



PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività BAS_F4.1 | Predisposizione della metodologia per l'individuazione delle priorità di intervento (MS3 e edifici strategici) e definizione delle procedure di intervento

Definizione ed implementazione di un indicatore di priorità di studio MS3 e Edifici Strategici (Classe preliminare di operatività - CPO)

Versione 2.0

Pubblicato in data 29/04/2019





PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività BAS_F4.1 | Predisposizione della metodologia per l'individuazione delle priorità di intervento (MS3 e edifici strategici) e definizione delle procedure di intervento

Definizione ed implementazione di un indicatore di priorità di studio MS3 e Edifici Strategici (Classe preliminare di operatività - CPO)

Versione 2.0

Publicato in data 29/04/2019



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

DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE

Struttura responsabile dell'attuazione del Programma

Angelo Borrelli (responsabile), Lucia Palermo (supporto)

Unità di coordinamento

Fabrizio Brammerini, Angelo Corazza, Italo Giulivo, Agostino Miozzo, Francesca Romana Paneforte, Gianfranco Sorchetti

Unità operativa rischi

Paola Bertuccioli, Sergio Castenetto, Stefano Ciolli, Andrea Duro, Emilio De Francesco, Marco Falzacappa, Antonio Gioia, Pietro Giordano, Antonella Gorini, Giuseppe Naso, Stefania Renzulli, Daniele Spina

Unità di raccordo DPC

Sara Babusci, Pierluigi Cara, Gianluca Garro, Valter Germani, Biagio Prezioso, Sara Petrinelli

Unità amministrativa e finanziaria

Pietro Colicchio, Francesca De Sandro, Maria Cristina Nardella, Ada Paolucci, Vincenzo Vigorita

Hanno fatto parte della struttura

Gabriella Carunchio, Luciano Cavarra, Biagio Costa, Lavinia Di Meo, Francesca Giuliani, Natale Mazzei, Paolo Molinari, Anna Natili, Roberto Oreficini Rosi, Marco Rossitto, Sisto Russo, Chiara Salustri Galli, Maurilio Silvestri

REGIONI

Referenti

Basilicata: Liliana Santoro (coordinatore), Maria Carmela Bruno, Alfredo Maffei, Cinzia Fabozzi, Pietro Perrone, Claudio Berardi, Cosimo Grieco, Antonella Belgiovine, Guido Loperte, Donatella Ferrara; *Calabria*: Francesco Russo (coordinatore), Giuseppe Iritano, Luigi Giuseppe Zinno; *Campania*: Mauro Biafore (coordinatore), Claudia Campobasso, Luigi Cristiano, Emilio Ferrara, Luigi Gentilella, Maurizio Giannattasio, Francesca Maggiò, Vincenzo Minotta, Celestino Rampino; *Puglia*: Tiziana Bisantino, Marco Greco, Franco Intini, Antonio Mario Lerario (coordinatore), Pierluigi Loiacono, Giuseppe Pastore, Francesco Ronco, Isabella Trulli; *Sicilia*: Nicola Alleruzzo, Giuseppe Basile, Antonio Brucculeri, Aldo Guadagnino, Maria Nella Panebianco, Antonio Torrisi

Sono stati referenti

Calabria: Carlo Tansi, *Puglia*: Giuseppe Tedeschi

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

Affidamento di servizi del DPC al CNR-IGAG

Responsabile Unico del Procedimento: Mario Nicoletti

Direttore di Esecuzione Contrattuale: Fabrizio Brammerini

Referenti rischio sismico: Fabrizio Brammerini, Sergio Castenetto, Daniele Spina, Antonella Gorini, Giuseppe Naso

Referente rischio vulcanico: Stefano Ciolli

Referenti pianificazione di emergenza: Antonio Gioia, Stefania Renzulli

CNR-IGAG (operatore economico rischio sismico e vulcanico)

Massimiliano Moscatelli (referente)

Struttura di coordinamento

Gianluca Carbone, Claudio Chiappetta, Francesco Fazio, Biagio Giaccio, Federico Mori, Edoardo Peronace, Federica Polpetta, Attilio Porchia, Andrea Rampa, Francesco Stigliano (coordinatore operativo)

Struttura tecnica

Angelo Anelli, Massimo Cesarano, Eleonora Cianci, Rosa Marina Donolo, Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Angelo Gigliotti, Cora Fontana, Carolina Fortunato, Amerigo Mendicelli, Marco Nocentini, Giuseppe Occhipinti, Gino Romagnoli, Valentina Tomassoni, Vitantonio Vacca

Struttura gestionale

Lucia Paciucci (coordinatrice gestionale), Federica Polpetta (supporto gestionale), Francesco Petracchini

Revisori

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

Supporto tecnico-amministrativo

Francesca Argiolas, Patrizia Capparella, Martina De Angelis, Marco Gozzi, Alessandro Leli, Patrizia Mirelli, Simona Rosselli

BAS_F4.1 – Metodologia per la definizione delle priorità di intervento Regione Basilicata

Responsabile DPC: Antonella Gorini

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

versione colophon 28/06/2019

Sommario

BREVE DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA E DEI RISULTATI	6
1. ESPOSIZIONE	8
2. SCUOTIMENTO IN SUPERFICIE	10
3. FRANE SISMO-INDOTTE	11
<i>Metodologia</i>	11
3.1.1 Creazione del database e individuazione delle variabili indipendenti	12
3.1.2 Campionamento	13
3.1.3 Regressione logistica	14
3.1.4 Valutazione e validazione del modello	14
3.1.5 Conversione della probabilità in percentuale di area in frana	15
3.1.6 USGS: modifiche del modello	15
<i>Dati di base</i>	15
<i>Risultati delle elaborazioni</i>	16
<i>Validazione</i>	17
4 LIQUEFAZIONE	19
<i>Metodologia</i>	19
4.1.1 Creazione del database	20
4.1.2 Individuazione dei parametri rilevanti	20
4.1.3 Campionamento	21
4.1.4 Regressione logistica	22
4.1.5 Valutazione e validazione del modello	22
4.1.6 Conversione della probabilità in percentuale di area in liquefazione	22
4.1.7 Correzione della PGV in base alla magnitudo	23
<i>Dati di base</i>	23
<i>Risultati delle elaborazioni</i>	24
<i>Validazione</i>	25
5 VULNERABILITÀ E DANNI CAUSATI DALLO SCUOTIMENTO SISMICO	27
<i>Metodologia</i>	27

<i>Dati di base</i>	35
<i>Risultati delle elaborazioni</i>	36
<i>Validazione</i>	41
5.1.1 Terremoto di Santo Stefano del 26/12/2018	41
5.1.2 Terremoto Lunigiana del 21/06/2013	42
5.1.3 Terremoto San Giuliano di Puglia del 31/10/2002	42
5.1.4 Terremoto Mormanno del 25/10/2012	42
5.1.5 Terremoto Abruzzo del 07/05/1984	42
5.1.6 Terremoto Umbria Marche del 26/09/1997	43
5.1.7 Terremoto L'Aquila 06/04/2009	43
5.1.8 Terremoto Emilia 20/05/2012	43
6 VULNERABILITÀ E DANNI CAUSATI DAGLI EFFETTI COSISMICI	44
<i>Stima dei danni potenziali all'edilizia e della popolazione coinvolta</i>	44
6.1.1 Stima della superficie esposta	44
6.1.2 Stima della potenziale popolazione esposta	44
<i>Valutazione del potenziale danno alle infrastrutture stradali</i>	44
6.1.3 Stima delle potenziali perdite economiche	45
7 RISULTATI AGGREGGATI PER POPOLAZIONE E RELATIVE PERDITE ECONOMICHE	46
<i>Classificazione dei Contesti Territoriali in classi di esposizione per popolazione.</i>	47
7.1.1 Classe A di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica	48
7.1.2 Classe B di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica	49
7.1.3 Classe C di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica	50
7.1.4 Classe D di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica	51

BREVE DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA E DEI RISULTATI

Il presente documento descrive la metodologia per l'individuazione di una graduatoria di criticità dei Contesti Territoriali (CT) di una Regione, a seguito di un'azione sismica probabilistica.

La graduatoria di criticità dei CT viene stilata secondo due differenti parametri:

- Potenziali perdite fisiche (popolazione);
- Potenziali perdite economiche.

La quantificazione delle potenziali perdite fisiche deriva dalla stima probabilistica di:

- Popolazione coinvolta in edifici inagibili per effetto dello scuotimento sismico amplificato in superficie;
- Popolazione coinvolta in edifici collassati per effetto dello scuotimento sismico amplificato in superficie;
- Popolazione coinvolta in centri e nuclei urbani soggetti a fenomeni cosismici (frana e liquefazione) attivati dallo scuotimento sismico amplificato in superficie.

La quantificazione delle potenziali perdite economiche deriva dalla stima probabilistica di:

- Danno dell'edilizia residenziale;
- Danno delle infrastrutture stradali.

Tali quantificazioni sono aggregate sul singolo CT, partendo dai dati di base di esposizione ISTAT (2011) per sezioni censuarie e dal database infrastrutturale Tele Atlas (categorie funzionali stradali 0,1,2,3,4).

Lo scuotimento sismico è calcolato dall'azione sismica di base con probabilità di superamento del 10% in 50 anni ($T_r=475$ anni) e dall'amplificazione di sito valutata con metodologia semplificata USGS (Allen et al., 2009). La metodologia e gli strumenti implementati permettono anche una valutazione di scenari deterministici (magnitudo, distanza epsilon) dello scuotimento sismico (queste elaborazioni anche se disponibili non sono mostrate in questo documento).

Lo scenario di frane e liquefazioni sismo-indotte è valutato con le metodologie semplificate USGS (Nowicki et al., 2018 per le frane, Zhu et al., 2017 per la liquefazione).

L'attribuzione della vulnerabilità all'edilizia residenziale è valutata con la metodologia BINC (Cacace et al., 2018).

La quantificazione del danno dell'edilizia residenziale è calcolata con un approccio macrosismico calibrato con un approccio meccanico (Lagomarsino et al., 2006).

La quantificazione economica del danno dell'edilizia è legata alla valutazione delle perdite economiche in termini di percentuale del costo di ricostruzione in funzione del danneggiamento come da Allegato A DM_65_del_07-03-2017.

La quantificazione del danno infrastrutturale deriva dalle valutazioni ANAS a seguito del terremoto 2016 (<http://www.anas-sisma2016.it/index.php?>).

Per una più efficace lettura dei risultati i CT vengono raggruppati in base a classi di esposizione di popolazione così definite (nelle mappe si utilizza una gradazione di colore dei toni del verde, da verde chiaro a verde scuro):

Classe A: Popolazione CT < 33.000 (verde chiaro)

Classe B: 33.000 < Popolazione CT < 62.000

Classe C: 62.000 < Popolazione CT < 126.000

Classe D: 126.000 < Popolazione CT < 500.000

Classe E: 500.000 < Popolazione CT < 2.500.000

Classe F: Popolazione CT > 2.500.000 (In questa classe è inserito il solo CT di Roma; verde scuro)

Una tabella comprendente tutti i CT della Regione mostra la graduatoria complessiva.

Nel presente documento, per ciascuna valutazione sono descritti la metodologia, i dati di base, le tabelle e le mappe del parametro specifico, variabile a livello regionale. È anche descritta una validazione delle metodologie attraverso il confronto di scenari sismici predittivi con dati sperimentali di fenomeni osservati a seguito di alcuni eventi sismici italiani.

Un requisito comune per i dati di input delle metodologie semplificate proposte è la estrema flessibilità di applicazione in qualsiasi ambito territoriale. Con questo si vuole sottolineare che se una Regione è interessata a qualche risultato specifico, e dispone di dati di input di dettaglio (es. studi di dettaglio della franosità del territorio), sarà possibile produrre risultati più aggiornati per la specificità regionale.

L'utilizzo di dati «poveri», l'area vasta di studio e le metodologie di elaborazione semplificate non consentono un immediato utilizzo dei risultati per la definizione di uno scenario di danno s.s..

1. ESPOSIZIONE

Database degli esposti

Edilizia residenziale

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

Selezione della rete stradale in base alla classe funzionale.

La rete stradale è stata selezionata in base alla classe funzionale dell'infrastruttura in modo da collegare la quasi totalità dei centri e nuclei abitati.

