglia è normale o inverso e zero altrimenti. I valori della velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri di riferimento e costante sono assunti, rispettivamente, $V_{ref} = 750$ m/s e $V_{con} = 1000$ m/s.

I coefficienti della regressione per distanza ipocentrale sono riportati di seguito a titolo esemplificativo:

Period(s)	a ₁	a ₃	a ₄	a ₈	a ₉	b ₁	b ₂	ϕ	τ	σ
<i>(c)</i>										
PGA	3.26685	-0.04846	-1.47905	-0.1091	0.0937	-0.41997	-0.28846	0.6475	0.3472	0.7347
0.01	3.28656	-0.04784	-1.48197	-0.1115	0.0953	-0.41729	-0.28685	0.6492	0.3481	0.7366
0.02	3.38936	-0.04796	-1.50214	-0.104	0.1029	-0.39998	-0.28241	0.6543	0.3508	0.7424
0.03	3.53155	-0.04537	-1.52781	-0.0973	0.1148	-0.34799	-0.26842	0.6685	0.3526	0.7558
0.04	3.68895	-0.03991	-1.55693	-0.0884	0.1073	-0.27572	-0.24759	0.6816	0.3513	0.7668
0.05	3.86581	-0.0349	-1.58672	-0.0853	0.1052	-0.21231	-0.22385	0.6899	0.3659	0.7809
0.075	4.18224	-0.02826	-1.62527	-0.0779	0.0837	-0.14427	-0.17525	0.6881	0.3942	0.793
0.10	4.4375	-0.03256	-1.65601	-0.0749	0.0761	-0.27064	-0.29293	0.6936	0.4122	0.8068
0.15	4.52949	-0.04509	-1.63467	-0.0265	0.0545	-0.48313	-0.39551	0.7048	0.3779	0.7997
0.20	4.1775	-0.05565	-1.53574	0	0.0493	-0.65315	-0.44644	0.6954	0.3848	0.7948
0.30	3.57698	-0.0749	-1.38832	0	0.0469	-0.82609	-0.45730	0.6934	0.3896	0.7954
0.40	3.03752	-0.09243	-1.26045	0	0.04	-0.89517	-0.43008	0.7037	0.3894	0.8043
0.50	2.77997	-0.10964	-1.20953	0	0.0271	-0.94614	-0.37408	0.6821	0.4017	0.7916
0.75	1.91625	-0.13547	-1.05027	0	0.0141	-1.00786	-0.28957	0.7028	0.389	0.8033
1.00	1.43982	-0.15427	-0.97812	0	0	-1.01331	-0.28702	0.7022	0.3826	0.7997
1.50	0.83007	-0.18248	-0.90319	0	0	-0.98071	-0.24695	0.7378	0.3758	0.828
2.00	0.40614	-0.20136	-0.86343	0	-0.009	-0.91007	-0.17336	0.7446	0.3676	0.8304
3.00	-0.22534	-0.22564	-0.83314	0	-0.0683	-0.85793	-0.13336	0.7154	0.4019	0.8206
4.00	-0.51893	-0.25256	-0.80922	0	-0.2231	-0.75645	-0.07749	0.6364	0.3318	0.7177
PGV	6.72743	-0.11474	-1.17694	-0.0616	0.063	-0.72057	-0.19688	0.628	0.3312	0.71

Figura 23 Coefficienti per distanza ipocentrale

Per eventi sismici di natura vulcanica è possibile utilizzare, nell'approccio di scenario, specifiche leggi di attenuazione sviluppate sulla base di database empirici reperiti in queste aree.

Un esempio è la GMPE di Tusa e Langer per la quale sono stati impiegati dati provenienti da 91 terremoti dell'area Etnea. Questa si differenzia in due casi: eventi superficiali ed eventi profondi, diversi in termini di contenuto in frequenza.

Per approcci mappali di tipo statico, invece, è possibile riferirsi al sito dell'INGV una volta scelto il periodo di ritorno relativo all'analisi da condurre.

La correlazione che intercorre tra il parametro PGA e l'intensità macrosismica EMS-98 è scelta nella legge Cauzzi-Faccioli (2006).

