



Mappe di rischio sismico per il territorio italiano

Mauro Dolce^a, Barbara Borzi^b, Francesca da Porto^c, Marta Faravelli^b, Sergio Lagomarsino^d, Guido Magenes^e, Claudio Moroni^a, Andrea Penna^e, Andrea Prota^f, Elena Speranza^a, Giulio Zuccaro^f, Gerardo Mario Verderame^f

^a Dipartimento della Protezione Civile, Via Ulpiano 11, 00193 Roma, Italy

^b Eucentre, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Via Ferrata 1, 27100 Pavia, Italy

^c ReLUIS, Università di Padova, Via Francesco Marzolo 9, 35121 Padova, Italy

^d ReLUIS, Università di Genova, Via Montallegro 1, 16145 Genova, Italy

^e ReLUIS, Università di Pavia, Via Ferrata 3, 27100 Pavia, Italy

^f ReLUIS, Università degli Studi Federico II di Napoli, Via Claudio 21, 80125 Napoli, Italy

Keywords: Rischio Sismico; Esposizione; Vulnerabilità; Fragilità

ABSTRACT

Scopo del “Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030” è fornire le linee guida per la gestione delle catastrofi multi-rischio al fine di ridurre sostanzialmente le perdite di vite umane, dei mezzi di sussistenza, nonché economiche, dei beni sociali, culturali e ambientali legati a persone, imprese, comunità e paesi. Con questo obiettivo, nel 2018 il Dipartimento della Protezione Civile italiano (DPC) ha prodotto un documento che illustra la valutazione dei rischi per l'intero territorio nazionale, e le relative elaborazioni, condotte con il sostanziale contributo della comunità scientifica. Per il rischio sismico, è stata sviluppata l'analisi del rischio del patrimonio edilizio residenziale con il coinvolgimento della comunità scientifica italiana attiva nel settore. Assumendo il modello della pericolosità sismica del territorio nazionale prodotto da INGV nel 2004, EUCENTRE (Centro europeo per la formazione e la ricerca nell'ingegneria sismica) e ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica) hanno lavorato e collaborato per mettere a punto diversi modelli di vulnerabilità/esposizione validi per gli edifici residenziali e valutare il relativo rischio sismico. Per effettuare le elaborazioni e poter confrontare facilmente i risultati ottenuti con i diversi approcci scientifici adottati dalle unità di ricerca coinvolte, EUCENTRE, su incarico del DPC, ha realizzato la piattaforma IRMA (Italian Risk MAs), che permette di caricare diversi modelli di vulnerabilità/esposizione, effettuare separatamente le elaborazioni del rischio, confrontare e combinare i risultati ottenuti. La collaborazione tra EUCENTRE e ReLUIS, con il coordinamento del DPC, ha portato nel dicembre 2018 alla produzione delle mappe di rischio sismico per il territorio italiano pubblicate nel documento National Risk Assessment (NRA) di valutazione del rischio nazionale.

1 INTRODUZIONE

La prima delle quattro azioni prioritarie identificate dal “Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030” è comprendere il rischio disastri in tutte le dimensioni che lo caratterizzano, ovvero vulnerabilità, esposizione, hazard e capacità. Tale conoscenza è propedeutica a qualunque azione successiva in termini di prevenzione, mitigazione, preparazione e risposta.

L'Italia, anche attraverso l'azione del Dipartimento della Protezione Civile (DPC), ha da tempo riconosciuto il fondamentale ruolo

svolto dalla conoscenza degli scenari di rischio, tanto da inquadrare quest'ultima tra le azioni di prevenzione non strutturale identificate dal nuovo Codice di protezione civile (D.lgs n. 1 del 02/01/2018).

In particolare, il codice attribuisce un ruolo fondamentale alla comunità scientifica (art. 19), che partecipa a tutti gli effetti al Servizio nazionale di protezione civile mediante l'integrazione, nelle attività di prevenzione, delle conoscenze e dei prodotti derivanti da attività di ricerca.

L'esigenza posta dal “Sendai Framework” di disporre entro il 2018 di una nuova valutazione dei rischi aggiornata rispetto alla precedente del 2015 ha rappresentato un importante obiettivo da

conseguire. Il nuovo documento affronta tutti gli otto rischi richiamati all'art. 16 del D.lgs n. 1 (sismico, vulcanico, da maremoto, idraulico, idrogeologico, da fenomeni meteorologici avversi, da deficit idrico e da incendi boschivi).

Nel caso del rischio sismico è stato appositamente sviluppato un nuovo modello di rischio per l'intero patrimonio edilizio residenziale del territorio italiano.

In coerenza alle disposizioni del nuovo codice, un requisito importante nella valutazione del rischio non è solo la sua solida base scientifica, ma anche il suo consenso da parte della comunità scientifica. Quest'ultima è stata coinvolta attraverso i due centri di competenza EUCENTRE (Centro europeo per la formazione e la ricerca nell'ingegneria sismica) e ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica), per un totale di 6 unità di ricerca complessivamente coinvolte (1 per EUCENTRE e 5 per ReLUIS).

La collaborazione fattiva tra di esse, sotto l'azione di indirizzo e coordinamento del DPC, ha consentito di pervenire ad un primo aggiornamento delle mappe di rischio sismico del patrimonio residenziale italiano, sintetizzato nel documento del National Risk Assessment 2018 (ICPD 2018). La metodologia seguita ed i risultati ottenuti sono sintetizzati nei paragrafi che seguono.

1.1 Metodo di lavoro

Una delle principali difficoltà e fonte di incertezza epistemica nelle valutazioni di rischio a scala territoriale (regionale, nazionale) consiste nella scarsità di informazioni relative ad edifici ed abitazioni. In Italia, così come in molti altri Paesi, l'unico dato disponibile sull'intero patrimonio edilizio residenziale è fornito dai censimenti condotti dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) che, seppur estremamente poveri nel contenuto informativo sulle caratteristiche degli edifici censiti, presentano il grande vantaggio di essere omogenei e completi su tutto il territorio.

Sin dalla metà degli anni '90, in Italia si è riconosciuto in questo dato un grande potenziale e, da allora, esso è stato utilizzato per le valutazioni di rischio sismico a livello nazionale. Le prime mappe sono state prodotte nel 1996 da un gruppo di lavoro appositamente istituito dal Dipartimento di Protezione Civile (GNDDT-ING-SSN 1996).

Successivamente, il Servizio Sismico Nazionale (Lucantoni et al. 2001) ha aggiornato tali mappe sulla base delle nuove Carte di Pericolosità sismica (Albarelo et al. 2000), delle nuove matrici di probabilità di danno (Di Pasquale et al. 2000) e curve di fragilità (Sabetta et al. 1998). I parametri di input sismico utilizzati per tali mappe sono stati sia l'intensità macrosismica MCS, sia il parametro di *strong motion* di accelerazione massima PGA. La metodologia di valutazione della vulnerabilità del patrimonio edilizio abitativo utilizza un approccio tipologico-statistico che ripartisce il patrimonio edilizio residenziale in 4 classi (A, B, C1 e C2) definite a partire da quelle adottate dalla scala macrosismica EMS '98 (Grünthal 1988).

La ripartizione delle 4 classi su tutti i comuni italiani viene calibrata con i dati di danno osservato derivanti dai circa 80.000 edifici ispezionati in seguito ai terremoti dell'Irpinia del 1980 e del Lazio-Abruzzo del 1984.

Le mappe restituiscono per ciascun comune e su base annua, l'ammontare atteso dei danni relativi al patrimonio edilizio abitativo (espresso in abitazioni) e il numero medio delle persone coinvolte nei crolli delle abitazioni.

Nel 2008 le mappe sono state aggiornate ai dati ISTAT del nuovo censimento 2001 (Gruppo di lavoro MS 2008).

Dal 2001, in particolare, sono stati fatti considerevoli progressi nella valutazione del rischio, sia per quanto riguarda la valutazione della pericolosità, con la realizzazione del modello MPS04 (Stucchi et al. 2004, 2011), sia in merito ai metodi di valutazione della vulnerabilità sviluppati dalla comunità scientifica operante nel campo dell'ingegneria sismica, anche nell'ambito degli accordi tra il Dipartimento della Protezione Civile e i citati centri di competenza ReLUIS ed EUCENTRE.