La base di dati utilizzata è la rete delle infrastrutture viarie progettata dal grafo stradale Multinet di Tele Atlas (2001).

La selezione delle infrastrutture è stata effettuata in base alla categoria funzionale della strada (*Functional Road Classes - FRC*).

Grazie alla FRC è possibile categorizzare i segmenti in base alla loro importanza funzionale all'interno della rete di trasporti.

La classificazione dei trasporti è schematizzata nella seguente tabella.

FRC VALUE	Short Description	Long Description
0	Motorways; Freeways; Major Roads	All roads that are officially assigned as motorways.
1	Major Roads less important than Motorways	All roads of high importance, but not officially assigned as motorways, that are part of a connection used for international and national traffic and transport.
2	Other Major Roads	All roads used to travel between different neighboring regions of a country.
3	Secondary Roads	All roads used to travel between different parts of the same region.
4	Local Connecting Roads	All roads making all settlements accessible or making parts (north, south, east, west and central) of a settlement accessible.
5	Local Roads of High Importance	All local roads that are the main connections in a settlement. These are the roads where important through traffic is possible e.g.: <ul style="list-style-type: none"> • arterial roads within suburban areas, industrial areas or residential areas; • a rural road, which has the sole function of connecting to a national park or important tourist attraction.
6	Local Roads	All roads used to travel within a part of a settlement or roads of minor connecting importance in a rural area.
7	Local Roads of Minor Importance	All roads that only have a destination function, e.g. dead-end roads, roads inside living area, alleys: narrow roads between buildings, in a park or garden.
8	Other Roads	All other roads that are less important for a navigation system: <ul style="list-style-type: none"> • a path: a road that is too small to be driven by a passenger car; • bicycle paths or footpaths that are especially designed as such; • stairs; • pedestrian tunnel; • pedestrian bridge; • alleys that are too small to be driven by a passenger car.

Tabella 1 Classi funzionali delle infrastrutture stradali della rete Tele Atlas

La rete stradale utilizzata per le elaborazioni deriva dalla selezione delle classi funzionali comprese tra 0 e 4.

Classi di esposizione per la popolazione

Sulla base della distribuzione della popolazione nei CT di tutto il territorio nazionale (fig. 1) i CT vengono raggruppati in base a classi di esposizione di popolazione così definite:

Classe A: Popolazione CT < 33.000 (verde chiaro)

Classe B: 33.000 < Popolazione CT < 62.000

Classe C: 62.000 < Popolazione CT < 126.000

Classe D: 26.000 < Popolazione CT < 500.000

Classe E: 500.000 < Popolazione CT < 2.500.000

Classe F: Popolazione CT > 2.500.000

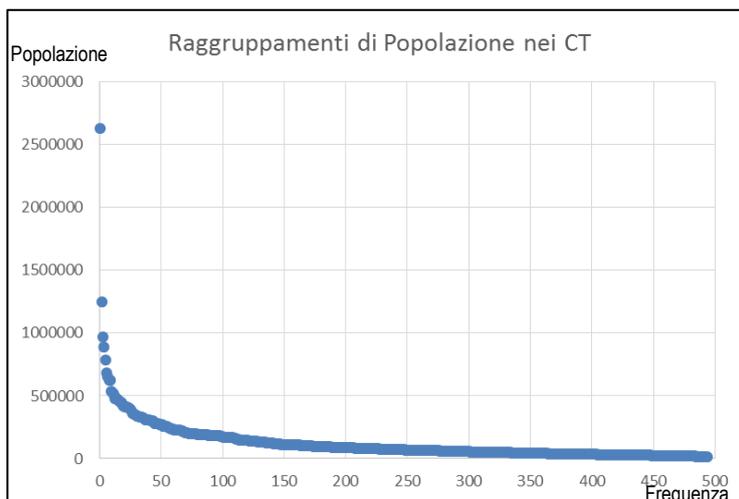


Figura 1 Distribuzione della popolazione dei CT su tutto il territorio nazionale.

Questa classificazione è stata testata in alcune Regioni e ha il pregio di distribuire uniformemente i CT nelle classi. Questa caratteristica di distribuzione rende più agevole la lettura dei dati.

2. SCUOTIMENTO IN SUPERFICIE

A partire dalla maglia di punti NTC-2008 e dalla mappa di Vs30 *slope-based* di Allen et. al (2009) sono state calcolate la PGA e la PGV amplificate.

La metodologia utilizzata è sintetizzata nel modo seguente:

- 1) Maglia di punti INGV, per un tempo di ritorno di 475 anni;
- 2) Campionamento del valore di Vs30 dal *raster* (Allen et al. 2009) per ciascun punto della maglia INGV;
- 3) Assegnazione della categoria di sottosuolo rispetto al valore di Vs30 campionato nel punto precedente e in base alle classi NTC-2008;
- 4) Calcolo del coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s secondo le relazioni all'interno della Tabella 3.2.V delle NTC -2008;

- 5) Calcolo della PGV al *bedrock* attraverso la relazione di Paolucci et al. (2017):

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

- 6) Calcolo della PGA e PGV amplificata (moltiplicando a_g e pgv al *bedrock* per S_s);
 7) Interpolazione della maglia di punti secondo PGA_{S_s} e PGV_{S_s} in modo tale da ottenere una mappa *raster* di PGA e PGV.

La mappa *raster* di PGA amplificata è stata utilizzata nella stima della vulnerabilità e dei danni causati dallo scuotimento sismico sulle sezioni censuarie ISTAT 2011.

La mappa *raster* di PGV amplificata è stata utilizzata come parametro sia per l'applicazione della metodologia di Nowicki et al., 2018 per le frane sia per l'applicazione della metodologia di Zhu et al., 2017 per la liquefazione.

La mappa globale *raster* di V_s30 (Allen et al. 2009) è stata utilizzata anche come proxy per l'applicazione della metodologia di Zhu et al., 2017 per la liquefazione.

3. FRANE SISMO-INDOTTE

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 raggiungibilità delle località abitate e quindi della risposta di un sistema di gestione dell'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 programmazione e allocazione delle risorse, sia per la gestione dell'emergenza.

Il primo modello disponibile in letteratura e applicabile su ampia scala territoriale è quello di Nowicki et al., sviluppato nel 2014 e affinato nel 2018. Questo metodo, di tipo statistico, è stato sviluppato a partire da un ampio database di frane mediante l'utilizzo della funzione "regressione logistica"¹. 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 che descrivono le condizioni geologiche e geotecniche del sito.

Il metodo, capace di previsioni su scala territoriale, è stato migliorato nel corso del tempo tramite l'espansione del dataset 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 Modello di regressione non lineare utilizzato quando la variabile dipendente è di tipo dicotomico. L'obiettivo del modello è di stabilire la probabilità con cui un'osservazione può generare uno o l'altro valore della variabile dipendente.

3.1.1 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 evento sismico.

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 in figura 2.

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

Figura 2 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 *proxy* 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.

3.1.2 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-Nairuku, 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)
Lorca, Spain	11 May	2011	5.1	Points	166	0.6	Allfaro 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 3 Lista degli eventi sismici considerati e di quelli effettivamente selezionati (in grassetto) per la costruzione del modello (Nowicki et al. 2018)



Figura 4 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.

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

3.1.4 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.

3.1.5 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.

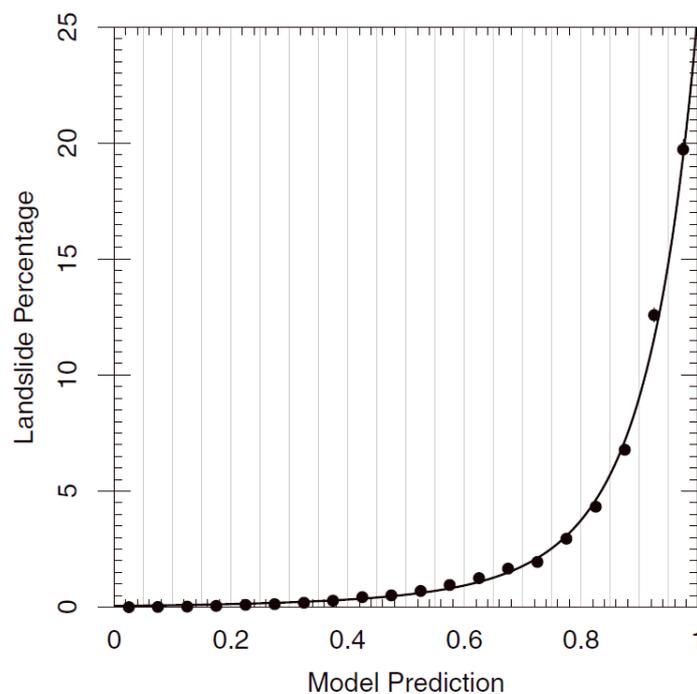


Figura 5 Relazione tra le predizioni del modello in termini di probabilità e percentuale di frana osservata (Nowicki et al. 2018)

3.1.6 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.

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 2 Lista dei parametri di input del modello e delle fonti

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):

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

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 e di *areal coverage*.

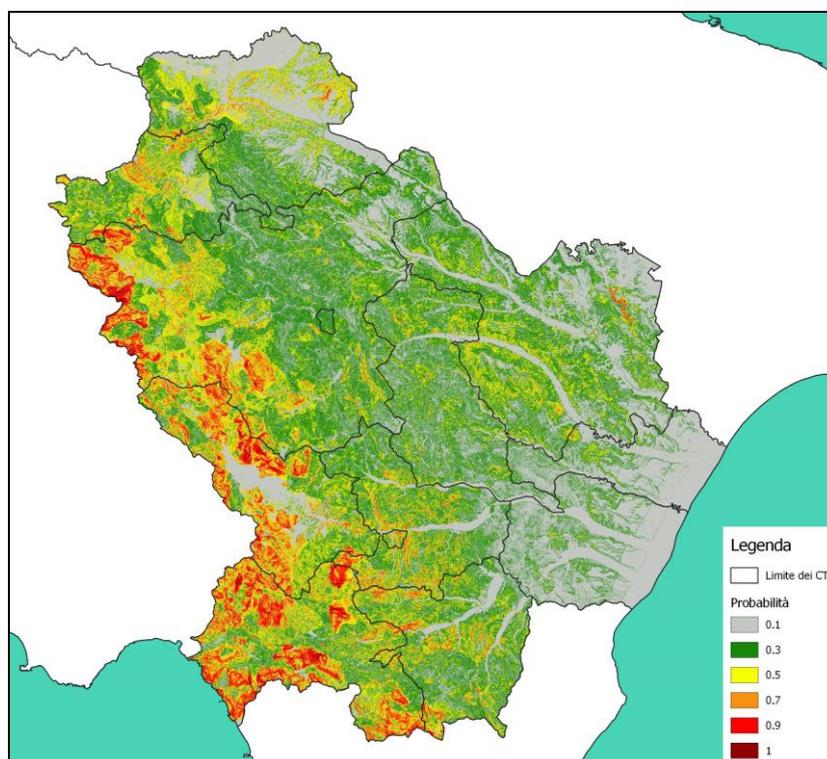


Figura 6 Mappa regionale delle probabilità di frana sismo-indotta

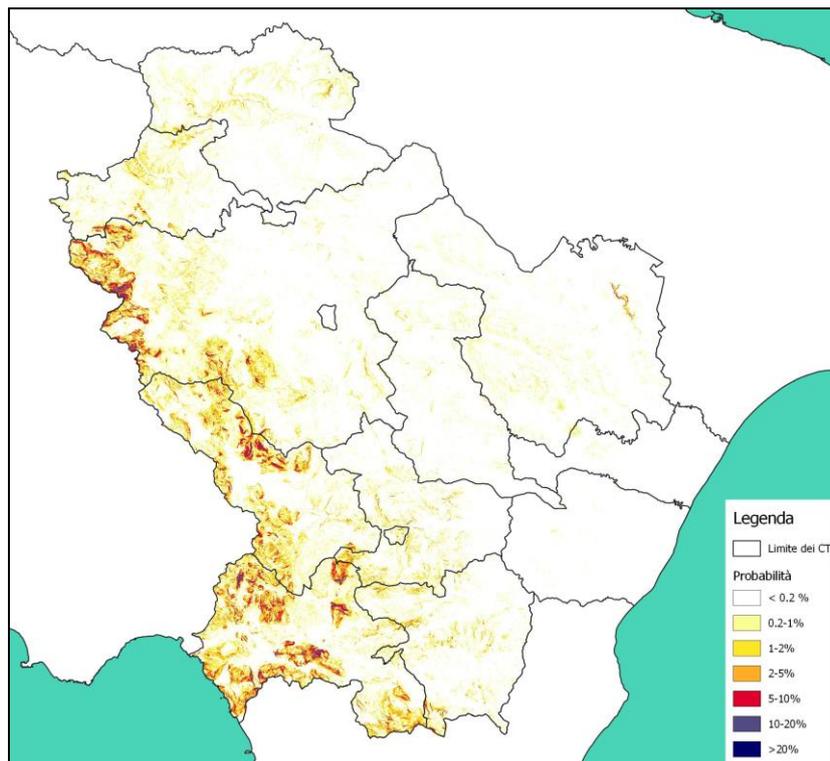


Figura 7 Mappa regionale delle probabilità di percentuale di area in frana sismo-indotta (areal coverage)