La relazione tra il danno e le perdite economiche può essere ricavata a partire dall'allegato A al D.M. 65 del 07/03/2017 all'interno del quale è riportata una tabella di collegamento tra un determinato Stato Limite della struttura e la percentuale del costo di ricostruzione CR [%] associato a ciascuno di essi:

Stato Limite	CR(%)
SLR	100%
SLC	80%
SLV	50%
SLD	15%
SLO	7%
SLID	0%

Figura 24 Relazione tra Stati Limite e percentuale del Costo di Ricostruzione (D.M. 65 del 07/03/2017)

Associando a ciascuno Stato Limite un livello di danno, secondo la seguente tabella, è possibile ricavare il polinomio passante per le coppie (Di,Cri) e, successivamente, stimare il costo complessivo di ricostruzione fissando CR = 1200€/mq.

Stato Limite	Stato di Danno
SLO	D1
SLD	D2
SLV	D3
SLC	D4
SLR	D5

Tabella 10 Corrispondenza tra Stati Limite e Stati di Danno

Le persone sfollate vengono ricavate sulla base dell'entità della popolazione e degli edifici risultati inagibili tramite l'equazione:

$$sfollati = popolazione\ tot.: edifici\ inagibili[%]$$

La percentuale di edifici inagibili può essere ricavata, in riferimento al progetto Syner-G, tramite la seguente tabella in funzione del danno agli edifici:

Usability Ratio	Damage Level					
	D0	D1	D2	D3	D4	D5
FU – Fully Usable	0,87	0,69	0,17	0,02	0,00	0,01
PU – Partially Usable	0,13	0,31	0,45	0,21	0,04	0,01
NU – Non Usable	0,00	0,00	0,38	0,77	0,96	0,98

Figura 25 Agibilità sulla base del danno (Progetto Syner-G)

Per quanto riguarda le persone coinvolte in crolli si ha:

coinvolti in crolli = popolazione tot.: 0.3

Per descrivere l'impatto dell'evento sismico è possibile utilizzare il sistema P.A.G.E.R. – U.S.G.S. (Prompt Assesment of Global Earthquakes for Response) il quale definisce una scala basata sulle stime delle perdite economiche e delle perdite in termini di vite umane secondo la seguente tabella:

Alert Level and Color	Estimated Fatalities	Estimated Losses (USD)
Red	1,000+	\$1 billion+
Orange	100 - 999	\$100 million - \$1 billion
Yellow	1 - 99	\$1 million - \$100 million
Green	0	< \$1 million

Figura 26 Livelli di allerta del sistema P.A.G.E.R. (<https://earthquake.usgs.gov/data/pager/background.php>)

3.2 Dati di base

I dati censuari sull'edilizia residenziale, comprensivi delle caratteristiche tipologiche e costruttive necessarie per l'analisi, sono ricavabili dal sito dell'ISTAT (<https://www.istat.it>). L'analisi viene condotta per sezioni censuarie, unità territoriale tale da descrivere il territorio in maniera sufficientemente densa.

In particolare, oltre ai codici identificativi e alle coordinate geografiche delle singole sezioni, per l'analisi di vulnerabilità sono necessari i seguenti record:

- P1 Popolazione residente – totale
- A2 Abitazioni occupate da almeno una persona residente
- A44 Superficie delle abitazioni occupate da almeno una persona residente
- E3 Edifici ad uso residenziale
- E8 Edifici ad uso residenziale costruiti prima del 1919
- E9 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1919 al 1945
- E10 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1946 al 1960
- E11 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1961 al 1970
- E12 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1971 al 1980
- E13 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1981 al 1990
- E14 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1991 al 2000
- E15 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 2001 al 2005
- E16 Edifici ad uso residenziale costruiti dopo il 2005
- E17 Edifici ad uso residenziale con un piano
- E18 Edifici ad uso residenziale con 2 piani
- E19 Edifici ad uso residenziale con 3 piani
- E20 Edifici ad uso residenziale con 4 piani o più
- E28 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione ottimo
- E29 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione buono
- E30 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione mediocre
- E31 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione pessimo

I dati necessari per la definizione dell'input sismico sono per lo più reperibili sul sito dell'INGV (<http://esse1.mi.ingv.it/>) e sulla base delle caratteristiche dell'evento sismico e della sua sorgente.