Inoltre, tra i prodotti operativi messi a disposizione da parte del DPC per attività di ricerca applicata alla protezione civile, vale la pena citare la piattaforma web Da.D.O. (Database Danno Osservato) (Dolce et al. 2017, 2019). Quest'ultima raccoglie i dati sui danni osservati in seguito agli otto terremoti italiani più importanti, avvenuti nel periodo 1976-2012, organizzati in una banca dati unificata ed accessibile alla comunità scientifica.

Tutti questi elementi sono stati fatti convogliare nelle nuove mappe di rischio sismico per il territorio italiano prodotte nel 2018 per

l'edilizia residenziale e la popolazione, nell'ambito del citato National Risk Assessment.

Le sei unità di ricerca coinvolte hanno elaborato modelli di vulnerabilità per edifici in muratura e in calcestruzzo armato. In particolare quattro unità di ricerca hanno prodotto modelli per edifici in muratura e due per edifici in c.a., basandosi su approcci diversi, come di seguito specificato:

- Centro PLINIVS, Università di Napoli Federico II - edifici in muratura - approccio empirico;
- UNIPD - Università di Padova - edifici in muratura - approccio meccanico;
- UNIPV - Università di Pavia - edifici in muratura - approccio empirico;
- UNIGE - Università di Genova - edifici in muratura - approccio euristico;
- EUCENTRE - Centro europeo per la formazione e la ricerca nell'ingegneria sismica - edifici in cemento armato - approccio meccanico;
- UNIPV-UNINA - Università degli Studi di Napoli Federico II e Università di Pavia - edifici in cemento armato - approccio empirico.

I vari approcci differiscono tra loro non solo per le curve di fragilità che producono, ma anche per il modo in cui queste curve sono associate alle varie tipologie di edifici ricavate dai dati di censimento dell'edilizia residenziale (database ISTAT 2001).

La possibilità di poter accedere alla piattaforma Da.D.O. non solo ha consentito ai gruppi di ricerca di implementare nuovi modelli di vulnerabilità empirici, ma ha anche permesso di calibrare i diversi modelli, anche quelli meccanici, sulla base dei dati reali di danno osservato e di fare controlli sulla loro attendibilità.

Al fine di uniformare i risultati delle analisi, si è deciso di adottare una scala unificata per i livelli di danno: è stata selezionata la scala macrosismica europea (Grünthal et al. 1998), che identifica 5 livelli di danno, da danno trascurabile/lieve (D1) al collasso (D5).

Poiché le valutazioni in termini di livello di danno non consentono di apprezzare appieno l'impatto dei terremoti sulla popolazione e sulle costruzioni, è stato necessario trasformare i livelli di danno in conseguenze, quali perdite economiche dirette in termini di costi di riparazione/ricostruzione, numero di

edifici/abitazioni inagibili, vittime, feriti e senzatetto.

Per evitare incongruenze dovute all'uso di diversi modelli di pericolosità nel calcolo del rischio, tutte le sei unità di ricerca coinvolte hanno assunto un unico modello, ovvero il modello di pericolosità italiano ufficiale MPS04 (Stucchi et al. 2004, 2011), nonché lo stesso database di censimento ISTAT riferito all'anno 2001. Quest'ultima scelta è giustificata dal ridotto contributo al rischio degli edifici realizzati dopo il 2001, con normative e classificazioni del territorio più aggiornati.

Infine, sono state fatte due importanti scelte comuni per tutti i gruppi di ricerca, in merito al tipo di suolo e al valore minimo dell'accelerazione del suolo per la quale si può prevedere un danno in un edificio. Poiché per la pericolosità sono assunti direttamente i valori di accelerazione forniti dal modello MPS04, si è ipotizzato un terreno di tipo A uniforme, per evitare arbitrarietà nelle scelte o incertezza nella selezione delle caratteristiche del suolo in siti specifici. Per quanto riguarda invece il minimo valore dell'accelerazione del suolo che produce danno, è stato assunto un valore soglia di 0.03g sulla base dell'opinione degli esperti del gruppo di lavoro.

1.2 La piattaforma IRMA

Al fine di avere immediata comparabilità dei risultati ottenuti con i diversi approcci proposti dalle unità di ricerca coinvolte, si è ritenuto necessario avere una piattaforma di calcolo con la quale gestire l'intero processo di valutazione del rischio. Il DPC ha incaricato EUCENTRE di implementare la piattaforma web IRMA (Italian Risk MAPs), che consente di elaborare diversi modelli di vulnerabilità/esposizione e di confrontare e combinare in modo semplice e immediato i risultati (Borzi et al. 2018). IRMA utilizza come motore di calcolo OpenQuake, un software per la valutazione del rischio sismico sviluppato dalla Fondazione GEM (Global Earthquake Model) (<http://www.globalquakemodel.org>). Le componenti di OpenQuake sono state integrate nella piattaforma e la gestione di tutte le operazioni avviene attraverso finestre di dialogo. In Figura 1 è riportata la Home page di IRMA.



Figura 1. Home page di IRMA

IRMA consente all'utente di creare e poi caricare differenti database di esposizione/vulnerabilità e diversi set di curve di fragilità, previa approvazione da parte di un utente supervisore (responsabile dell'Unità di ricerca), cui compete inoltre la decisione di condividere i modelli e le mappe prodotti, con le altre unità di ricerca. Al DPC è riservata un'utenza separata, con funzionalità differenti e più ampie rispetto alle altre.

La pericolosità sismica per il calcolo delle mappe di rischio è invece pre-caricata ed è il modello di pericolosità MPS04, messo a punto dall'INGV e adottato a livello nazionale con Ordinanza di protezione civile (OPCM 3519/2006) e poi dalle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08, D.M.14.01.2008). La piattaforma è estremamente flessibile e consente di combinare diversi database di esposizione con diversi set di curve di fragilità per produrre mappe di danno *condizionato* (fissando il periodo di ritorno) o *incondizionato* (per una determinata finestra temporale). È inoltre possibile produrre scenari di danno utilizzando come input sismico le shakemap. I risultati sono visualizzabili su mappa, in tabella o scaricabili sotto forma di shapefile.

L'utente deve caricare due file di input: il primo è il database di esposizione/vulnerabilità, in cui viene assegnata la classe di vulnerabilità agli edifici presenti nel database ISTAT 2001 in funzione della tipologia strutturale (c.a., muratura, altro), dell'epoca di costruzione e del numero di piani. Il secondo file di input è quello che descrive, in termini di media e deviazione standard, i parametri delle curve di fragilità da associare alle diverse classi di vulnerabilità degli edifici. In accordo con la letteratura, le curve di fragilità sono definite da una distribuzione lognormale (Maio e Tsionis 2016). Per calcolare

le mappe di danno sono sufficienti questi due elementi, da combinare con la pericolosità MPS04 pre-caricata nella piattaforma.

L'utente può scegliere il database di esposizione/vulnerabilità, il set di curve di fragilità, la regione d'Italia per la quale svolgere il calcolo (o tutta Italia), il tipo di suolo da assegnare (uguale per tutto il territorio), la tipologia di analisi (danno condizionato o incondizionato) e infine può anche scegliere se prendere in considerazione tutti i comuni oppure solo quelli che appartengono ad una determinata classe demografica, ad esempio solo i comuni con meno di 3.000 abitanti. Sulla base di tutte queste indicazioni la piattaforma crea i file di input per OpenQuake, li invia al motore di calcolo ed elabora l'output rendendolo disponibile all'utente sotto forma di mappa, tabella e shapefile. In Figura 2 è riportato un esempio di mappa di rischio calcolata in IRMA.

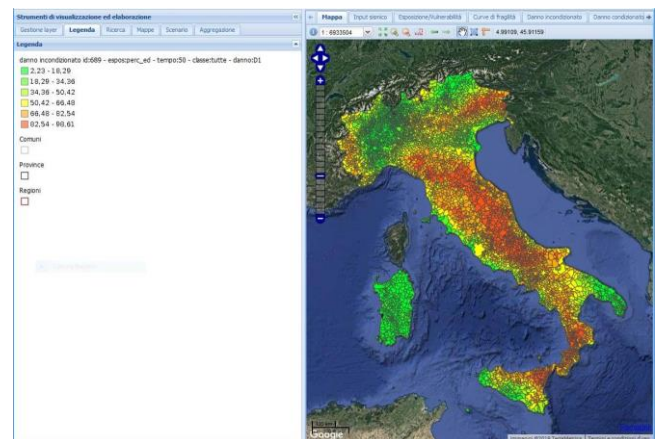


Figura 2. Esempio di mappa di rischio calcolata in IRMA

IRMA consente anche di elaborare scenari di danno in *real time* utilizzando come input sismico le shakemap in PGA (Peak Ground Acceleration) pre-caricate sulla piattaforma. Finora sono state inserite quelle relative ai terremoti avvenuti in Italia dal 1976 (terremoto del Friuli) al 2012 (terremoto dell'Emilia) elaborate dall'INGV, ove disponibili, oppure dall'USGS. Anche in questo caso l'utente sceglie il database di esposizione/vulnerabilità, il set di curve di fragilità e lancia l'analisi. I risultati sono visualizzabili, analogamente al calcolo del rischio, su mappa, tabella e shapefile.