Validazione

La metodologia generale 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 risultati 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

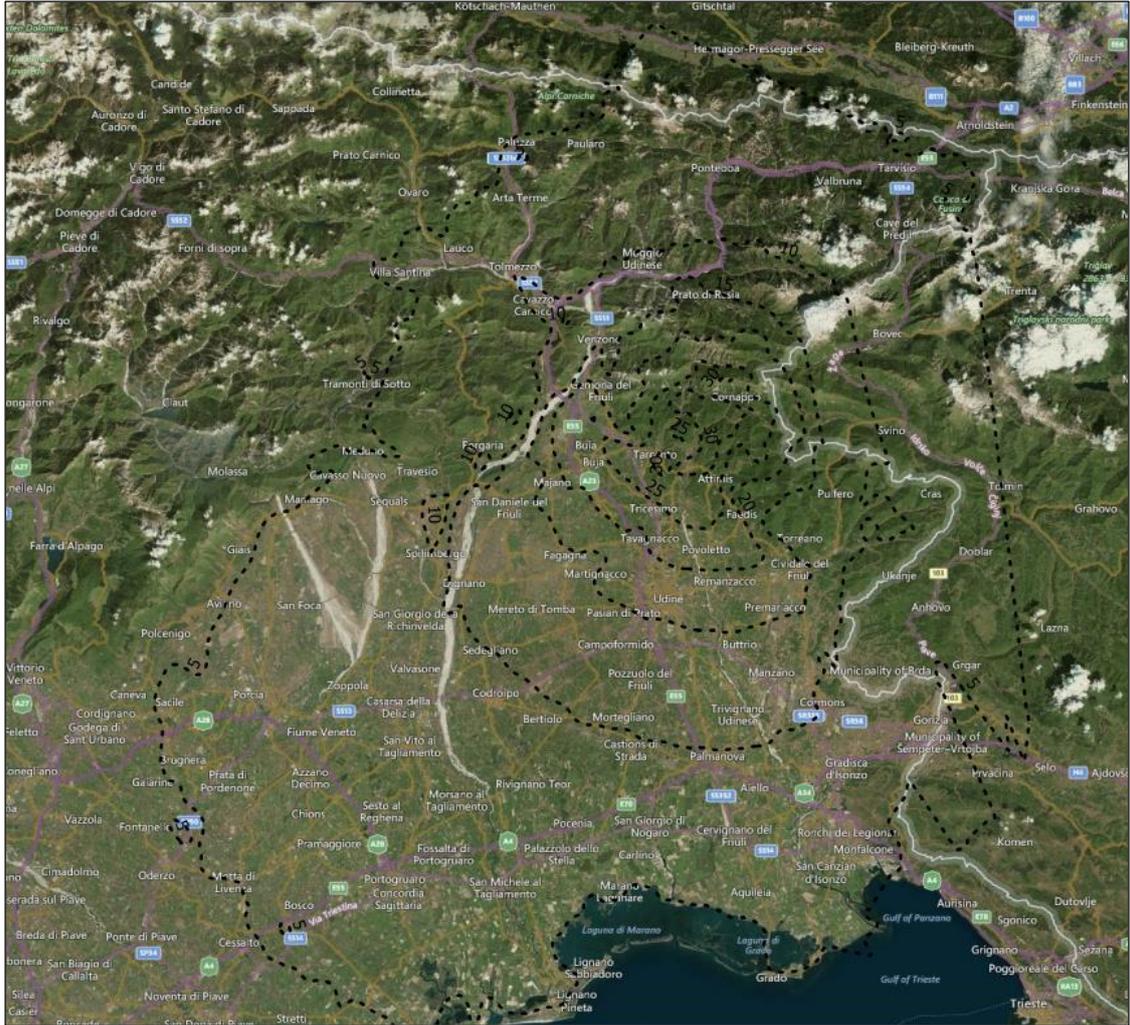


Figura 8 ShakeMap, in termini di PGV, dell'evento del Friuli 06-05-1976 calcolata attraverso la legge di attenuazione di Akkar et al (2013).

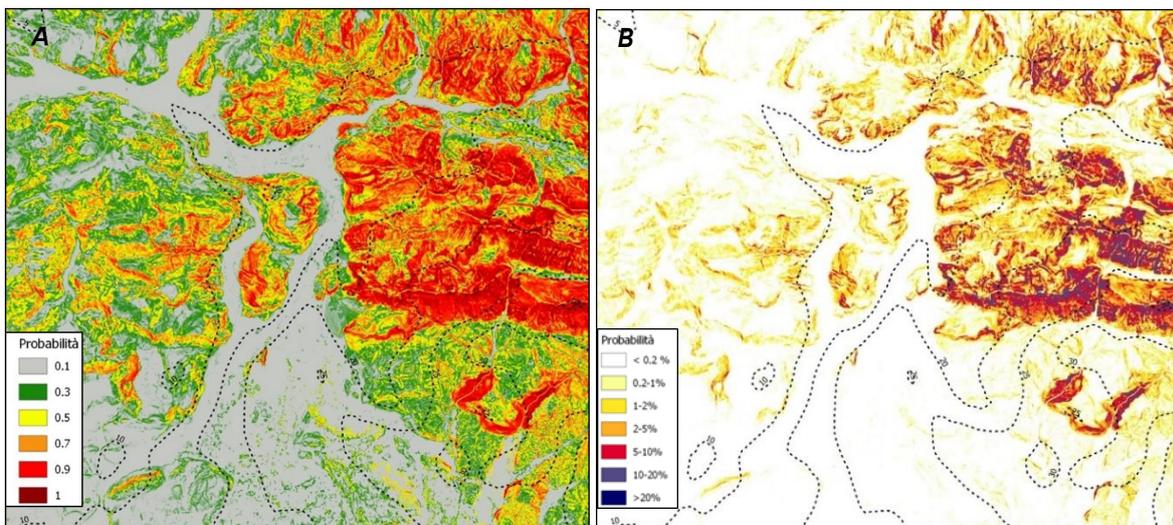


Figura 9 Mappa delle probabilità di frana sismoindotta (A) e di areal coverage (B) ricavate dall'applicazione del modello

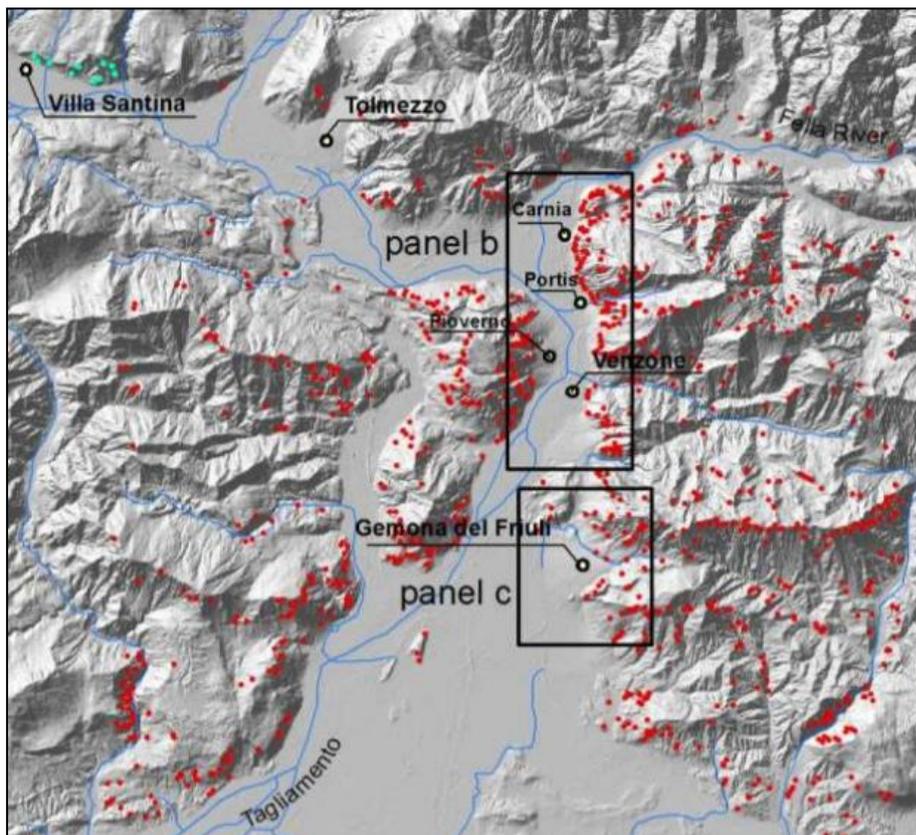


Figura 10 Distribuzione dei fenomeni di instabilità sismo-indotta (punti rossi) relativi all'evento del Friuli 06-05-1976, Valagussa et. al (2014)

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.

I risultati ottenuti attraverso l'applicazione di tale metodologia potrebbero essere notevolmente migliorati se la Regione disponesse di una cartografia più dettagliata relativa ai dati di input.

4 LIQUEFAZIONE

Metodologia

Il fenomeno della liquefazione in conseguenza ad un sisma può indurre danni strutturali ed infrastrutturali significativi a causa dei cedimenti 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 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) che prevede i seguenti passi:

4.1.1 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 *dataset*, vengono impiegati i record di 27 eventi sismici, relativi a diverse parti del globo, riassunti nella figura successiva.

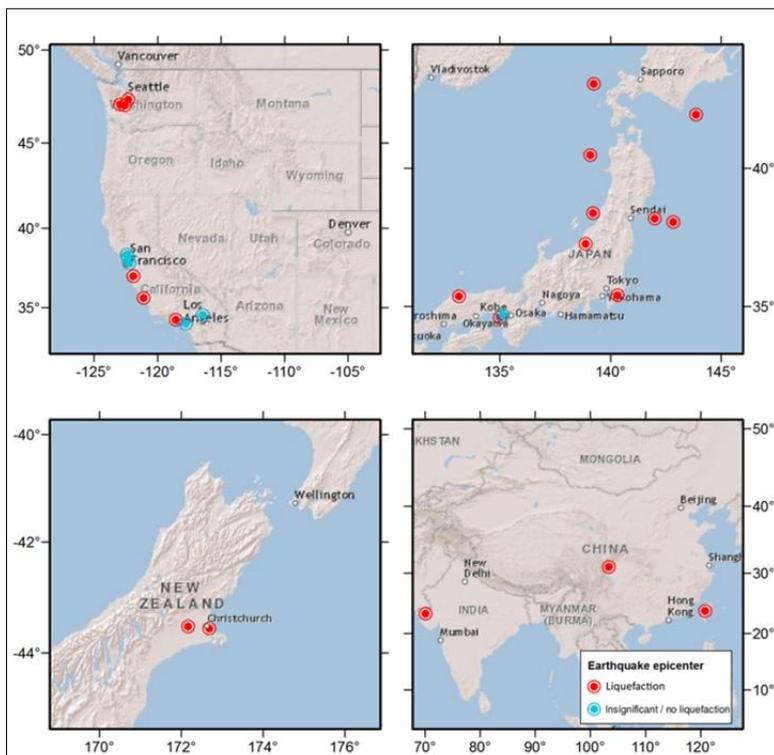


Figura 11 Mappa degli eventi sismici impiegati per il database (Zhu et al. 2017)

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.

4.1.2 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.

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 in modello:

- > $\ln(\text{PGV})$ - Peak Ground Velocity;
- > $\ln(V_{s,30})$ - 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.