3.3 Risultati delle elaborazioni

Di seguito vengono presentate le mappe ricavate dall'applicazione della procedura descritta ai paragrafi precedenti che illustrano il danno all'edilizia residenziale rispetto alla pericolosità sismica INGV in termini di PGA per un tempo di ritorno di 475 anni:

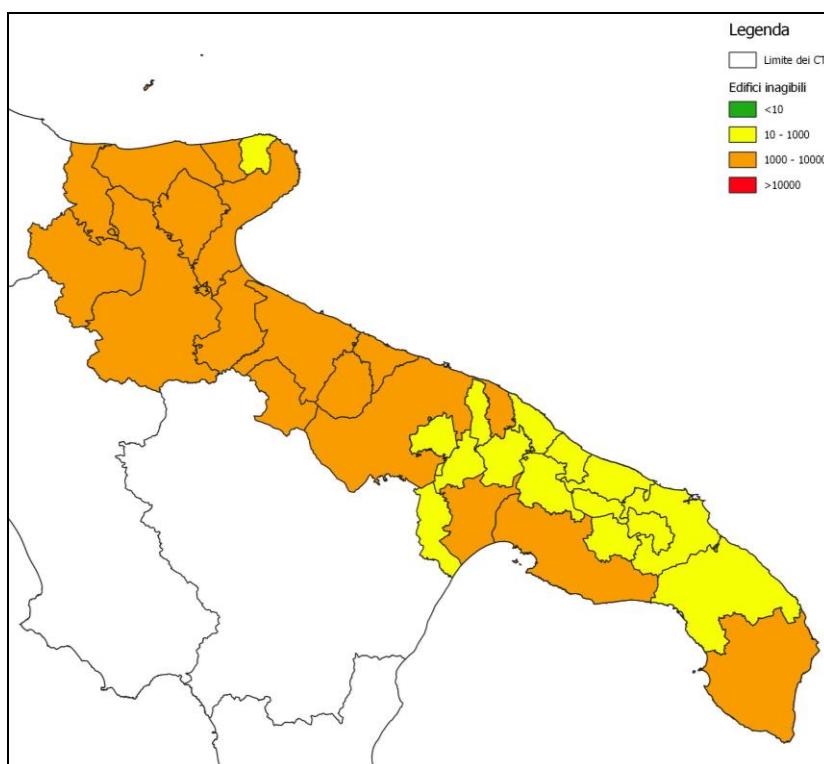


Figura 27 Mappa regionale degli edifici inagibili

Nella seguente tabella viene riportato, per ogni Contesto Territoriale, il numero di edifici inagibili.

N°	Contesto Territoriale	Edifici inagibili
1	FOGGIA	9039
2	BARLETTA	7657
3	BARI	4548
4	LUCERA	3615
5	APRICENA	3397
6	SAN GIOVANNI ROTONDO	2568
7	TORREMAGGIORE	2277
8	CORATO	2220
9	MANFREDONIA	2196
10	CERIGNOLA	1815

11	TARANTO	1667
12	MOLFETTA	1634
13	CASTELLANETA	1492
14	MINERVINO MURGE	1295
15	OTRANTO	1233
16	RODI GARGANICO	1044
17	VICO DEL GARGANO	964
18	GINOSA	923
19	LECCE	632
20	GIOIA DEL COLLE	630
21	MARTINA FRANCA	390
22	PUTIGNANO	383
23	RUTIGLIANO	281
24	ACQUAVIVA DELLE FONTI	221
25	MONOPOLI	195
26	OSTUNI	169
27	BRINDISI	164
28	CEGLIE MESSAPICA	104
29	FASANO	104
30	FRANCAVILLA FONTANA	102
31	MESAGNE	48

Tabella 11 Classifica regionale della priorità di intervento in base agli edifici inagibili