Le ultime operazioni consentite dalla piattaforma, riservate unicamente all'utente DPC, sono l'aggregazione e la combinazione di mappe, preventivamente approvate e condivise dall'utente supervisore di ciascuna unità di ricerca. La prima consiste nell'aggregare tra loro diverse mappe di rischio (o di scenario) in

funzione del materiale (muratura o cemento armato), della regione o della demografia. Ad esempio si possono elaborare separatamente mappe di danno per diverse regioni d'Italia e poi decidere di aggregarle per ottenere un'unica mappa per l'intero territorio nazionale, così come si possono fare mappe solo per edifici in muratura, mappe solo per edifici in c.a. e poi aggregarle per avere una mappa che comprenda tutti gli edifici. Infine si possono produrre mappe per comuni "piccoli", per comuni "medi" e per comuni "grandi" e poi aggregarle. La combinazione di valutazioni diverse consiste invece nel calcolo della media pesata dei relativi risultati, con pesi assegnati dall'utente DPC.

2 MODELLI DI ESPOSIZIONE E VULNERABILITÀ

2.1 PLINIVS – Edifici in Muratura

Il modello PLINIVS propone l'analisi del comportamento sismico degli edifici ordinari in muratura attraverso un approccio osservazionale critico basato sui dati di danneggiamento occorsi a seguito di due terremoti verificatisi in Italia (Irpinia 1980 e L'Aquila 2009), raccolti nella banca dati del Centro Studi PLINIVS dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (Zuccaro 2004).

Le informazioni disponibili riguardano le caratteristiche tipologico- strutturali degli edifici, il livello di danneggiamento (D0-D5, Grünthal 1998) e la misura dell'input sismico in PGA, desunta da shakemap per L'Aquila 2009 e attraverso legge di conversione da intensità macrosismica (Margottini et al. 1992) per Irpinia1980.

Le curve di vulnerabilità sono calcolate con un metodo di regressione che fa uso di funzioni lognormali (Tabella 1) pesate sul livello di affidabilità del dato al variare della PGA. Per ciascuna classe di vulnerabilità (A, B, C1), l'affidabilità è stimata sulla base dei dati de L'Aquila 2009 (in quanto più completi per tutti i livelli di danno), in funzione del rapporto tra il numero di edifici rilevati e quello degli edifici presenti nel database ISTAT 2001. A parità di PGA, la medesima affidabilità è assunta per i dati di Irpinia 1980. Inoltre, allo scopo di non sovrastimare il danneggiamento per bassi valori di PGA, si è fatta l'ipotesi di "assenza di danno"

in corrispondenza di valori di PGA minori o uguali di 0,03g.

L'assegnazione della classe di vulnerabilità è condotta attraverso un aggiornamento della procedura BINC, Building Inventory at National scale based on Census data (Cacace et al., 2018; Zuccaro and Cacace, 2015), tramite le correlazioni statistiche tra i dati degli edifici rilevati (DB PLINIVS) e i dati "poveri" dell'ISTAT 2001 (numero di piani, età e tipo di struttura).

Tabella 1. Media e dispersione delle curve di vulnerabilità lognormali per le classi di vulnerabilità delle murature.

Livello di danno		Classi di vulnerabilità		
		A	B	C1
D1	media [g]	0,07	0,15	0,29
	dispersione [-]	1,10	0,90	0,80
D2	media [g]	0,15	0,28	0,62
	dispersione [-]	1,10	0,90	0,80
D3	media [g]	0,27	0,46	0,79
	dispersione [-]	1,00	0,90	0,80
D4	media [g]	0,54	0,77	1,29
	dispersione [-]	1,00	0,90	0,80
D5	media [g]	1,07	1,22	2,27
	dispersione [-]	1,00	0,90	0,80

2.2 UNIPD – Edifici in Muratura

Il modello sviluppato dall'Università di Padova stima la fragilità meccanica di edifici residenziali in muratura raggruppati in 10 macro-tipologie, secondo 5 epoche costruttive (pre-19, 19-45, 46-60, 61-80, post-80) e 2 classi di altezza (1-2 piani, 3 piani e più). A questo scopo, è stato creato un database che raccogliesse le principali informazioni (geometrie, materiali e caratteristiche costruttive) relative a oltre 500 edifici. Questi ultimi sono stati selezionati in modo da garantire un'adequata rappresentatività tipologica dell'intero patrimonio edilizio nelle diverse regioni italiane, secondo i dati presenti nel database ISTAT 2001. Le informazioni sono state ricavate direttamente dai progetti o facendo riferimento a manuali, codici e letteratura relativi al periodo di interesse (ad esempio, Ceccarini 1952, Corrado et al. 2014, Donghi 1905, Moretti 1946, Moretti 1947).

La fragilità meccanica è stata valutata per ciascun edificio del database tramite Vulnus Vb 4.0 (Bernardini et al. 2009). Il software valuta i meccanismi in piano e fuori piano di edifici in muratura e restituisce 3 curve di fragilità (in PGA): la curva White rappresenta la fragilità più probabile, mentre le curve Upper e Lower Bound delimitano i casi estremi. Lo stato di danno (D)

associato a queste curve di fragilità corrisponde ad un D2-3, considerando che tali curve sono relative o al raggiungimento della resistenza a taglio in piano o all'innesco di un meccanismo fuori piano. La fragilità delle macro-tipologie è stata ottenuta calcolando la fragilità media per ciascun comune, tra edifici appartenenti allo stesso periodo costruttivo e stesso numero di piani, per poi effettuare una media pesata delle precedenti fragilità secondo la distribuzione statistica degli edifici per numero di piani, in base al periodo costruttivo.

Per definire la fragilità per tutti i livelli di danno (da D1 a D5), è stato calibrato il modello macrosismico di Lagomarsino e Cattari (2014) con legge di correlazione fra intensità macrosismica e PGA di Margottini (1992) sui risultati di fragilità meccanica. Ogni curva meccanica può infatti essere rappresentata come combinazione lineare delle curve di fragilità D2-3 delle varie classi del modello macrosismico, seguendo una procedura di minimizzazione sia degli errori assoluti (criterio dei minimi quadrati) sia dell'errore relativo (differenza fra aree positive e negative sottese). Per ogni macro-tipologia, sono stati così ottenuti i set di curve di fragilità associati alle probabilità White, Upper e Lower Bound. Infine, si è scelto di considerare la fragilità media delle curve White e la massima dispersione data dal range di fragilità fra le curve Upper e Lower, in modo da ottenere un unico modello di fragilità.

2.3 UNIPV – Edifici in Muratura

Il modello di vulnerabilità proposto dall'Università di Pavia per gli edifici residenziali in muratura (Rosti et al. 2019) è derivato empiricamente, elaborando statisticamente i dati di danno post-terremoto relativi agli eventi sismici di Irpinia (1980) e L'Aquila (2009), disponibili nella piattaforma Da.D.O. Il modello di vulnerabilità comprende curve di fragilità definite per tre classi di vulnerabilità, a vulnerabilità decrescente (A, B e C1), e due classi di piano (edifici bassi: 1-2 piani ed edifici medio-alti: >2 piani). In primo luogo, si sono derivate curve di fragilità tipologiche, considerando la PGA da shakemap (Michelini et al. 2008) come misura di intensità sismica. Le curve di fragilità sono state definite per cinque livelli di danno della EMS-98 (Grünthal et al. 1998), identificati sulla base del massimo danno osservato su diversi componenti strutturali (Rosti et al. 2018) e

utilizzando le leggi di conversione proposte da Dolce et al. (2019) e Rota et al. (2008). I dati di danno empirici sono stati approssimati utilizzando il modello lognormale, considerando un unico valore di dispersione per tutti i livelli di danno, in modo da garantirne la natura ordinale. Per ogni soglia di PGA, la ripartizione degli edifici nei diversi stati di danno è stata descritta dal modello multinomiale. L'associazione delle tipologie edilizie alle classi di vulnerabilità è stata effettuata a posteriori, sulla base della similarità della fragilità osservata, implementando un algoritmo di aggregazione gerarchica.