4.1.3 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*.

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

4.1.5 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.

4.1.6 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:

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

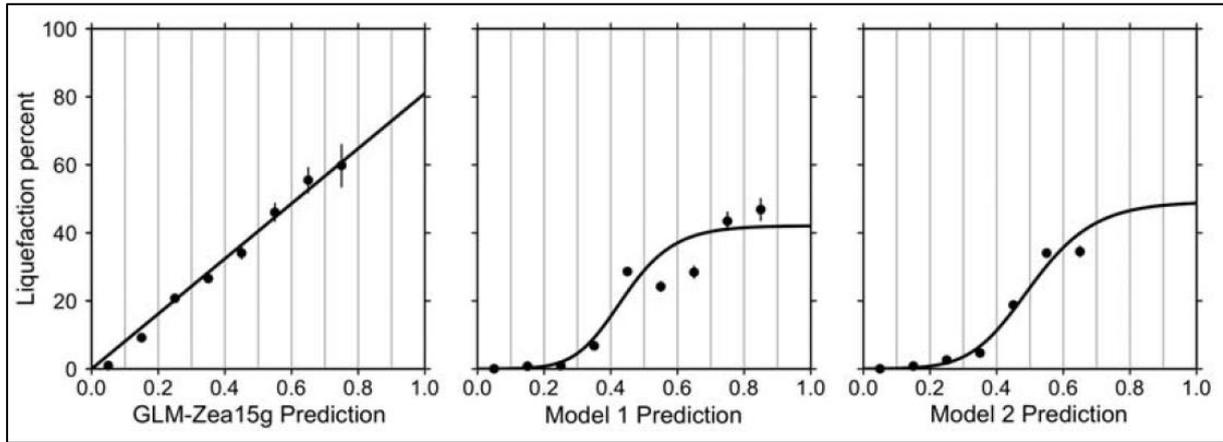


Figura 13 Relazione tra la probabilità di frana e la sua estensione percentuale

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)

In Zhu et. (2017) 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*.

4.1.7 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:

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

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):

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

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.

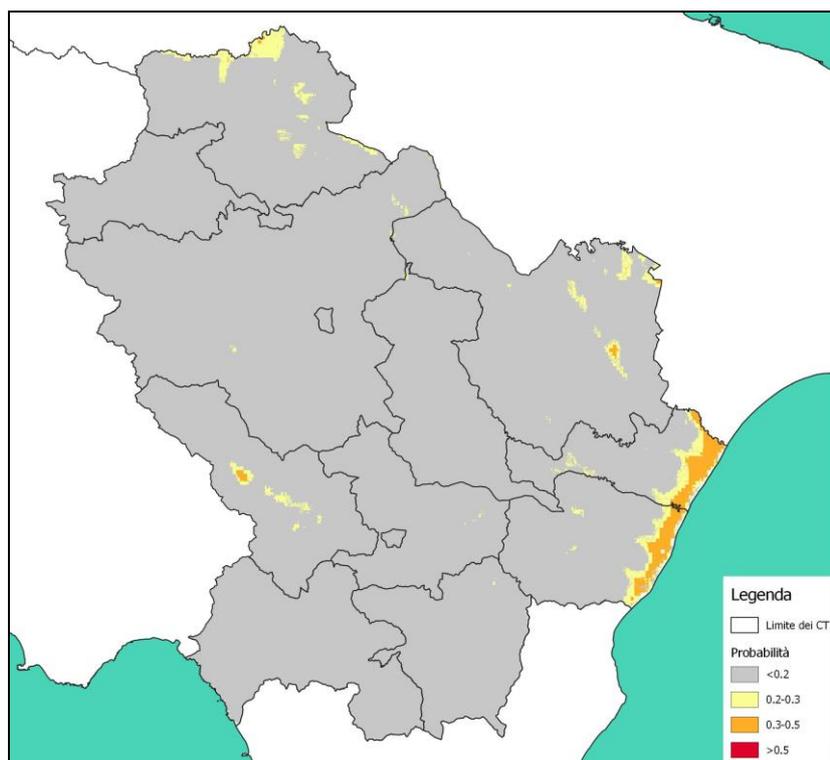


Figura 15 Mappa regionale delle probabilità di liquefazione

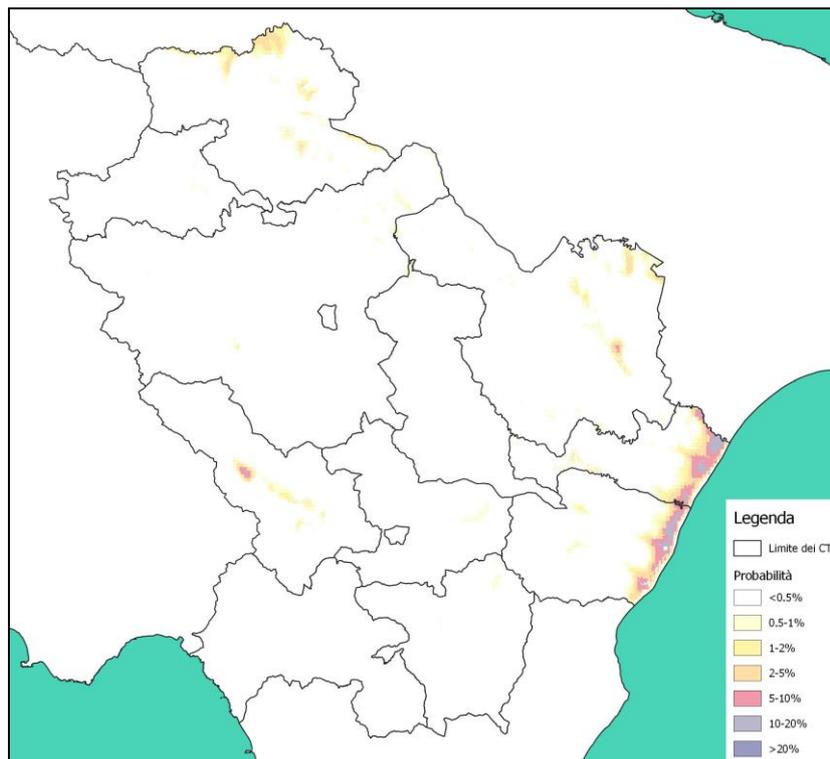


Figura 16 Mappa regionale delle probabilità di percentuale di area in liquefazione (areal coverage)

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 5 Eventi sismici per i quali la metodologia è stata applicata



Figura 17 ShakeMap, in termini di PGV, dell'evento della Marsica del 13-01-1915 calcolata attraverso la legge di attenuazione di Akkar et al (2013)

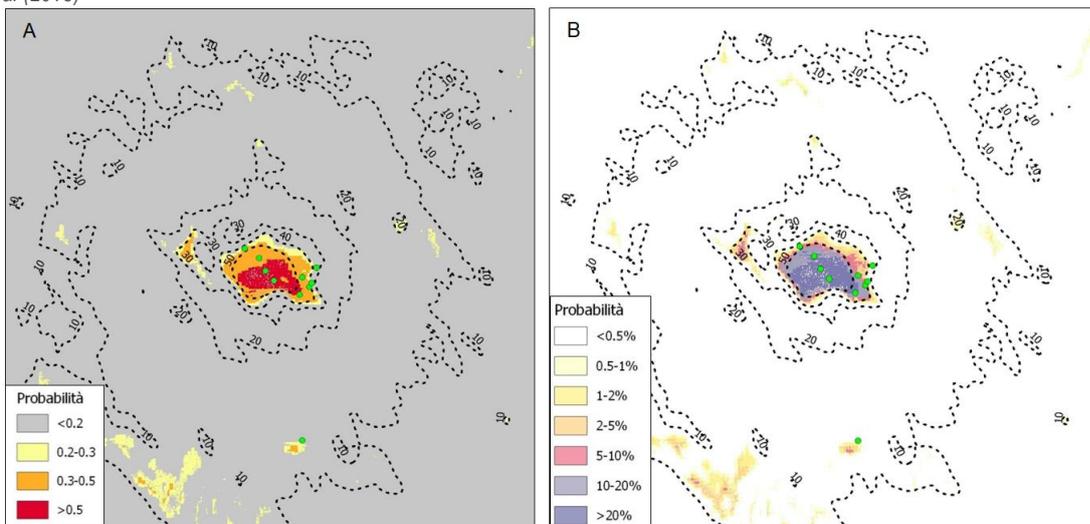


Figura 18 Mappa delle probabilità di liquefazione(A) e di areal coverage (B) ricavate dall'applicazione del modello, i punti in verde indicano i siti dove è stata rilevata la liquefazione a seguito dell'evento (Galli 2000).

Dalla sovrapposizione del catalogo di Galli (2000) (punti in verde in fig. 20) 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.

I risultati ottenuti attraverso l'applicazione di tale metodologia potrebbero essere notevolmente migliorati se la Regione disponesse di una cartografia più dettagliata relativa ai dati di input.

5 VULNERABILITÀ E DANNI CAUSATI DALLO SCUOTIMENTO SISMICO

Metodologia

Basi teoriche

La procedura delineata conduce alla determinazione di mappe di danno a scala di area vasta sulla base di dati di pericolosità sismica probabilistica (scuotimento) e di dati censuari “poveri” sull’edilizia residenziale. Il fine ultimo della metodologia è quello di produrre dati, per ciascuno dei CT, sulla popolazione coinvolta in crolli (edifici crollati) e popolazione senza tetto (edifici inagibili).

Le basi teoriche si basano sull’approccio macrosismico di Lagomarsino e Giovinazzi (2006) e validato con metodi meccanici. Precedenti calibrazioni e validazioni del metodo erano state effettuate dagli autori (Lagomarsino e Giovinazzi, 2011) sulla base di dati, desunti da terremoti reali, in termini di intensità macrosismica EMS-98, la scala 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 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 (EMS-98) considerata come una variabile continua.

Il danno strutturale e non strutturale sugli edifici è suddiviso in cinque gradi: 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:

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

con k da 0 a 5.

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

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

La distribuzione binomiale è stata impiegata poiché è adatta a descrivere statisticamente le distribuzioni di danno realmente osservate a seguito del terremoto dell'Irpinia del 1980.

E' possibile associare, ad una data tipologia edilizia, un valore convenzionale dell'indice di vulnerabilità (V). Infatti, seconda la 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.

	Type of Structure	Vulnerability Class					
		A	B	C	D	E	F
MASONRY	rubble stone, fieldstone	○					
	adobe (earth brick)	○	—				
	simple stone	—	○				
	massive stone			—	○	—	
	unreinforced, with manufactured stone units	—	○	—			
	unreinforced, with RC floors			—	○	—	
	reinforced or confined				—	○	—

○ most likely vulnerability class; — probable range,
--- range of less probable, exceptional cases

Figura 19 Classi di vulnerabilità secondo EMS98

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

Il fattore di duttilità (Q), per i fini di questa ricerca, può essere fissato pari ad un valore 2.3.