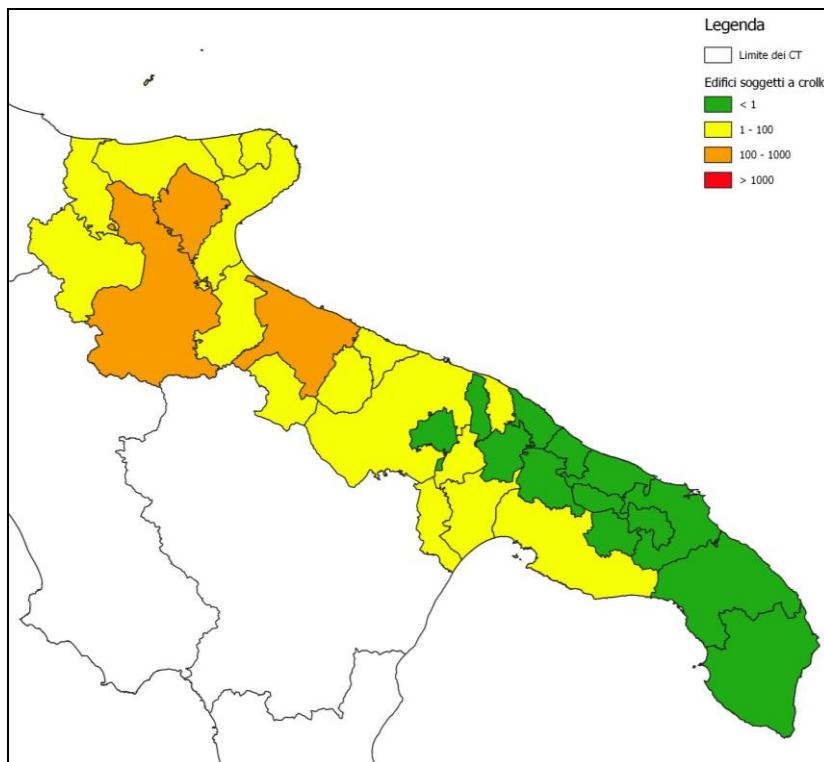


Figura 28 Mappa regionale degli edifici soggetti a crollo

Nella seguente tabella viene riportato, per ogni Contesto Territoriale, il numero di edifici soggetti a crollo.

Nº	Contesto Territoriale	Edifici soggetti a crollo
1	FOGGIA	289
2	BARLETTA	192
3	SAN GIOVANNI ROTONDO	151
4	TORREMAGGIORE	98
5	APRICENA	98
6	LUCERA	98
7	CORATO	83
8	MINERVINO MURGE	76
9	MANFREDONIA	58
10	VICO DEL GARGANO	41
11	CERIGNOLA	37
12	RODI GARGANICO	35
13	MOLFETTA	30
14	BARI	17
15	CASTELLANETA	17
16	GINOSA	7
17	TARANTO	6
18	GIOIA DEL COLLE	3
19	PUTIGNANO	0

20	RUTIGLIANO	0
21	ACQUAVIVA DELLE FONTI	0
22	MARTINA FRANCA	0
23	MONOPOLI	0
24	OTRANTO	0
25	LECCE	0
26	OSTUNI	0
27	FASANO	0
28	FRANCAVILLA FONTANA	0
29	CEGLIE MESSAPICA	0
30	BRINDISI	0
31	MESAGNE	0

Tabella 12 Classifica regionale della priorità di intervento in base agli edifici soggetti a crollo