Dall'altro lato, si è determinata la composizione del costruito esistente in termini di classi di vulnerabilità, a partire dai dati del censimento nazionale. I dati di danno empirici sono stati suddivisi in "categorie ISTAT", definite per due classi di piano (1-2 piani e >2 piani) e sei classi di epoca di costruzione (<1919, 1919-45, 1946-61, 1962-71, 1972-81, >1981), coerentemente con le informazioni rilevabili da ISTAT. Le curve di fragilità di ciascuna categoria ISTAT sono state espresse come combinazione lineare delle curve di fragilità delle classi di vulnerabilità. I coefficienti della combinazione lineare, che rappresentano le percentuali di appartenenza di ciascuna categoria ISTAT alle classi di vulnerabilità, sono stati ottenuti minimizzando lo scarto con le curve di fragilità derivate empiricamente.

2.4 UNIGE – Edifici in Muratura

Le curve di fragilità del costruito residenziale in muratura dell'Università di Genova sono state ricavate attraverso un approccio euristico, partendo dal modello di vulnerabilità macrosismico (Lagomarsino e Giovinazzi 2006) e calibrandolo sulle tipologie definite dall'esposizione ISTAT 2001 attraverso i dati di danno osservato presenti in Da.D.O. Questo approccio è coerente con le classi di vulnerabilità EMS98 e con la presenza in ciascuna tipologia di edifici di classe differente ma, al tempo stesso, garantisce una buona aderenza al danno osservato e risultati meccanicamente consistenti nei casi in cui il dato osservato è incompleto.

Il modello macrosismico, descritto in dettaglio in Bernardini et al. (2010), rappresenta la risposta sismica di una classe di edifici tramite gli indici di vulnerabilità (V) e di duttilità (Q) e fornisce la relazione tra l'intensità macrosismica (I) e il grado di danno medio (μ_D). Assumendo una legge

binomiale, si ricava l'istogramma atteso dei 5 livelli di danno. Dalla calibrazione con i danni osservati è stata ricavata una relazione tra i due indici e si è giunti alla valutazione dell'indice V per le classi EMS. Grazie ad una legge di correlazione tra I e PGA , ricavata dalla shakemap INGV del terremoto de L'Aquila (2009) e dai dati di intensità in Da.D.O, sono state calcolate analiticamente le PGA mediane (PGA_{Dk}) e le dispersioni (β_{Dk}) delle curve di fragilità dei 5 livelli di danno ($k=1\dots5$) per le suddette classi.

$$PGA_{Dk} = f_1 f_2^{[6.7-3.25V+(0.9+2.8V)atanh(0.36k-1.08)]} \quad (1)$$

$$\beta_{Dk} = \sqrt{\beta_1^2(V, f_2, k) + \beta_2^2(k)} \quad (2)$$

dove: $f_1=0.05$ [g] e $f_2=1.66$ sono i parametri della correlazione tra I e PGA ; β_1 e β_2 sono i contributi alla dispersione, rispettivamente, implicito nel modello macrosismico e legato alla variabilità della risposta di edifici della stessa tipologia. Le Tabelle 2 e 3 mostrano le curve di fragilità ed il modello di esposizione/vulnerabilità così ottenuti.

Tabella 2. Curve di fragilità delle classi EMS.

Classe EMS		A	B	C1	D
D1	PGA [g]	0.064	0.104	0.18	0.275
	β [-]	1	0.92	0.83	0.76
D2	PGA [g]	0.161	0.232	0.35	0.481
	β [-]	0.81	0.72	0.63	0.55
D3	PGA [g]	0.309	0.409	0.56	0.716
	β [-]	0.79	0.69	0.57	0.49
D4	PGA [g]	0.594	0.722	0.898	1.064
	β [-]	0.78	0.68	0.56	0.47
D5	PGA [g]	1.491	1.605	1.744	1.86
	β [-]	0.85	0.74	0.61	0.51

Tabella 3. Matrice esposizione/vulnerabilità.

Tipologia ISTAT	Classe EMS			
	A	B	C1	D
Pre-1919	L	80%	20%	
	M	60%	40%	
	H	100%		
1919-45	L	25%	75%	
	M		90%	10%
	H	60%	40%	
1946-61	L		50%	50%
	M		70%	30%
	H		85%	15%
1962-81	L		70%	30%
	M	20%	80%	
	H	45%	55%	
Post 1981	L			100%
	M		40%	60%
	H		70%	30%

I risultati ottenuti tramite la piattaforma IRMA sono buoni nella simulazione degli scenari di danno osservato (validazione) e plausibili nel calcolo del rischio a scala nazionale. Il numero medio annuo di vittime attese in edifici in muratura è pari a 78, valore coerente con il dato reale di 5.000 vittime in Italia negli ultimi 50 anni (dal terremoto del Belice, 1968, ad oggi), comprendendo in questo caso anche gli edifici in c.a.. Nella simulazione dello scenario del sisma de L'Aquila (2009), per gli edifici in muratura si sono ottenute 79 vittime a L'Aquila (95 nell'intera area colpita), valore perfettamente coerente con il dato reale di 309 morti, circa 1/3 dei quali in edifici in muratura. Anche la stima dei costi di riparazione/ ricostruzione a L'Aquila è buona, risultando compresa tra 329 e 486 M€ (a seconda della funzione costo/livello di danno utilizzata), da confrontarsi con i 480 M€ reali. Inoltre, sono stimati 217 collassi e un 47.5% di edifici inagibili a L'Aquila. Le conseguenze a Roma sono trascurabili, nonostante la PGA della shakemap INGV sia probabilmente un poco sovrastimata, a dimostrazione che le curve di fragilità sono ben calibrate anche nella coda iniziale.

2.5 EUCENTRE – Edifici in Calcestruzzo Armato

Eucentre ha utilizzato la metodologia analitica SP-BELA (Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment) per elaborare il modello di vulnerabilità per gli edifici in c.a. proposto in IRMA. A partire da tale modello sono state prodotte curve di fragilità per i due stati limite identificabili numericamente: il danno severo e il collasso. Grazie poi al confronto tra gli scenari di danno calcolati e i dati di danno osservato presenti nella piattaforma Da.D.O. si è proceduto con la calibrazione della metodologia che ha portato alla generazione di curve di fragilità per i 5 livelli di danno della scala EMS98.

SP-BELA suddivide gli edifici in c.a. in due classi di vulnerabilità: C2 corrisponde agli edifici non progettati per resistere all'azione del sisma e D agli edifici sismicamente progettati. Le due classi vengono assegnate in funzione del periodo di costruzione e dell'anno di classificazione sismica del comune a cui appartengono gli edifici. Tuttavia, indipendentemente dall'anno di classificazione sismica del comune, tutti gli edifici in c.a. costruiti prima del 1982 sono

considerati non sismicamente progettati, dal momento che le prescrizioni contenute nelle normative di progettazione precedenti a questa data sono ritenute non efficaci in termini di prestazioni sismiche.

La metodologia SP-BELA può essere applicata a diverse tipologie strutturali: edifici in muratura (Borzi et al. 2008a), edifici a telaio in c.a. (Borzi et al. 2008b, 2008c) ed edifici prefabbricati (Bolognini et al., 2008). Le curve di fragilità sono ottenute confrontando la capacità di spostamento di edifici rappresentativi di un'intera classe con la domanda di spostamento per i diversi livelli di danno considerati.

Il primo step della procedura per la definizione delle curve di fragilità per gli edifici in c.a. consiste nella definizione di un campione di 1000 edifici attraverso una generazione Monte Carlo a partire da un prototipo di edificio che è rappresentativo dell'intera tipologia selezionata. Il campione di edifici viene generato variando i parametri strutturali predefiniti in base a relazioni di distribuzione probabilistiche e al progetto simulato.

Il secondo step prevede l'analisi statica non lineare di ogni edificio che consente di definire una curva *pushover* per un sistema equivalente ad un grado di libertà. La *pushover* descrive la capacità di spostamento dell'edificio.