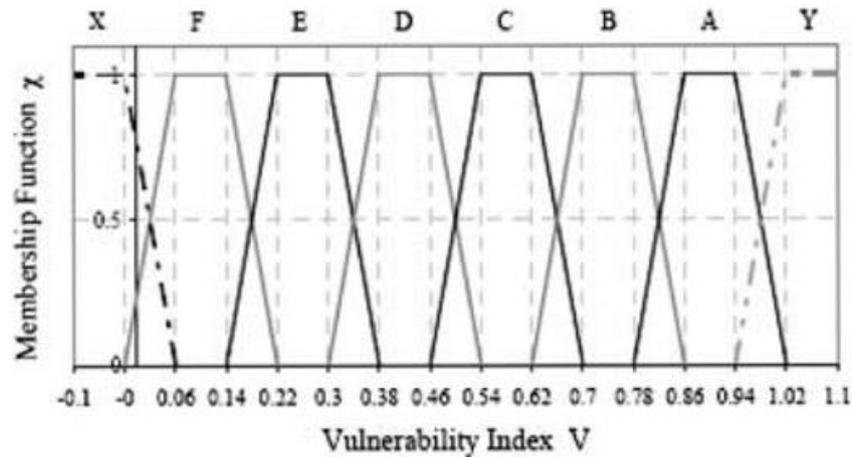


Figura 20 Funzione $\chi(V)$

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 6 Indice di vulnerabilità in base alla classe

Il legame tra i dati tipologici e la distribuzione del costruito in classi di vulnerabilità è calcolato secondo la procedura BINC (*Building Inventory at National scaled based on Census data*) il cui scopo è quello di individuare, fissato il CT, la distribuzione in termini di classi di vulnerabilità, in accordo con la scala macrosismica europea EMS-98, sulla base di soli dati censuari. L'approccio è descritto in Cacace et al. (2018) e si fonda su due database: ISTAT 2011, a scala nazionale, con informazioni di carattere aggregato, e PLINIVS, a scala regionale (circa 180.000 edifici di 800 Comuni italiani), in cui le informazioni sono a 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,
- 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 macrosismica 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):

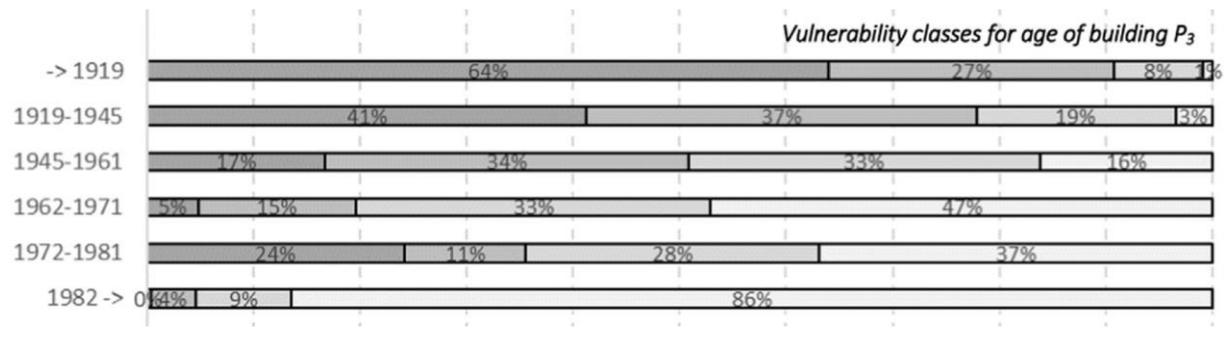


Figura 21 Classi di vulnerabilità del costruito per anno di costruzione (Cacace et al. 2018)

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 7 Classi di vulnerabilità del costruito per anno di costruzione (Cacace et al. 2018)

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 noto lo spettro di vulnerabilità del costruito del CT 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 $v_{m,A-D}$ 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 8 Modificatori di comportamento sullo stato di conservazione (Cacace et al. 2018)

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 probabilistiche.

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 (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 $V_{s,30}$.

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 $\ln(Y_{ref})$ attraverso una funzione di amplificazione non lineare $\ln(S)$.

Gli altri termini del modello sono la magnitudo momento M_w , 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
(r)										
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 22 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 (2015) per la quale sono stati impiegati dati provenienti da 91 terremoti dell'area Etna. Questa si differenzia in due casi: eventi superficiali ed eventi profondi, diversi in termini di contenuto in frequenza.

Per l'approccio probabilistico, invece, è possibile riferirsi a INGV (2009), 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 definita dalla legge Cauzzi-Faccioli (2006).

La relazione tra il danno e le perdite economiche può essere ricavato 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 23 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 9 Corrispondenza tra Stati Limite e Stati di Danno

La popolazione senza tetto è calcolata sulla base dell'entità della popolazione e degli edifici risultati inagibili tramite l'equazione:

$$\text{popolazione senza tetto} = \text{popolazione tot.} \cdot \text{edifici inagibili}[\%]$$

La percentuale di edifici inagibili può essere calcolata, in riferimento al progetto Syner-G (Deliverable D2.2–Definition of system components and the formulation of system functions to evaluate the performance of buildings and buildings aggregates, 2011) 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 24 Agibilità sulla base del danno (Progetto Syner-G)

Per quanto riguarda la popolazione coinvolta in crolli si ha:

$$\text{popolazione coinvolta in crolli} = \text{popolazione tot.} \cdot 0.3$$

Per descrivere l'impatto dell'evento sismico è possibile utilizzare il sistema P.A.G.E.R. – U.S.G.S. (*Prompt Assessment 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 25 Livelli di allerta del sistema P.A.G.E.R. (<https://earthquake.usgs.gov/data/pager/background.php>)

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.

Risultati delle elaborazioni

Di seguito vengono presentate con l'ausilio di mappe i risultati dell'applicazione della metodologia descritta. Le mappe si riferiscono alla Regione Basilicata.

Nella figura seguente è rappresentato il danno all'edilizia residenziale rispetto alla pericolosità sismica INGV in termini di PGA per un tempo di ritorno di 475 anni:

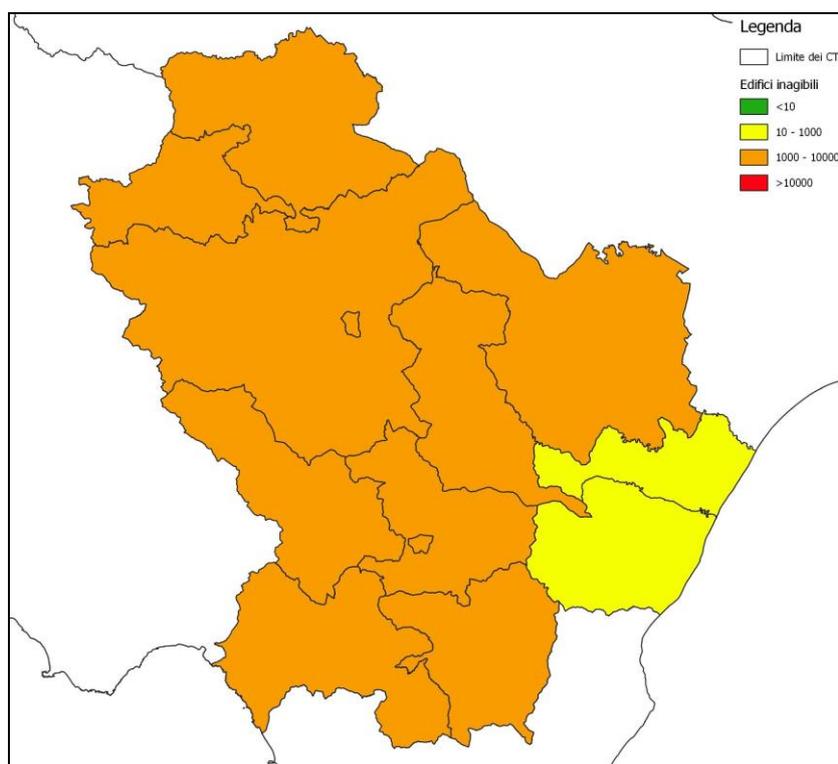


Figura 26 Mappa regionale di edifici inagibili

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

N°	Contesto Territoriale	Edifici inagibili
1	POTENZA	7283
2	LAURIA	4878
3	MARSICOVETERE	3992
4	MELFI	3821
5	MATERA	2253
6	RIONERO IN VULTURE	1990
7	SENISE	1614
8	SANT'ARCANGELO	1204

9	STIGLIANO	1087
10	PISTICCI	467
11	POLICORO	390

Tabella 10 Classifica regionale in base agli edifici inagibili

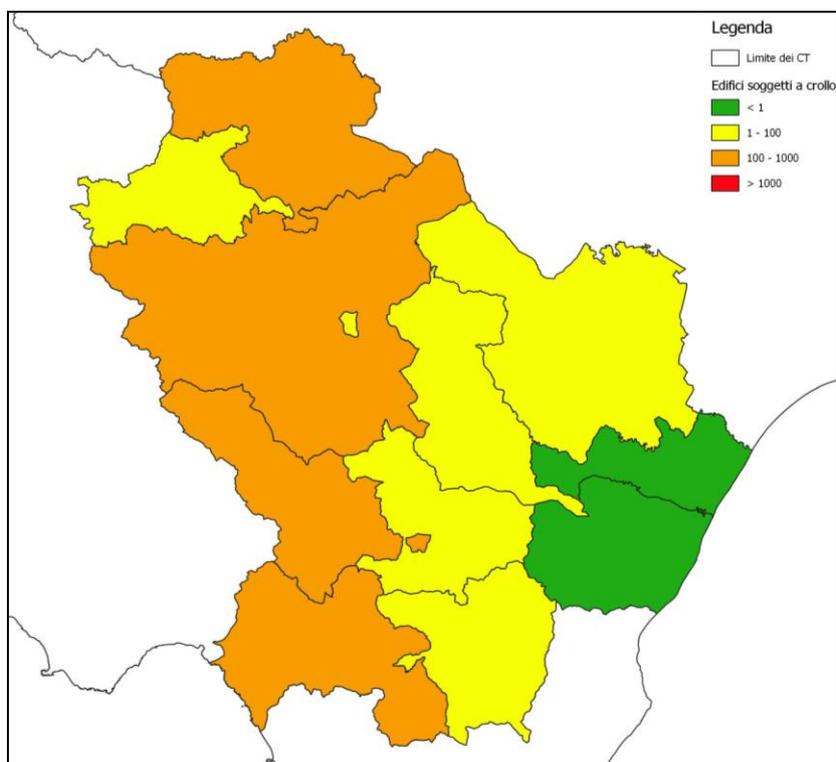


Figura 27 Mappa regionale degli edifici soggetti a crollo

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

N°	Contesto Territoriale	Edifici soggetti a crollo
1	LAURIA	363
2	MARSICOVETERE	248
3	POTENZA	219
4	MELFI	117
5	SENISE	61
6	RIONERO IN VULTURE	60
7	SANT'ARCANGELO	48
8	MATERA	31
9	STIGLIANO	7
10	PISTICCI	1
11	POLICORO	1

Tabella 11 Classifica regionale in base agli edifici soggetti a crollo

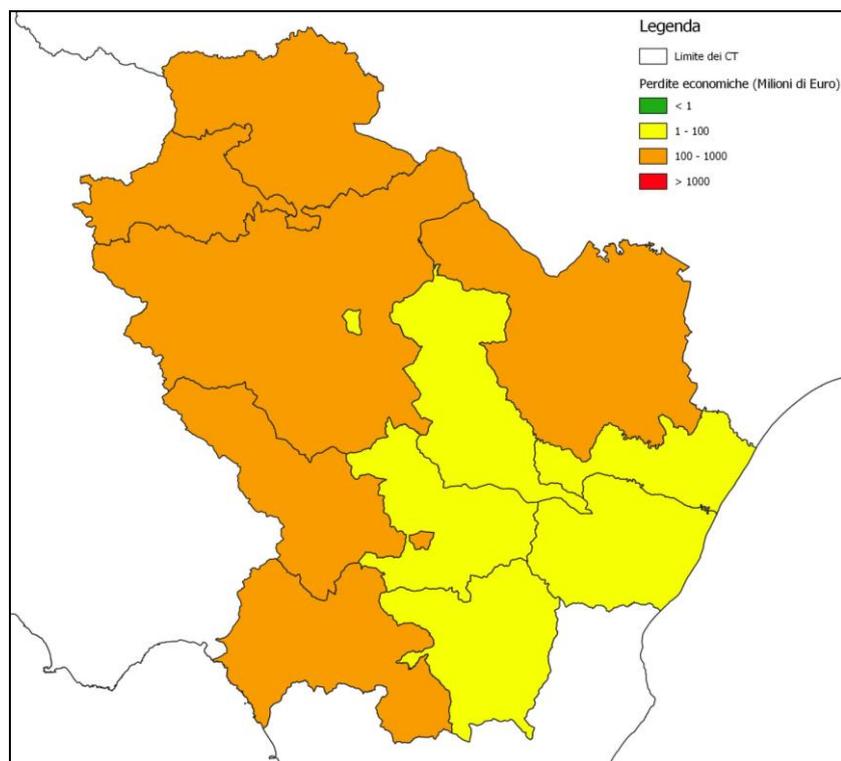


Figura 28 Mappa regionale delle perdite economiche in milioni di euro

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	POTENZA	792
2	MATERA	390
3	LAURIA	313
4	MELFI	298
5	MARSICOVETERE	234
6	RIONERO IN VULTURE	145
7	SENISE	97
8	STIGLIANO	78
9	POLICORO	71
10	SANT'ARCANGELO	69
11	PISTICCI	56