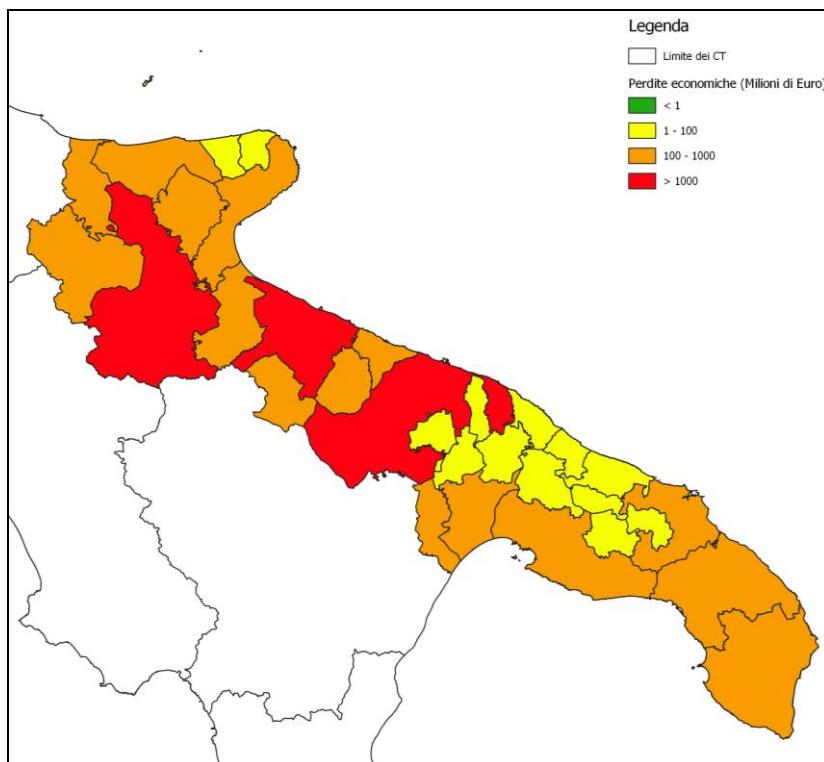


Figura 29 Mappa regionale delle perdite economiche in milioni di euro

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, le perdite economiche espresse in milioni di euro.

N°	Contesto Territoriale	Perdite economiche (in milioni di euro)
1	BARI	1399.09
2	FOGGIA	1289.81
3	BARLETTA	1218.66
4	TARANTO	713.70
5	MOLFETTA	541.08
6	MANFREDONIA	432.29
7	CORATO	373.20
8	OTRANTO	349.72
9	LECCE	282.11
10	LUCERA	264.27
11	APRICENA	255.88
12	CERIGNOLA	252.37
13	SAN GIOVANNI ROTONDO	205.64
14	CASTELLANETA	188.60
15	TORREMAGGIORE	170.52
16	BRINDISI	115.71
17	GINOSA	104.27
18	MINERVINO MURGE	102.35
19	GIOIA DEL COLLE	93.40
20	MARTINA FRANCA	82.15
21	PUTIGNANO	81.43
22	RODI GARGANICO	68.34
23	MONOPOLI	60.54
24	VICO DEL GARGANO	57.15
25	RUTIGLIANO	56.80
26	ACQUAVIVA DELLE FONTI	48.72
27	OSTUNI	36.48
28	FRANCAVILLA FONTANA	35.69
29	FASANO	34.72
30	MESAGNE	23.84
31	CEGLIE MESSAPICA	21.60

Tabella 13 Classifica regionale della priorità di intervento in base alle perdite economiche