Nel terzo step della procedura la domanda di spostamento del terremoto è definita attraverso lo spettro in spostamento. Ad ogni valore di PGA per cui si vuole ottenere la curva di fragilità è possibile ancorare una forma spettrale in spostamento.

Infine, il quarto step prevede il confronto tra domanda e capacità. Se la domanda è superiore alla capacità significa che l'edificio non soddisfa la condizione limite, evolvendo nella condizione di danno più elevato. La procedura viene ripetuta per tutti gli edifici del campione: il numero di edifici per i quali la capacità è inferiore alla domanda diviso per la dimensione della popolazione del campione rappresenta la probabilità di superamento.

2.6 UNINA-UNIPV – Edifici in Cemento Armato

Il modello di vulnerabilità per gli edifici in cemento armato (c.a.) sviluppato in collaborazione tra i gruppi di ricerca delle Università di Napoli Federico II e l'Università di Pavia è ottenuto su base empirica a partire dai

dati pubblicati dal DPC sulla piattaforma WebGis Da.D.O. (Dolce et al. 2017, 2019), sui dati degli edifici danneggiati a seguito dei 9 terremoti italiani di rilevanza nazionale degli ultimi 50 anni. Le curve di fragilità empiriche sono state ottenute utilizzando come funzione interpolante la distribuzione lognormale e l'accelerazione di picco al suolo (PGA) stimata dalle shakemap rilasciate dall'INGV come misura di intensità per la caratterizzazione dello scuotimento.

A partire dai 9 database contenuti nella piattaforma Da.D.O., è stata effettuata una selezione secondo specifici criteri, al fine di ottenere un campione di dati affidabile e robusto (Del Gaudio et al. 2019). Solo due database, relativi a Irpinia 1980 e L'Aquila 2009, hanno pienamente soddisfatto i criteri prescelti. Il database considerato è stato, poi, integrato con dati provenienti dal censimento nazionale ISTAT2001, relativamente ai comuni della regione Abruzzo non presenti nella piattaforma Da.D.O. e a quelli rilevati parzialmente (caratterizzati da un numero di schede di rilievo inferiore al 10% degli edifici riportati da ISTAT2001), in rappresentanza dell'evidenza negativa del danneggiamento.

Le curve di fragilità sono state derivate per 15 tipologie edilizie e per cinque livelli di danno (DS), secondo la scala EMS-98, tenendo conto del danno osservato sia di componenti strutturali che non strutturali, secondo le regole di conversione riportate da Rota et al. (2008) e da Del Gaudio et al. (2017). Il fitting dei dati è stato effettuato applicando il metodo della Massima Verosimiglianza, utilizzando la distribuzione multinomiale (Charvet et al. 2014) per la definizione dell'occorrenza delle differenti probabilità di danneggiamento nei vari DSs.

Le 15 tipologie edilizie sono state definite in funzione di 5 classi piano e da 3 classi di progettazione: gravitazionale, sismica obsoleta (anteriore al 1981) e sismica di nuova generazione (successiva al 1981) – queste ultime, estratte dal solo database de L'Aquila 2009.

Sulla base delle 15 tipologie edilizie, è stato effettuato un processo di clustering al fine di giungere alla definizione di 2 classi di vulnerabilità, C2 e D, con vulnerabilità decrescente, e nell'ambito di ciascuna di esse di 3 classi di altezza (bassa: 1-2 piani, media: 3-4 piani, alta: >4 piani). Le curve di fragilità relative alle due classi di vulnerabilità, C2 e D, per ciascuna classe di altezza, sono ottenute come

media pesata delle curve relative alle 15 classi tipologiche in relazione all'occorrenza di ciascuna classe su base nazionale attraverso i dati ISTAT 2001.

Per maggiori dettagli si rimanda al lavoro di Del Gaudio et al. 2019.

3 RISULTATI E MAPPE

In IRMA è stato valutato il rischio sia condizionato sia incondizionato. I risultati più interessanti sono quelli relativi alla valutazione del rischio incondizionato, che tiene conto di tutte le perdite che possono verificarsi in determinate finestre temporali a causa dei terremoti che si verificano nel corrispondente lasso di tempo, sulla base della loro probabilità di occorrenza. In particolare sono state scelte due finestre temporali: 1 anno, che significa fornire la frequenza annuale dei livelli di danno considerati o delle perdite, e 50 anni.

I risultati delle elaborazioni di ciascuno dei gruppi di ricerca sono stati combinati tra loro per ottenere la stima dei valori medi, assumendo ugual peso per i diversi modelli, nonché i massimi e i minimi, ottenuti dai quattro gruppi che si sono occupati della muratura e, separatamente, dai due gruppi che hanno trattato gli edifici in c.a.. Infine, per ottenere i valori medi, massimi e minimi per l'intero patrimonio edilizio nazionale, i risultati per muratura e c.a. sono stati aggregati. Questa procedura è stata seguita, per le due finestre temporali anzidette, per il rischio sismico espresso sia in termini di livelli di danno che di conseguenze secondo gli indicatori di rischio descritti al §3.2.

3.1 Rischio in termini di livelli di danno

In Tabella 4 e Tabella 5 sono riportati i valori medi, massimi e minimi stimati di numero previsto di abitazioni interessate dai cinque livelli di danno considerati rispettivamente nella finestra temporale di 1 e 50 anni. I valori sono da intendersi in migliaia di abitazioni. Mappe analoghe sono state calcolate da IRMA anche in termini di numero di edifici, in quanto il dato ISTAT 2001 fornisce entrambi i parametri.

Osservando i valori medi, si può notare che in 1 anno e, proporzionalmente, in 50 anni è atteso un numero molto elevato di abitazioni danneggiate. Questo numero si riduce di un ordine di grandezza passando da D1 a D3 e da D3 a D5. Si evidenzia che sono attese 2100

abitazioni in edifici crollati (D5) all'anno e più di un centinaio di migliaia in 50 anni.

Tabella 4. Valori medi, massimi e minimi del numero atteso di abitazioni interessate dai cinque livelli di danno in 1 anno: migliaia di abitazioni.

Livello di danno	D1	D2	D3	D4	D5
Media	143,1	38,7	17,8	6,1	2,1
Massimo	203,1	65,1	13,4	8,1	3,3
Minimo	84,4	15,6	7,9	2,6	0,4

Tabella 5. Valori medi, massimi e minimi del numero atteso di abitazioni interessate dai cinque livelli di danno in 50 anni: migliaia di abitazioni.

Livello di danno	D1	D2	D3	D4	D5
Media	4199,7	1436,0	783,0	290,9	103,6
Massimo	5738,4	2198,7	1348,0	382,2	161,9
Minimo	3154,4	631,2	372,2	130,6	19,5

Confrontando i valori attesi massimi e minimi, si può notare che ci sono grandi variazioni a causa delle differenze tra i modelli di vulnerabilità sviluppati dai diversi gruppi di ricerca. Si otterrebbero incertezze ancora più grandi se venissero prese in considerazione anche le incertezze epistemiche legate all'amplificazione del suolo e agli effetti cosismici.

I risultati possono anche essere rappresentati in mappe che mostrano la distribuzione geografica del danno. Le mappe di Figura 3 e Figura 4 forniscono il rapporto medio atteso in 1 anno tra il numero di abitazioni che mostrano danno D3 e D5 rispettivamente, e il numero totale di abitazioni presenti in ogni comune.