Tabella 12 Classifica regionale in base alle perdite economiche in milioni di euro

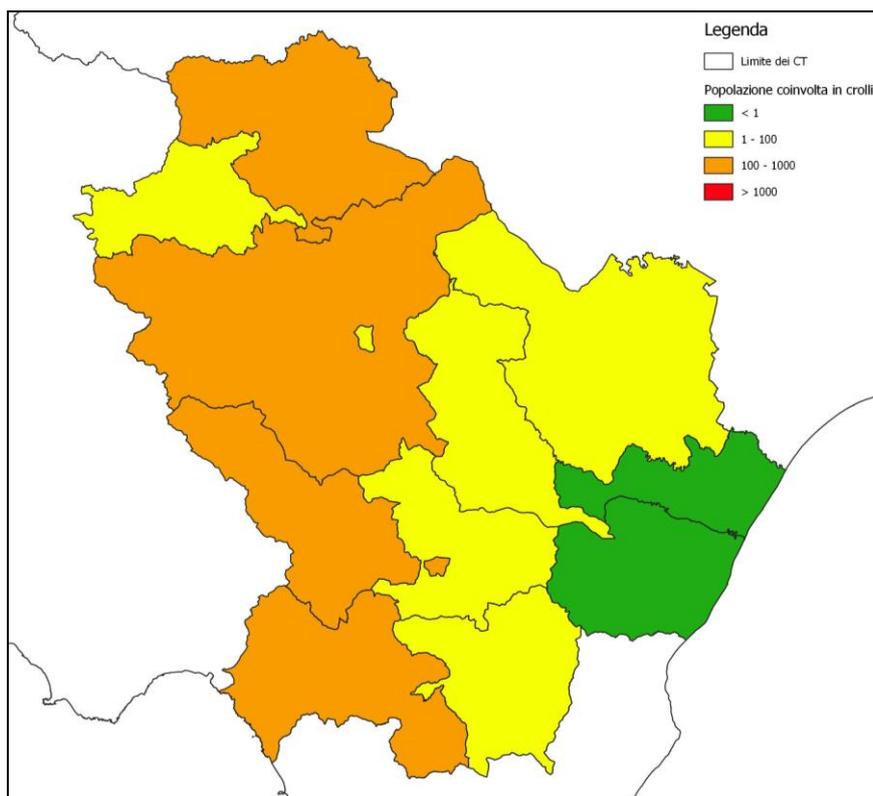


Figura 29 Mappa regionale della popolazione coinvolta in crolli

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

N°	Contesto Territoriale	Popolazione coinvolta in crolli
1	POTENZA	353
2	LAURIA	225
3	MARSICOVETERE	165
4	MELFI	126
5	MATERA	49
6	RIONERO IN VULTURE	37
7	SENISE	28
8	SANT'ARCANGELO	28
9	STIGLIANO	5
10	PISTICCI	1
11	POLICORO	0

Tabella 13 Classifica regionale in base alla popolazione coinvolta in crolli

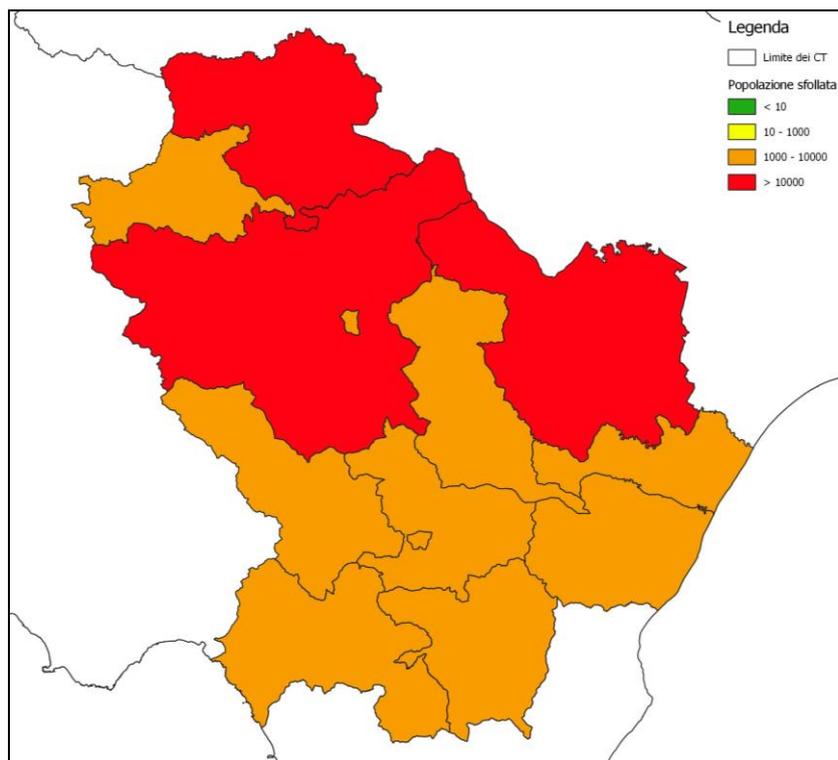


Figura 30 Mappa regionale della popolazione sfollata

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

N°	Contesto Territoriale	Popolazione sfollata
1	POTENZA	26623
2	MATERA	11776
3	MELFI	10659
4	LAURIA	9771
5	MARSICOVETERE	7360
6	RIONERO IN VULTURE	4669
7	SENISE	2845
8	STIGLIANO	2346
9	SANT'ARCANGELO	2166
10	POLICORO	1288
11	PISTICCI	1213

Tabella 14 Classifica regionale in base alla popolazione sfollata

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 macrosismica EMS-98 minima
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 15 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.

Questo sistema, infatti, consente di produrre un rapido giudizio dell'impatto di un evento sismico sulla popolazione colpita, al fine di informare al meglio gli organi governativi e di soccorso.

5.1.1 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	9
		Valore Med.	85	0	88	0	228	13
		Valore Max.	173	0	182	0	516	19

Tabella modificata nel testo consegnato

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

5.1.2 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

Livello di allerta e colore P.A.G.E.R. (USGS 2010)	Scala allerta	Popolazione coinvolta in crolli	Perdite economiche
	Locale	0.00	< 1 mln
	Locale/Regionale	36161.00	1-100 mln
	Nazionale	100-999	100-1000 mln
	Internazionale	>1000	>1000 mln

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

5.1.3 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

Livello di allerta e colore P.A.G.E.R. (USGS 2010)	Scala allerta	Popolazione coinvolta in crolli	Perdite economiche
	Locale	0.00	< 1 mln
	Locale/Regionale	36161.00	1-100 mln
	Nazionale	100-999	100-1000 mln
	Internazionale	>1000	>1000 mln

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.

5.1.4 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

Livello di allerta e colore P.A.G.E.R. (USGS 2010)	Scala allerta	Popolazione coinvolta in crolli	Perdite economiche
	Locale	0.00	< 1 mln
	Locale/Regionale	36161.00	1-100 mln
	Nazionale	100-999	100-1000 mln
	Internazionale	>1000	>1000 mln

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

5.1.5 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

Livello di allerta e colore P.A.G.E.R. (USGS 2010)	Scala allerta	Popolazione coinvolta in crolli	Perdite economiche
	Locale	0.00	< 1 mln
	Locale/Regionale	36161.00	1-100 mln
	Nazionale	100-999	100-1000 mln
	Internazionale	>1000	>1000 mln

Il dato ufficiale **fonte** è di 6000 sfollati e 1767 abitazioni inagibili.

5.1.6 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

Livello di allerta e colore P.A.G.E.R. (USGS 2010)	Scala allerta	Popolazione coinvolta in crolli	Perdite economiche
	Locale	0.00	< 1 mln
	Locale/Regionale	36161.00	1-100 mln
	Nazionale	100-999	100-1000 mln
	Internazionale	>1000	>1000 mln

Il dato ufficiale **fonte** è di 80 abitazioni crollate oltre a 11 vittime e 100 feriti.

5.1.7 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

Livello di allerta e colore P.A.G.E.R. (USGS 2010)	Scala allerta	Popolazione coinvolta in crolli	Perdite economiche
	Locale	0.00	< 1 mln
	Locale/Regionale	36161.00	1-100 mln
	Nazionale	100-999	100-1000 mln
	Internazionale	>1000	>1000 mln

Il dato ufficiale **fonte** è di 305 vittime e 38000 sfollati.

5.1.8 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

Livello di allerta e colore P.A.G.E.R. (USGS 2010)	Scala allerta	Popolazione coinvolta in crolli	Perdite economiche
	Locale	0.00	< 1 mln
	Locale/Regionale	36161.00	1-100 mln
	Nazionale	100-999	100-1000 mln
	Internazionale	>1000	>1000 mln

Il dato ufficiale **fonte** 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.

6 VULNERABILITÀ E DANNI CAUSATI DAGLI EFFETTI COSISMICI

Di seguito verranno illustrate le metodologie utilizzate per la stima dei danni causati dagli effetti cosismici (frane e liquefazione) e le relative perdite economiche.

Stima dei danni potenziali all'edilizia e della popolazione coinvolta

La stima dei danni dovuti agli effetti cosismici verrà effettuata partendo proprio dai *raster* delle frane sismo-indotte e della liquefazione ottenuti secondo i modelli di Nowicki et al. (2018) e Zhu et al. (2017).

6.1.1 Stima della superficie esposta

Essendo nota la dimensione della cella dei *raster* e quindi la sua superficie ed il valore di percentuale di area in frana (*areal coverage*) associato a ciascuna cella si può determinare la superficie totale esposta al rischio tramite la seguente relazione (da <https://earthquake.usgs.gov/data/ground-failure/background.php>):

$$H_{tot} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{i,j} A_{i,j} \text{ for } gm_{i,j} \geq gm_{thresh} \text{ and } P_{i,j} \geq P_{thresh}$$

dove H_{tot} è la superficie totale esposta al rischio, $P_{i,j}$ è la probabilità di frana o liquefazione (in termini di *areal coverage*) nella cella i, j , $A_{i,j}$ è l'area della cella i, j (in km^2), m è il numero di righe, n è il numero di colonne, $gm_{i,j}$ è il parametro di scuotimento del suolo (accelerazione di picco del suolo o velocità di picco del suolo) nella cella di griglia i, j , gm_{thresh} è la soglia di movimento del suolo (fissata a $0.1g$) e P_{thresh} è la soglia di probabilità in termini di *areal coverage* (fissata a 0.005).

La suddetta relazione fornisce la stima della superficie totale interessata dal fenomeno. Tuttavia, i modelli sono conservativi, quindi queste aree sono spesso sovrastimate, di conseguenza H_{tot} funge più da *proxy*.

Conoscendo la superficie per ogni sezione censuaria esposta al rischio il numero di edifici in essa presenti e la sua superficie totale, si è potuta effettuare una stima del numero di edifici potenzialmente coinvolti in fenomeni cosismici.

6.1.2 Stima della potenziale popolazione esposta

La stima della popolazione esposta al rischio è stata calcolata a partire dalla probabilità media di occorrenza di instabilità cosismica relativa all'intera sezione censuaria, in termini di percentuale di area instabile (*areal coverage*). Quest'ultima è stata moltiplicata per la popolazione della sezione stessa ottenendo una stima della popolazione potenzialmente coinvolta in fenomeni cosismici.

Valutazione del potenziale danno alle infrastrutture stradali

Il grafo stradale derivato dalla selezione della rete basata sulla classe funzionale dell'infrastruttura (FRC da 0 a 4) verrà suddiviso in segmenti di 50m di lunghezza.

A ciascun segmento sarà associato il valore di probabilità di percentuale di area in frana o liquefazione che moltiplicato per la lunghezza del segmento fornisce la lunghezza del tratto interessato da fenomeni cosismici.

La suddivisione in segmenti risulta essere anche utile per visualizzare, in modo intuitivo, la probabilità di occorrenza di frana sismo-indotta e liquefazione di ogni singolo tratto (fig. 32).