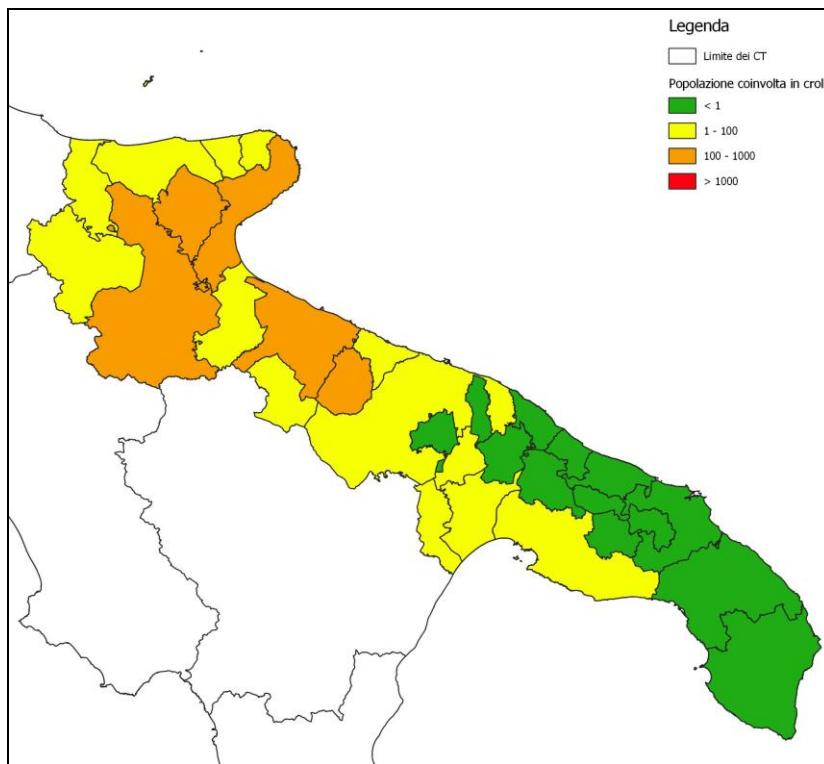


Figura 30 Mappa regionale della popolazione coinvolta in crolli

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, la popolazione coinvolta in crolli.

Nº	Contesto Territoriale	Popolazione coinvolta in crolli
1	FOGGIA	424.91
2	BARLETTA	328.11
3	MANFREDONIA	178.85
4	CORATO	157.91
5	SAN GIOVANNI ROTONDO	131.50
6	MOLFETTA	92.61
7	APRICENA	78.32
8	TORREMAGGIORE	76.81
9	MINERVINO MURGE	69.51
10	CERIGNOLA	63.55
11	LUCERA	55.29
12	RODI GARGANICO	32.76
13	VICO DEL GARGANO	25.34
14	BARI	23.90
15	TARANTO	17.86
16	CASTELLANETA	17.51
17	GINOSA	6.70
18	GIOIA DEL COLLE	3.06
19	PUTIGNANO	0.32

20	ACQUAVIVA DELLE FONTI	0.23
21	RUTIGLIANO	0.20
22	MONOPOLI	0.12
23	MARTINA FRANCA	0.12
24	OTRANTO	0.06
25	LECCE	0.04
26	OSTUNI	0.02
27	BRINDISI	0.01
28	FRANCAVILLA FONTANA	0.01
29	FASANO	0.01
30	CEGLIE MESSAPICA	0.01
31	MESAGNE	0.00

Tabella 14 Classifica regionale della priorità di intervento in base alla popolazione coinvolta in crolli

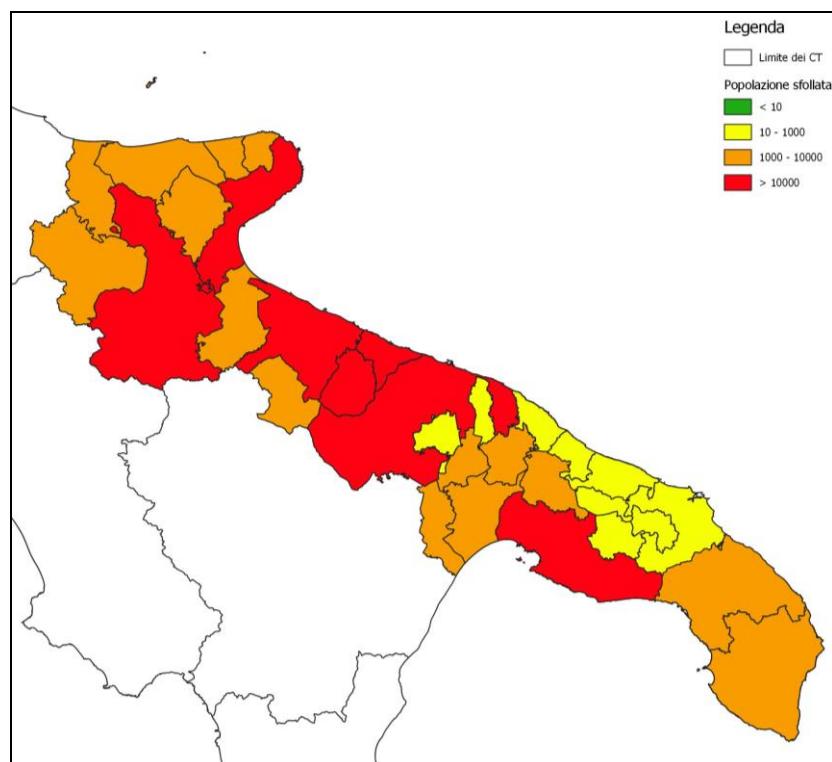


Figura 31 Mappa regionale della popolazione sfollata

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, la popolazione sfollata.