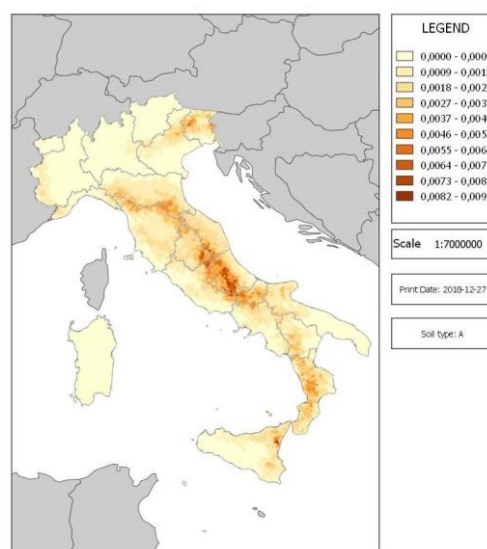


Figura 3. Mappa dei rapporti medi attesi in 1 anno del numero di abitazioni in D3 sul numero totale di abitazioni in ogni comune

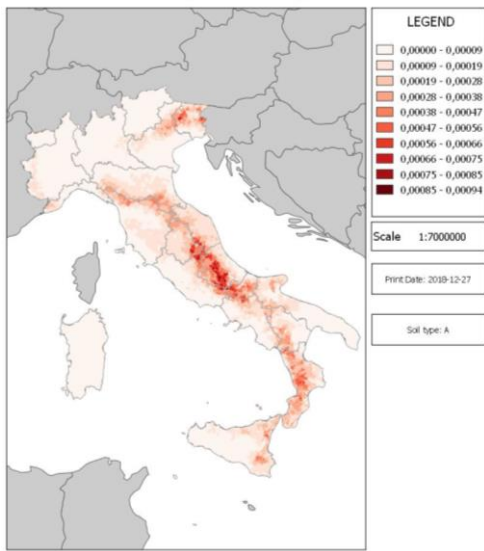


Figura 4. Mappa dei rapporti medi attesi in 1 anno del numero di abitazioni in D5 sul numero totale di abitazioni in ogni comune

3.2 Rischio in termini di conseguenze

Oltre che in termini di livelli di danno, il rischio è stato elaborato anche in termini di conseguenze per la popolazione e per il patrimonio edilizio, secondo i seguenti indicatori di impatto:

- Numero di vittime;
- Numero di feriti;
- Numero di senzatetto;
- Perdite economiche dirette (costi di riparazione o ricostruzione di edifici danneggiati o crollati) in Euro;
- Numero di edifici/abitazioni inagibili a breve termine (b.t.), ossia con danni leggeri;
- Numero di edifici/abitazioni inagibili a lungo termine (l.t.), ossia con danni gravi;
- Numero di edifici/abitazioni crollati.

La quantificazione di tali indicatori è stata basata sui valori previsti di edifici che hanno raggiunto i diversi livelli di danno descritti nel paragrafo precedente. La traduzione dei livelli di danno in conseguenze è stata eseguita assumendo un'unica metrica per tutte le unità di ricerca, così da evitare di introdurre ulteriori elementi di variabilità ed incertezza.

In letteratura si trovano diverse proposte per la valutazione di una stima delle vittime a seguito di un terremoto. L'idea originale di Coburn e Spence (1992) è stata ulteriormente sviluppata e aggiornata da vari autori sulla base del contesto locale e considerando i dati osservati dopo terremoti significativi avvenuti in tutto il mondo (Spence et al. 2011). Un esempio per il caso italiano può essere rinvenuto nel lavoro di

Zuccaro e Cacace (2011). Tutti gli studi mostrano un'elevata incertezza dovuta a diversi fattori che possono influenzare l'impatto reale dell'evento sulla popolazione: presenza di occupanti nelle diverse ore del giorno e nelle diverse stagioni dell'anno, meccanismi di danno e collasso (parziale o totale) che si attivano negli edifici, efficacia delle operazioni di soccorso, ecc.

La probabilità che gli occupanti di un edificio subiscano ferite o perdano la vita è generalmente valutata in funzione del livello di danno raggiunto dall'edificio. Si presume che il rapporto tra feriti e vittime rispetto al totale degli occupanti fornito dal censimento della popolazione sia significativo solo per i livelli di danno D4 e D5. Sebbene il numero atteso di vittime e feriti possa variare a seconda del tipo di struttura dell'edificio (cioè distinguendo tra edifici in muratura o edifici in c.a.), le valutazioni in IRMA vengono eseguite assegnando una percentuale di vittime e feriti attesi per D4 e per D5 indipendente dal materiale da costruzione. I valori adottati, calibrati su base esperta dal gruppo di lavoro a partire dai riferimenti di letteratura citati, sono riportati in Tabella 6.

Tabella 6. Percentuali per il calcolo delle perdite umane.

Perdite umane	D4	D5
Vittime	1 %	10 %
Feriti	5 %	30 %

Le procedure standard per calcolare le perdite economiche dirette sono state basate su parametri di perdita correlati al costo della riparazione del danno. I parametri di costo adottati in IRMA e mostrati in Tabella 7 sono stati calibrati sui costi di riparazione effettivi che sono stati monitorati nel processo di ricostruzione in seguito ai recenti terremoti italiani (Di Ludovico et al. 2017a, 2007b). Il costo unitario di costruzione (CU) riportato in Tabella 7 comprende le spese tecniche e l'IVA.

Tabella 7. Percentuali di costo utilizzati per il calcolo delle perdite economiche dirette rispetto al costo unitario di costruzione.

CU (€/m ²)	D1	D2	D3	D4	D5
1350	2	10	30	60	100

Oltre alle perdite umane ed economiche, l'impatto del terremoto può essere valutato in termini di edifici (o abitazioni) inagibili e crollati e di numero di senzatetto. Queste quantità sono molto importanti per stimare i costi indiretti, cioè quelli relativi agli alloggi temporanei e alle

soluzioni abitative, e in generale sono un fattore importante che influisce sull'impatto sociale dei terremoti.

Gli edifici (o le abitazioni) inagibili sono quelli per i quali la sicurezza degli occupanti, in termini di salvaguardia della vita, non è garantita. Analogamente all'approccio seguito per la valutazione delle perdite economiche dirette, anche il numero di edifici inagibili viene valutato sulla base della distribuzione del danno. In particolare, gli edifici agibili sono quelli interessati da un danno lieve, associato su base esperta ai livelli di danno D1 e D2 secondo le percentuali di Tabella 8. Gli edifici inagibili vengono distinti in due sottocategorie, vale a dire edifici inagibili nel breve termine (b.t.) a causa di danni leggeri o moderati, ed edifici inagibili a lungo termine (l.t.) a causa di danni più gravi. Le percentuali di edifici (o abitazioni) inagibili assunte in IRMA secondo la distinzione anzidetta, in funzione del livello di danno, sono anch'esse riportate in Tabella 8. Considerate le finalità estensive dell'analisi, per semplicità si è deciso di non fare alcuna distinzione tra edifici in muratura e cemento armato. Infine, il numero previsto di edifici (o abitazioni) crollati in IRMA è valutato considerando il 100% degli edifici (o abitazioni) associati al livello di danno D5.

Tabella 8. Percentuali di edifici (o abitazioni) agibili, inagibili e crolli.

Livello di danno	D1	D2	D3	D4	D5
Agibili	100	60	0	0	0
Inagibili b.t.	0	40	40	0	0
Inagibili l.t.	0	0	60	100	0
Crolli	0	0	0	0	100

Per quanto riguarda il numero di senzatetto, questo è stato stimato contando il numero di occupanti negli edifici inagibili (a breve e lungo termine) e sottraendovi la quota parte di vittime, calcolate a partire dalla Tabella 6.

Applicando le equazioni di cui sopra ai risultati in termini di livelli di danno ottenuti da tutti i sei modelli di rischio, sono stati calcolati e poi combinati tra loro i risultati in termini di conseguenze, valutando nuovamente i valori medi, massimi e minimi. I principali risultati a livello nazionale sono riassunti nelle Tabelle 9 e 10.

Tabella 9. Valori medi, massimi e minimi delle perdite economiche dirette attese in 1 anno (in miliardi di Euro) e del numero previsto di abitazioni inagibili a breve e lungo periodo in 1 anno.

	Costi	Inagibili b.t.	Inagibili l.t.
Media	2,13	20.938	15.635
Massimo	3,27	31.847	22.024
Minimo	1,27	9.962	7.404

Tabella 10. Valori medi, massimi e minimi del numero previsto di vittime, feriti e senzatetto in 1 anno.

	Vittime	Feriti	Senzatetto
Media	505	1.744	78.602
Massimo	763	2.588	131.952
Minimo	123	469	4.0381

Il costo medio diretto per anno risulta essere dell'ordine di 2 miliardi di Euro, mentre i valori massimi e minimi differiscono di circa $\pm 50\%$ rispetto alla media, confermando così l'elevata incertezza di questa stima.