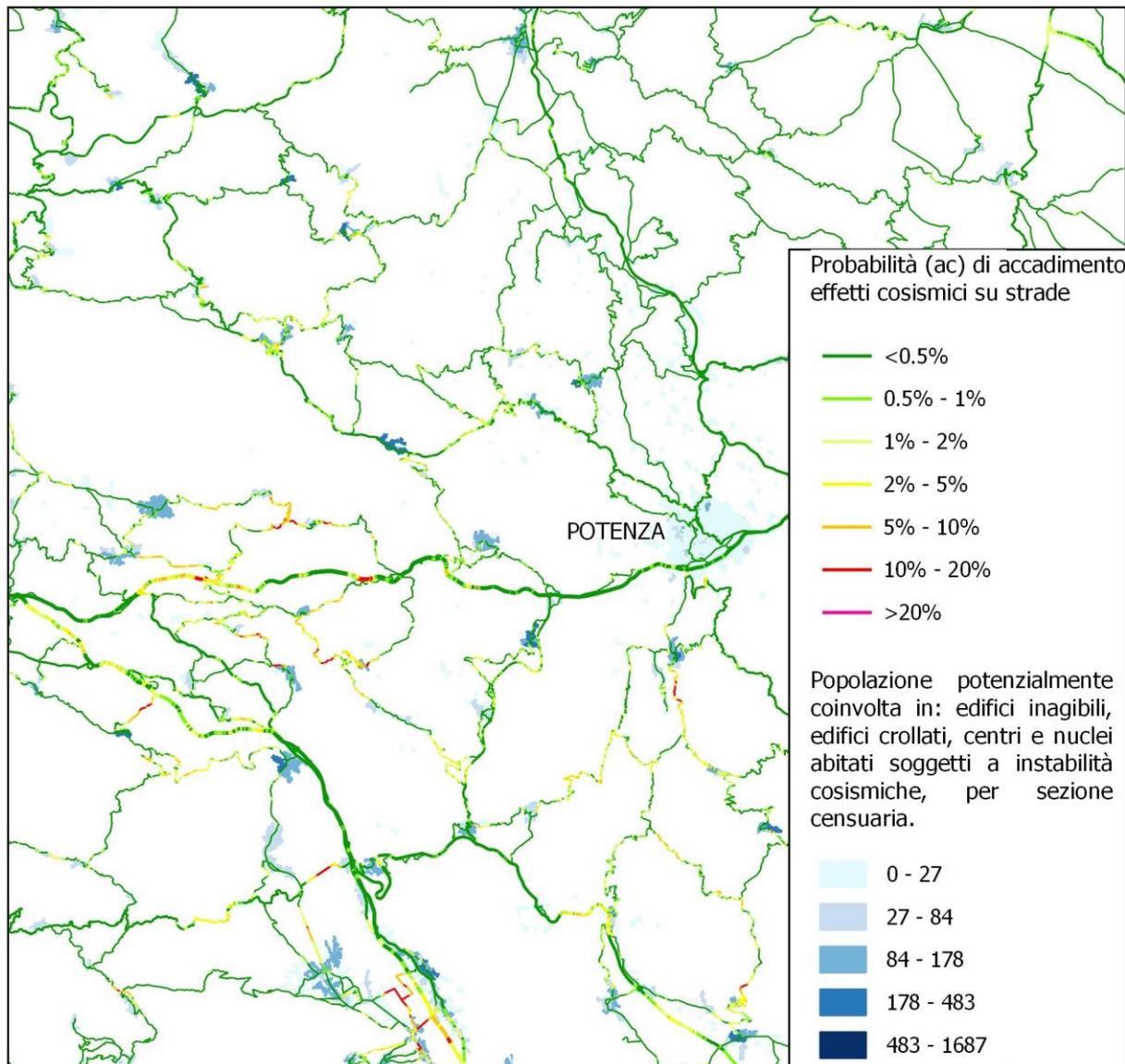


Figura 31 Probabilità di accadimento (in termini di areal coverage) di frana sismo-indotta e liquefazione delle infrastrutture stradali (FRC da 0 a 4), elementi lineari dal verde al fuxia. In toni di blu è rappresentata la popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche, per sezione censuarie ISTAT 2011 (nuclei e centri urbani, tipo_loc 1 e 2).

6.1.3 Stima delle potenziali perdite economiche

La valutazione delle perdite economiche avviene tramite un valore medio in euro al metro lineare estrapolato dal sito ANAS dedicato all'emergenza sisma 2016 (http://www.anas-sisma2016.it/index.php?/content/index/arg/menu_programma). Il valore finale della perdita economica è determinato dalla moltiplicazione dei km di infrastrutture soggette a fenomeni cosismici moltiplicati per una costante (3.000 euro/m). La graduatoria è sostanzialmente stabilita in base alla quantificazione delle infrastrutture soggette a fenomeni cosismici

7 RISULTATI AGGREGATI PER POPOLAZIONE E RELATIVE PERDITE ECONOMICHE

I risultati dei calcoli sulle sezioni censuarie, descritti nei capitoli precedenti, vengono aggregati per contesto territoriale ed ordinati in modo decrescente per popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche.

Oltre all'informazione sulla potenziale popolazione coinvolta nelle tabelle sono riportate le potenziali perdite economiche (in milioni di euro) dovute a scuotimento sismico e per instabilità cosismica (danni edifici scuotimento e infrastrutture instabilità).

Per una più efficace lettura dei risultati i CT vengono raggruppati in base a classi di esposizione di popolazione così definite (nelle mappe si utilizza una gradazione di colore dei toni del verde, da verde chiaro a verde scuro):

Classe A: Popolazione CT < 33.000 (verde chiaro)

Classe B: 33.000 < Popolazione CT < 62.000

Classe C: 62.000 < Popolazione CT < 126.000

Classe D: 126.000 < Popolazione CT < 500.000

Classe E: 500.000 < Popolazione CT < 2.500.000

Classe F: Popolazione CT > 2.500.000 (In questa classe è inserito il solo CT di Roma; verde scuro)

Viene inoltre fornita una tabella comprendente tutti i CT della Regione che mostra la graduatoria complessiva.

Il risultato di tale aggregazione sono delle mappe rappresentanti una graduatoria regionale per ciascuna classe di popolazione esposta.

Classificazione dei Contesti Territoriali in classi di esposizione per popolazione.

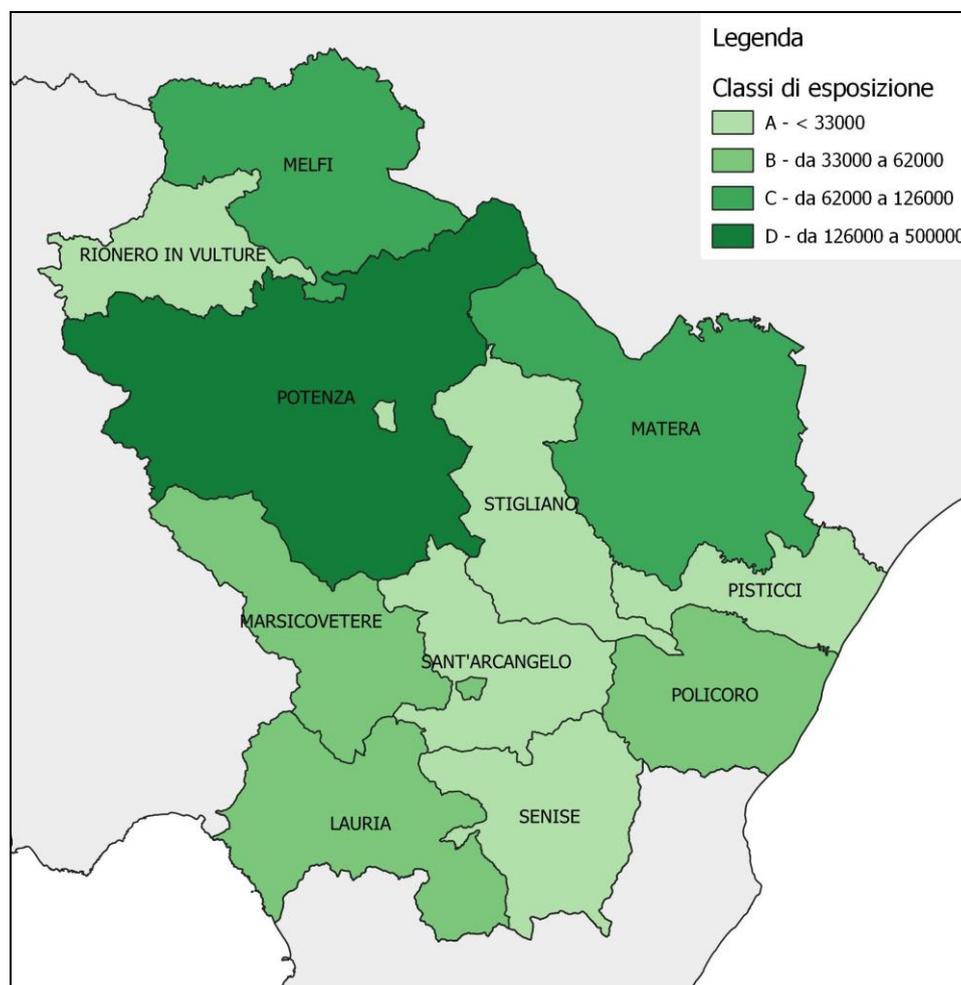


Figura 32 Classificazione dei CT in base alle classi di esposizione per popolazione

Graduatoria	CT	Popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche	Potenziali perdite economiche [Milioni di euro] (danni edifici e infrastrutture varie)	Classe di esposizione
1	POTENZA	27295	792	D
2	MATERA	11875	390	C
3	MELFI	10838	298	C
4	LAURIA	10187	313	B
5	MARSICOVETERE	7674	234	B
6	RIONERO IN VULTURE	4736	145	A
7	SENISE	2889	97	A
8	STIGLIANO	2363	78	A
9	SANT'ARCANGELO	2222	69	A
10	POLICORO	1486	71	B
11	PISTICCI	1252	56	A

Tabella 16 Graduatoria in base alla popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche

7.1.1 Classe A di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica

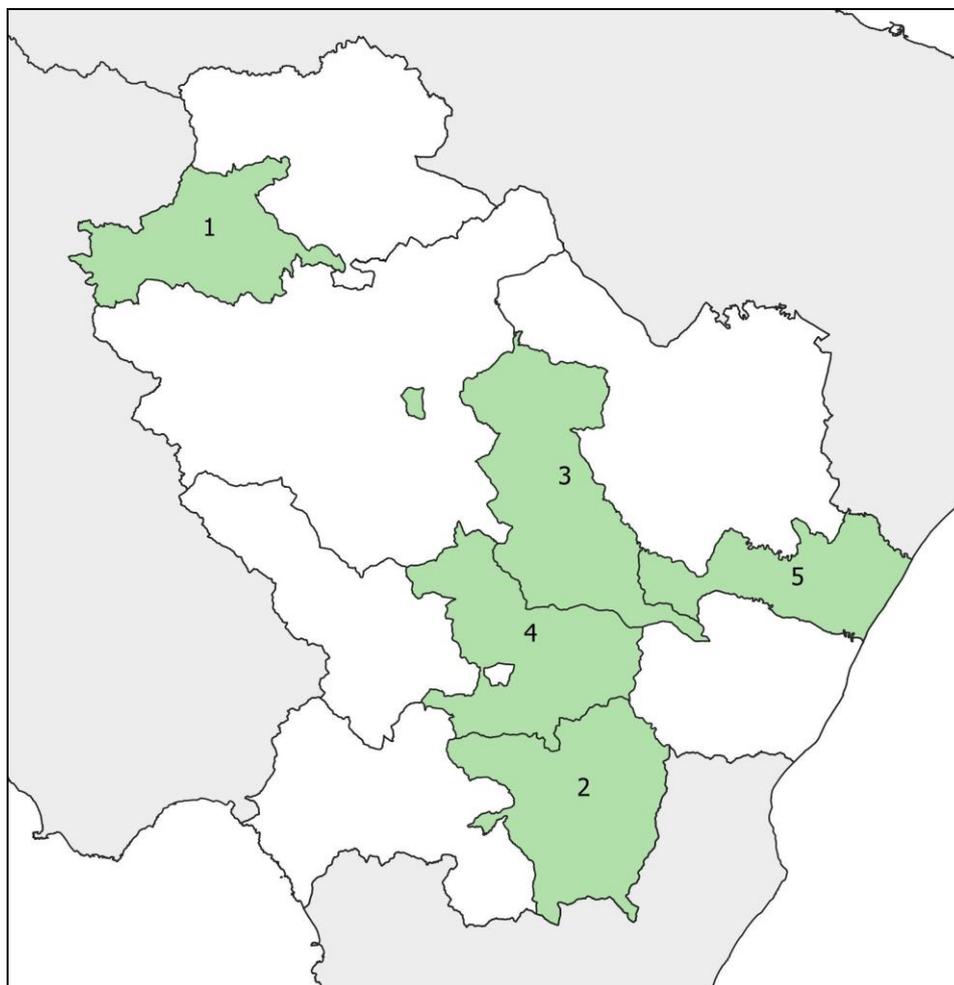


Figura 33 Mappa delle potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica relative alla classe A di esposizione