N°	Contesto Territoriale	Popolazione sfollata
1	FOGGIA	46148.38
2	BARLETTA	42957.01
3	BARI	30489.14
4	MOLFETTA	17949.04
5	MANFREDONIA	17250.33
6	TARANTO	14069.68
7	CORATO	13083.86
8	CERIGNOLA	9672.43
9	APRICENA	8416.04
10	LUCERA	8312.84
11	SAN GIOVANNI ROTONDO	7840.83
12	TORREMAGGIORE	5939.26
13	CASTELLANETA	5686.21
14	MINERVINO MURGE	3683.69
15	GINOSA	3271.74
16	OTRANTO	2677.43
17	RODI GARGANICO	2321.88
18	GIOIA DEL COLLE	2075.21
19	VICO DEL GARGANO	1876.57
20	LECCE	1811.12
21	PUTIGNANO	1223.91
22	MARTINA FRANCA	1098.58
23	BRINDISI	858.54
24	MONOPOLI	802.44
25	RUTIGLIANO	798.31
26	ACQUAVIVA DELLE FONTI	681.31
27	OSTUNI	394.63
28	FASANO	340.16
29	FRANCAVILLA FONTANA	329.38
30	CEGLIE MESSAPICA	217.85
31	MESAGNE	136.93

Tabella 15 Classifica regionale della priorità di intervento in base alla popolazione sfollata

3.4 Validazione

La procedura è stata applicata per 8 diversi eventi sismici in modo da poter costruire un utile confronto in termini di danno all'edilizia residenziale e alla popolazione coinvolta. Di seguito sono riassunte i casi ai quali è stata applicata la metodologia e i risultati ottenuti:

Evento	X ED50 UTM Zone 32N	X ED50 UTM Zone 32N	M _w	Stile di faglia	Profondità [km]	Intensità macroseismica EMS-98 minima considerata
1. Terremoto di Santo Stefano 26/12/2018	1040286.5	4183722.1	4.90	Vulcanico	1.55	6
2. Lunigiana 21/06/2013	591282.7	4887140.9	5.10	Normale	7.00	6
3. San Giuliano di Puglia 31/10/2002	993537.6	4633685.4	5.70	Trascorrente	10.00	6
4. Mormanno 25/10/2012	1100716.7	4437175.0	5.20	Normale	9.70	6
5. Abruzzo 07/05/1984	921068.4	4625256.4	5.86	Normale	10.00	6
6. Umbria Marche 26/09/1997	820256.3	4770621.2	6.00	Normale	6.00	6
7. L'Aquila 06/04/2009	860853.3	4696910.1	6.10	Normale	8.00	6
8. Emilia 20/05/2012	678516.9	4974524.4	5.83	Inversa	10.00	6

Tabella 16 Eventi sismici oggetto di validazione della metodologia

Si ottengono i seguenti risultati dei quali viene riportato il confronto con dati ufficiali. I colori delle tabelle si riferiscono al sistema P.A.G.E.R. USGS per la stima dell'impatto del sisma.

3.4.1 Terremoto di Santo Stefano del 26/12/2018

Evento	Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
1 Scenario Test	Valore Min.	41	0	43	0	121	0	9
	Valore Med.	85	0	88	0	228	0	13
	Valore Max.	173	0	182	0	516	0	19

Il dato ufficiale della Protezione Civile Siciliana vede 1273 abitazioni inagibili e 1334 sfollati.

3.4.2 Terremoto Lunigiana del 21/06/2013

Evento	Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
2 Scenario Test	Valore Min.	793	2	1323	3	2988	2	174
	Valore Med.	1449	7	2394	14	4740	9	255
	Valore Max.	2806	30	4642	56	10603	37	368

Il dato ufficiale della Regione Toscana vede un totale di 1180 edifici inagibili.

3.4.3 Terremoto San Giuliano di Puglia del 31/10/2002

Evento	Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
3 Scenario Test	Valore Min.	1807	9	1388	7	3192	4	116
	Valore Med.	2793	40	2178	29	4180	19	164
	Valore Max.	5053	145	3963	106	9196	71	224

I dati ufficiali resi disponibili dal Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, ad un mese dal terremoto, indicavano, oltre alle trenta vittime, le seguenti cifre: 62 comuni richiedenti assistenza a vario titolo, 5500 sfollati, 21 tendopoli allestite, 2930 edifici parzialmente agibili, 3883 edifici inagibili, 23 abitazioni crollate.