Queste cifre rappresentano solo i costi diretti (riparazione/ricostruzione) del patrimonio edilizio residenziale e appaiono abbastanza coerenti con i costi totali dei terremoti avvenuti negli ultimi 50anni. Questi ultimi, infatti, considerano tutti i costi dei terremoti del passato, compresi i costi diretti di riparazione/ricostruzione di edifici industriali/commerciali, edifici pubblici, infrastrutture, beni culturali, nonché i costi di gestione delle emergenze (ad es. alloggi temporanee, ecc.). Includere tutti gli altri costi in genere implica il raddoppio dei costi diretti calcolati solo per gli edifici residenziali (Dolce et al. 2015), portando così ad un costo totale previsto dell'ordine di 4-4,5 miliardi di Euro all'anno. Questo valore è leggermente più elevato dei costi medi reali sostenuti negli ultimi 50 anni, che, d'altra parte, sono stati caratterizzati da una sismicità che non ha raggiunto magnitudo 7.

Le conseguenze sulla popolazione riportate in Tabella 10 mostrano un numero notevole di vittime, dell'ordine di 500 all'anno. Anche se tale numero appare incoerente e ampiamente sovrastimato rispetto alle cifre degli ultimi 50 anni (circa 5.100), esso appare sottostimato rispetto alle cifre relative alla finestra temporale che va dal 1860 al 2010, quando più di 200.000 vittime si sono verificate in 150 anni. D'altra parte, il numero di vittime causate da un terremoto è il parametro, tra quelli associati alle conseguenze, più difficile da stimare in quanto soggetto a maggiore incertezza. Esso dipende, infatti, dall'esposizione fotografata nel preciso

istante in cui si verifica l'evento, in termini di "dove" (distanza dall'epicentro delle grandi città) e "quando" (ora del giorno, giorno e stagione dell'anno).

L'inagibilità e i senzatetto conseguenti ai danni subiti dal patrimonio edilizio sono importanti per valutare l'impatto economico (dovuto ai costi non trascurabili per gli alloggi temporanei) e l'impatto sociale. Le cifre riportate in Tabella 9 e in Tabella 10, con un numero medio previsto dell'ordine di 36.000 abitazioni inagibili all'anno (sommando il breve e il lungo termine) e quasi 80.000 senzatetto, sono oltre che sconcertanti, anche significative in termini di impatto economico (dell'ordine di 1/4, 1/2 dei costi diretti per la riparazione/ricostruzione delle abitazioni) e sociale.

Infine, in Figura 5 è mostrata la distribuzione geografica delle perdite economiche dirette medie per regione. Va osservato che le perdite dirette totali previste in una regione dipendono fortemente dall'esposizione in termini di edifici (o abitazioni), oltre che dalla pericolosità e dalla vulnerabilità delle strutture. Confrontando questa mappa con quelle di Figura 3 e Figura 4 (entrambe in percentuale) questo aspetto risulta evidente. In queste ultime, infatti, il rischio essendo in percentuale, non risente dell'esposizione ma essenzialmente della pericolosità e della vulnerabilità media. In Figura 5, invece, il rischio è riferito al numero totale di abitazioni danneggiate in ciascuna regione e pertanto risente molto dell'esposizione, ossia della densità abitativa nel territorio e della dimensione delle regioni.

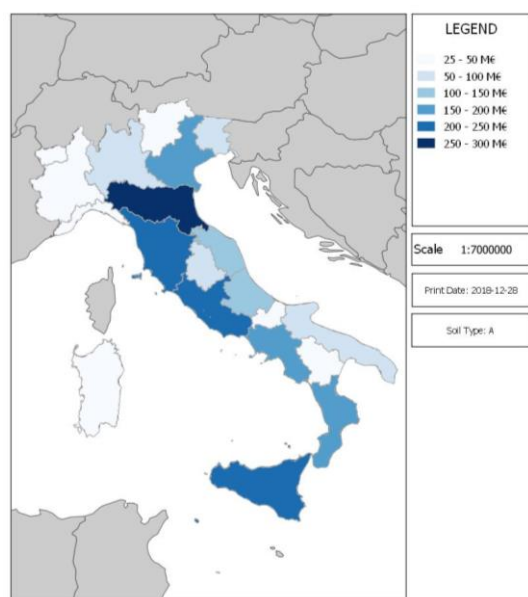


Figura 5. Mappa delle perdite economiche dirette medie attese in 1 anno per Regione

4 CONCLUSIONI

In questo articolo è stato presentato il lavoro svolto nel corso del 2018 dalla comunità scientifica attiva in ambito di ingegneria sismica al fine di produrre mappe di rischio sismico per l'intero territorio nazionale. Tali mappe sono contenute nel documento National Risk Assessment (NRA) di valutazione del rischio nazionale che il Dipartimento della protezione civile ha prodotto nell'ambito del "Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030" al quale l'Italia partecipa.

È interessante confrontare i risultati di cui sopra con la valutazione del rischio effettuata a livello mondiale dalla Fondazione GEM (Global Earthquake Model) (Silva et al. 2018) per l'Italia. Per quanto riguarda le perdite economiche dirette degli edifici residenziali, il valore ottenuto dalla Fondazione GEM è di 1,67 miliardi di dollari in 1 anno, in buon accordo con i 2,13 miliardi di euro della Tabella 9, tenendo conto del minore valore attribuito dalla Fondazione GEM al patrimonio dell'edilizia residenziale.

IRMA è in continua evoluzione: gli aggiornamenti in corso consentiranno di elaborare nuove mappe di rischio sismico che verranno pubblicate a fine 2020. In particolare è già stata inserita la possibilità di utilizzare come database di esposizione il dato ISTAT 2011 (il più recente disponibile a livello nazionale) al posto di quello del 2001 e verrà caricato il nuovo modello di pericolosità sismica in corso di validazione. Inoltre, al fine di migliorare la calibrazione delle curve di fragilità empiriche e di testare le curve analitiche, è in corso di aggiornamento anche la piattaforma Da.D.O., che consentirà di visualizzare e scaricare nuovi database di danno osservato, come quello relativo al terremoto della Garfagnana-Lunigiana del 2013 e, quando disponibile, quello del Centro-Italia del 2013.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento va al gruppo di EUCENTRE che ha sviluppato la piattaforma IRMA (Marco Pagano, Mauro Onida, Davide Quaroni e Diego Polli) e agli ingegneri Antonella Di Meo e Flavio Bocchi che l'hanno testata.

Il Gruppo di lavoro ReLUIIS è, nella lista degli autori di questo articolo, rappresentato solo dai coordinatori di ciascuna Unità. Un risultato così importante non poteva essere ottenuto in tempi molto brevi senza il prezioso contributo di tanti

collaboratori a cui va l'apprezzamento ed il ringraziamento degli autori. Si ringraziano quindi: per l'Unità di Genova Serena Cattari, Daria Ottonelli e Sabrina Vignolo; per l'Università di Napoli Carlo del Gaudio, Paola Ricci, Maria Polese, Marco di Ludovico; per l'Università di Padova Marco Donà, Pietro Carpanese e Veronica Follador; per l'Università di Pavia Maria Rota (EUCENTRE) e Annalisa Rosti; per il centro PLINIVS Francesco Cacace, Daniela De Gregorio, Francesca Linda Perelli.