Graduatoria classe di esposizione	CT	Popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche	Potenziali perdite economiche [Milioni di euro] dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica (danni edifici scuotimento e infrastrutture instabilità)
1	RIONERO IN VULTURE	4736	145
2	SENISE	2889	97
3	STIGLIANO	2363	78
4	SANTARCANGELO	2222	69
5	PISTICCI	1252	56

Tabella 17 Graduatoria delle perdite, ordinate in modo decrescente, per popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche relative alla classe A di esposizione

7.1.2 Classe B di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica

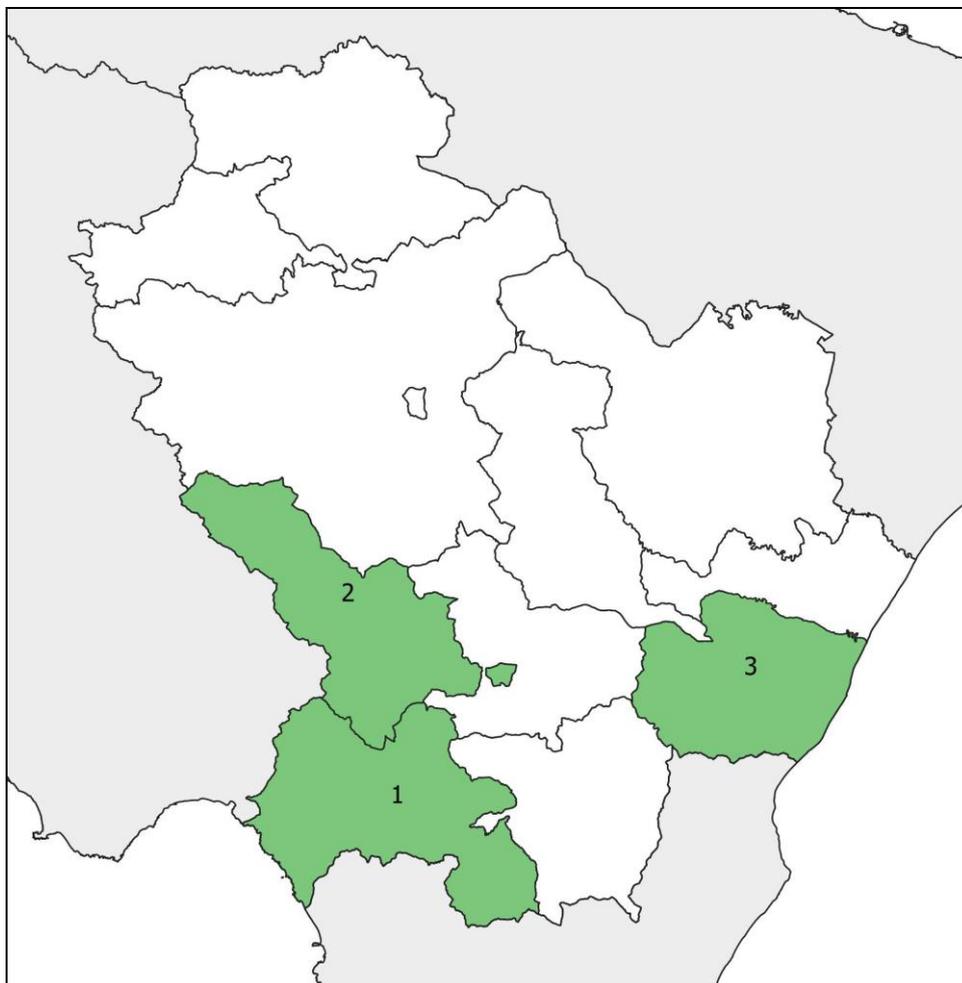


Figura 34 Mappa delle potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica relative alla classe B di esposizione

Graduatoria classe di esposizione	CT	Popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche	Potenziali perdite economiche [Milioni di euro] dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica (danni edifici scuotimento e infrastrutture instabilità)
1	LAURIA	10187	313
2	MARSICOVETERE	7674	234
3	POLICORO	1486	71

Tabella 18 Graduatoria delle perdite, ordinate in modo decrescente, per popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche relative alla classe B di esposizione

7.1.3 Classe C di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica

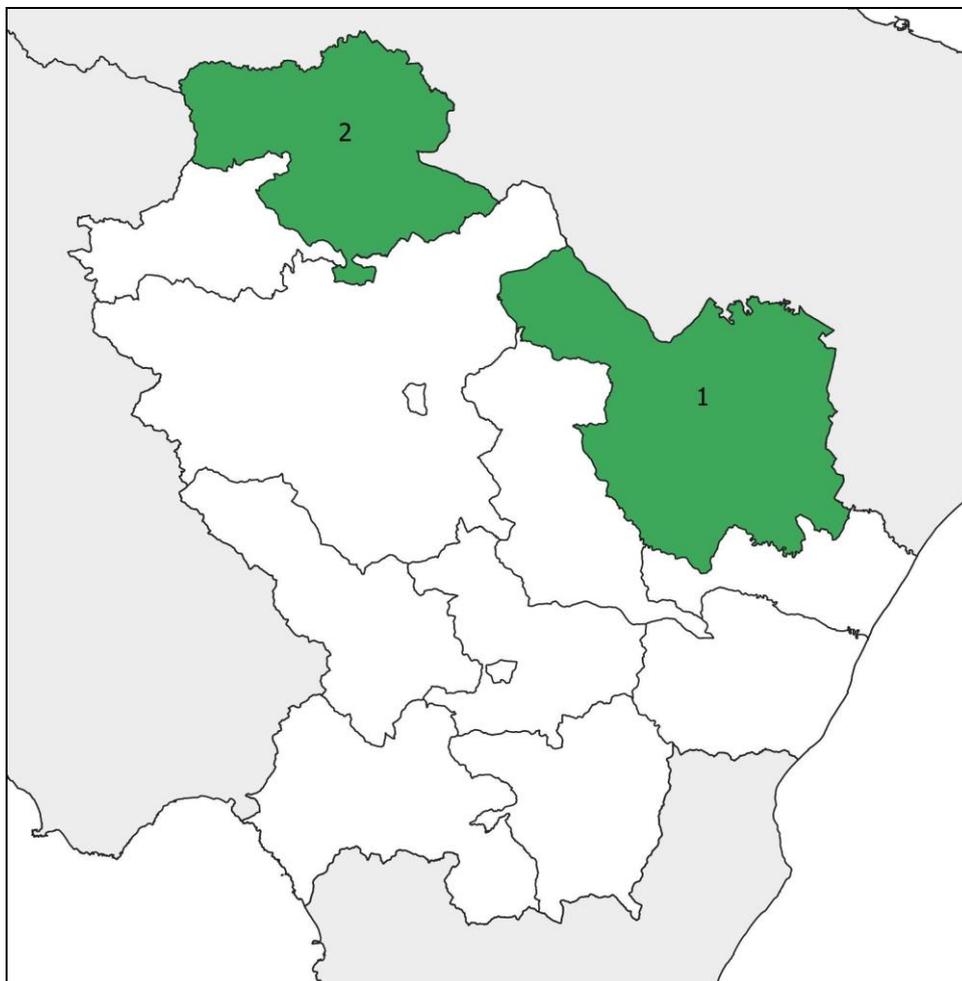


Figura 35 Mappa delle potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica relative alla classe C di esposizione

Graduatori a classe di esposizione	CT	Popolazione potenzialmente e coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche	Potenziali perdite economiche [Milioni di euro] dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica (danni edifici scuotimento e infrastrutture instabilità)
1	MATERA	11875	390
2	MELFI	10838	298

Tabella 19 Graduatoria delle perdite, ordinate in modo decrescente, per popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche relative alla classe C di esposizione

7.1.4 Classe D di esposizione - Potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica

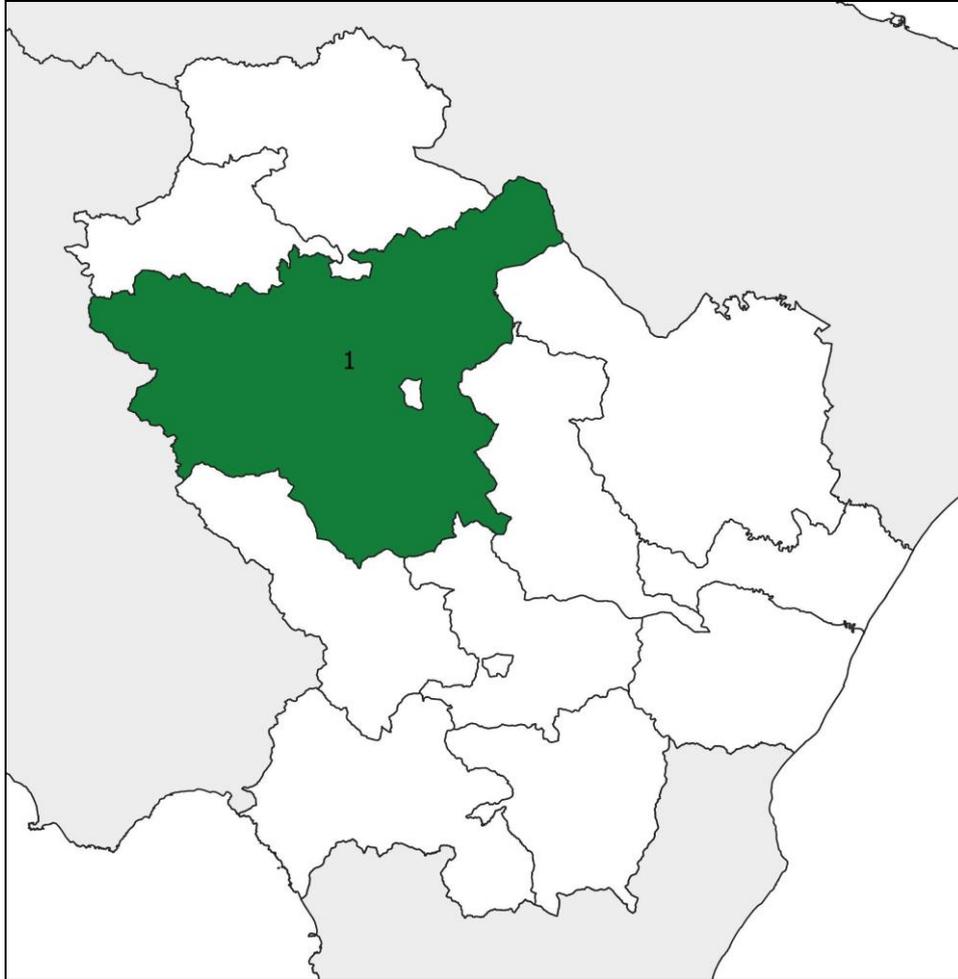


Figura 36 Mappa delle potenziali perdite dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica relative alla classe D di esposizione

Graduatoria classe di esposizione	CT	Popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche	Potenziali perdite economiche [Milioni di euro] dovute a scuotimento sismico e instabilità cosismica (danni edifici scuotimento e infrastrutture instabilità)
1	POTENZA	27295	792

Tabella 20 Graduatoria delle perdite, ordinate in modo decrescente, per popolazione potenzialmente coinvolta in: edifici inagibili, edifici crollati, centri e nuclei abitati soggetti a instabilità cosismiche relative alla classe A di esposizione

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 of 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 (2015)

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/eqe.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

Allen, T. I., and Wald, D. J., 2009, On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (V_{s30}), Bulletin of the Seismological Society of America, 99, no. 2A, 935-943.

SYNER-G: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain. <http://www.vce.at/SYNER-G>