3.4.4 Terremoto Mormanno del 25/10/2012

Evento	Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
4 Scenario Test	Valore Min.	181	0	173	0	394	0	21
	Valore Med.	325	2	315	1	621	1	30
	Valore Max.	616	7	601	6	1380	4	43

Il dato ufficiale è di 400 abitazioni inagibili e nessun crollo.

3.4.5 Terremoto Abruzzo del 07/05/1984

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]
5 Scenario Test	Valore Min.	1152	6	1067	5	2476	3	124
	Valore Med.	1864	25	1802	19	3625	12	179
	Valore Max.	3486	86	3417	67	8062	44	254

Il dato ufficiale parla di 6000 sfollati e 1767 abitazioni inagibili.

3.4.6 Terremoto Umbria Marche del 26/09/1997

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]
6 Scenario Test	Valore Min.	1932	36	1705	22	3862	14	202
	Valore Med.	2788	102	2741	62	5401	41	292
	Valore Max.	5213	251	5229	159	12068	104	413

Il dato ufficiale vede di 80 abitazioni crollate oltre a 11 vittime e 100 feriti.

3.4.7 Terremoto L'Aquila 06/04/2009

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]
7 Scenario Test	Valore Min.	4922	120	8234	226	20353	159	468
	Valore Med.	6037	355	9428	665	19054	473	618
	Valore Max.	10964	874	16931	1621	42318	1168	787

Il dato ufficiale parla di 305 vittime e 38000 sfollati.

3.4.8 Terremoto Emilia 20/05/2012

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]
8 Scenario Test	Valore Min.	2559	7	4025	10	9720	7	629
	Valore Med.	4556	32	7304	44	15310	32	919
	Valore Max.	8730	118	14124	167	34155	119	1315

Il dato ufficiale complessivo per le due scosse da Regione Emilia-Romagna vede:

- > 9000 edifici inagibili;
- > 4500 parzialmente inagibili;
- > 31000 abitazioni inagibili;
- > 3,3 miliardi di euro danni stimati;
- > Circa 42000 persone evacuate.

Bibliografia

M.A. Nowicki Jessee, M.W. Hamburger, K. Allstadt, D.J. Wald, S.M. Robeson, H. Tanyas, M. Hearne, E.M. Thompson. A Global Empirical Model for Near-Real-Time Assessment od Seismically Induced Landslides. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 123:1835-1859 (2018) doi: 10.1029/2017JF004494

J. Zhu, L. G. Baise, E. M. Thompson. An Updated Geospatial Liquefaction Model for Global Application. Bulletin of the Seismological Society of America 107:3 (2017) doi: 10.1785/0120160198

S. Lagomarsino, S. Giovinazzi. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. Bulletin of Earthquake Engineering 4:415-443 (2006) doi: 10.1007/s10518-006-9024-z

F. Cacace, G. Zuccaro, D. De Gregorio, F. L. Perelli. Building Inventory at National scale by evaluation of seismic vulnerability classes distribution based on Census data analysis: BINC procedure. International Journal of Disaster Risk Reduction 28:384-393 (2016)

S. Akkar, M. A. Sandikkaya, J. J. Bommer. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bulletin of Earthquake Engineering (2013) doi: 10.1007/s10518-013-9461-4

G.Tusa, H. Langer. Prediction of ground-motion parameters for the volcanic area of Mount Etna. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo Piazza Roma 2, 25125 Catania, Italy

R.Paolucci, C.Smerzini. Empirical evaluation of peak ground velocity and displacement as a function of elastic spectral ordinates for design. Earthquake Engng Struct Dyn. 2017;1-11. <https://doi.org/10.1002/ege.2943>

A.Valagussa, P.Frattini, G.B.Crosta. Earthquake-induced rockfall hazard zoning. Engineering Geology Volume 182, Part B, 19 November 2014, Pages 213-225. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.009>

P. Galli. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. Tectonophysics 324 (2000) 169–187