RIFERIMENTI

- Albarello, D., Bosi, V., Brammerini, F., Lucantoni, A., Naso, G., Peruzza, L., Rebez, A., Sabetta, F. & Slejko, D., 2000. Carte di pericolosità sismica del territorio nazionale, *Quaderni di geofisica*, **12**.
- Bernardini, A., Gori, R., Modena, C., 2009. Manuale d'uso del programma Vulnus 4.0, versione Vb a cura di Valluzzi M.R.
- Bernardini, A, Lagomarsino, S, Mannella, A, Martinelli, A, Milano, L, Parodi, S., 2010. Fore-casting seismic damage scenarios of residential buildings from rough inventories: a case-study in the Abruzzo Region (Italy). *Proc. IMech E Part O: J. Risk and Reliability*, **224**, 279-296.
- Bolognini, D., Borzi, B., Pinho, R., 2008. Simplified pushover-based vulnerability analysis of traditional Italian RC precast structures. *Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China. Paper no. 09-01-0133.
- Borzi, B., Crowley, H., Pinho, R., 2008a. Simplified pushover-based earthquake loss assessment (SP-BELA) for masonry buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, **2**(4), 353-376.
- Borzi, B., Pinho, R., Crowley, H., 2008b. Simplified pushover-based vulnerability analysis for large scale assessment of RC buildings. *Engineering Structures*, **30**(3), 804-820.
- Borzi, B., Crowley, H., Pinho, R., 2008c. The influence of infill panels on vulnerability curves for RC buildings. *Proceeding of 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China. Paper no. 09-01-0111.
- Borzi, B., Faravelli, M., Onida, M., Polli, D., Quaroni, D., Pagano, M., Di Meo, A., 2018. Piattaforma Irma (Italian Risk MAs). *37esimo Convegno Nazionale GNGTS*. 19-21 Novembre 2018, Bologna.
- Cacace, F., Zuccaro, G, De Gregorio, D.,ì & Perelli, F.L., 2018. 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.
- Ceccarini, I., 1952. Composizione della casa, Hoepli.
- Corrado, V. et al. 2014. TABULA: Building Typology Brochure – Italy.
- Charvet, I., Ioannou, I., Rossetto, T., Suppasri, A., Imamura, F., 2014. Empirical fragility assessment of buildings affected by the 2011 Great East Japan tsunami using improved statistical models. *Natural Hazards*, **73**, 951-973.
- Coburn, A.W., Spence, R., 1992. Earthquake Protection. *John Wiley & Sons Ltd*, England.
- Del Gaudio, C., De Martino, G., Di Ludovico, M., Manfredi, G., Prota, A., Ricci, P., Verderame, G.M., 2017. Empirical fragility curves from damage data on RC buildings after the 2009 L'Aquila earthquake. *B. Earthq. Eng.*, **15**, 1425-1450. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0026-1>
- Del Gaudio, C., Rosti, A., Rota, M., Ricci, P., Penna, A., Verderame, G.M., 2019. Derivazione di curve di fragilità empiriche per edifici residenziali italiani c.a. *XVIII Convegno ANIDIS 2019 "L'ingegneria sismica in Italia"* (Ascoli Piceno, 15 settembre – 19 settembre 2019).
- Di Ludovico, M., Prota, A., Moroni, C., Manfredi, G., Dolce, M., 2017a. Reconstruction process of damaged residential buildings outside historical centres after the L'Aquila earthquake: part I— "light damage" reconstruction. *Bull Earthquake Eng*, **15**(2), 667-692, DOI 10.1007/s10518-016-9877-8.
- Di Ludovico M., Prota A., Moroni C., Manfredi G., Dolce M., 2017b. Reconstruction process of damaged residential buildings outside historical centres after the L'Aquila earthquake - part II: "heavy damage" reconstruction. *Bull Earthquake Eng*, **15**(2), 693-729, DOI 10.1007/s10518-016-9979-3.
- Di Pasquale, G., Orsini, G., Romeo, R., 2000. Sensitivity analysis in seismic risk assessment. *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation*. Palm Springs, CA.
- Decreto Legislativo 02/01/2018, n. 1 (Raccolta 2018) Codice della protezione civile. *GU 23-01-2018 Serie Generale n.18*.
- D.M. 14.01.2008. Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni. *G.U. 04.02.2008 n.29*.
- Dolce, M., Di Bucci, D., 2015. Comparing recent Italian earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI 10.1007/s10518-015-9773-7.
- Dolce, M., Speranza, E., Giordano, F., Borzi, B., Bocchi, F., Conte, C., Di Meo, A., Faravelli, M., Pascale, V., 2019. Observed damage database of past Italian earthquakes: the Da.D.O. Webgis. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, **60**(2), 141-164.
- Dolce, M., Speranza, E., Giordano, F., Borzi, B., Bocchi, F., Conte, C., Di Meo, A., Faravelli, M., Pascale, V., 2017. Da.D.O. – A web-based tool for analyzing and comparing post-earthquake damage database relevant to national seismic events since 1976. *Proceedings of the 17th Italian Conf on Earthq Eng ANIDIS*. Pistoia, Italy.
- Donghi, D., 1905. Manuale dell'architetto, Utet.
- Gruppo di lavoro MS, 2008. Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Provincie autonome. Dipartimento della Protezione Civile. 3 volumes and CDROM.
- ISTAT Italian National Institute of Statistics, 2001 – 14° Censimento della popolazione – Istruzioni per il rilevatore - Roma , 2001
- Italian Civil Protection Department, 2018. National Risk Assessment 2018. Overview of the potential major disasters in Italy. Updated December 2018.
- GNDT- ING-SSN, 1996. Risultati dell'analisi di rischio sismico per tutta la nazione riferita al patrimonio

- abitativo. Elaborazioni basate sui dati ISTAT 1991. Roma. Pubblicato in http://www.dstn.it/ssn/PROG/G_RISCHI/Index_f.html
- Grünthal, G. (ed.), Musson, R.M.W., Schwarz, J., Stucchi M., 1998. European Macroseismic Scale. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15 - European Macroseismic Scale 1998. European Centre for Geodynamics and Seismology, Luxembourg.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull Earthquake Eng*, 4(4), 415-443.
- Lagomarsino, S., Cattari, S., 2014. Fragility functions of masonry buildings (Chapter 5). *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*. K. Pitilakis, H. Crowley, A.M. Kaynia (eds.), Springer.
- Lucantoni, A., Bosi, V., Brammerini, F., De Marco, R., Lo Presti, T., Naso, G., Sabetta, F., 2001. Il rischio sismico in Italia. *Ingegneria Sismica*, 1, 5-35.
- Maio, R., Tsionis, G., 2016. Seismic fragility curves for the European building stock: review and evaluation of analytical fragility curves. *EUR 27635 EN*. DOI:10.2788/586263.
- Margottini, C., Molin, D., Narcisi, B., Serva, L., 1992. Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data. *Engineering Geology*, 33, 45-48.
- Michelini, A., Faenza, L., Lauciani, V., Malagnini, L., 2008. Shakemap implementation in Italy. *Seismological Research Letters*, 79, 688-697.
- Moretti, B., 1946. Ville. 68 Esempi di ville e case di campagna, Hoepli.
- Moretti, B., 1947. Case d'abitazione in Italia, Hoepli.
- OPCM n.3519 del 28.04.2006. Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle stesse zone, *G.U. 11.05.2006 n.108*
- Rota, M., Penna, A., Strobbia, C.L., 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 28, 933-947.
- Rosti, A., Rota, M., Magenes, G., Penna, A., 2019. Derivazione di curve di fragilità empiriche per edifici residenziali in muratura. *Atti XVIII Convegno nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, ANIDIS 2019, Ascoli Piceno.
- Rosti, A., Rota, M., Penna, A., 2018. Damage classification and derivation of damage probability matrices from L'Aquila (2009) post-earthquake survey data. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3687-3720.
- Sabetta, F., Goretti, A., Lucantoni, A., 1998. Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground motion. *11th European Conference on Earthquake Engineering*. Paris, CD-ROM, ISBN 90 5410 982 3, Balkema.
- Silva, V., Amo-Oduro, D., Calderon, A., Dabbeek, J., Despotaki, V., Martins, L., Rao, A., Simionato, M., Vigano, D., Yepes-Estrada, C., Acevedo, A., Crowley, H., Horspool, N., Jaiswal, K., Journeay, M., Pittore, M., 2018. Global Earthquake Model (GEM). *Seismic Risk Map (version 2018.1)*, DOI: 10.13117/GEMGLOBAL-SEISMIC-RISK-MAP-2018.
- Spence, R., So, E., Scawthorn, C., 2011. Human Casualties in Earthquakes: Progress in Modelling and Mitigation. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Springer, Netherlands.
- Stucchi, M., Akinci, A., Faccioli, E., Gasperini, P., Malagnini, L., Meletti, C., Montaldo, V., Valensise, G., 2004. Mappa di Pericolosità sismica del territorio Nazionale http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/rapporto_conclusivo.pdf (in italian).
- Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Crowley, H., Calvi, G.M., Boschi, E., 2011. Seismic hazard assessment (2003-2009) for the Italian building code. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 1885-1911.
- Zuccaro, G., 2004. Inventory and vulnerability of the residential buildings in Italy. Risk maps and socio-economic losses. Final Report SAVE Project, Task 1 -. GNDT, Roma.
- Zuccaro, G., Cacace, F., 2011. Seismic Casualty Evaluation: the Italian Model, an Application to the L'Aquila 2009 Event, in R. Spence et al. (eds.), *Human Casualties in Earthquakes, Advances in Natural and Technological Hazards Research* 29, DOI 10.1007/978-90-481-9455-1_12, c Springer Science+Business Media B.V.
- Zuccaro, G., Cacace, F., 2015. Seismic vulnerability assessment based on typological characteristics. The first level procedure "SAVE". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 69, 262-269.