

FAUSTO MARINCIONI<sup>1</sup>, MICHELE MARCONI<sup>2</sup>

## MAPPARE LA VULNERABILITÀ SISMICA DEGLI EDIFICI NELLA REGIONE MARCHE; UN MODELLO EMPIRICO DI PREVISIONE BASATO SU GIS

### *Introduzione*

Ogni secolo in Italia accadono uno o due grandi eventi sismici con magnitudo superiori a 7 e molti altri terremoti di minor energia, seppur capaci di produrre danni e distruzione (GUIDOBONI, VALENSISE, 2011). Le numerose faglie attive lungo la penisola rendono difficile prevedere dove e quando avverranno i prossimi terremoti e non potendo ridurre il pericolo sismico collegato ai movimenti tettonici, una concreta strategia per ridurre il rischio sismico in Italia è quella di ridurre la vulnerabilità sismica, ossia l'esposizione della popolazione e delle sue infrastrutture (KENNY, 2009; ROTA, PENNA, STROBBIA, 2008; MARANO, WALD, ALLEN, 2010). In effetti, il rapporto fra l'energia rilasciata da un terremoto e i danni prodotti è strettamente legato alle caratteristiche dell'ambiente costruito, fra cui qualità, elasticità e fragilità delle costruzioni (KENNY, 2009).

Il patrimonio edilizio italiano è caratterizzato da una grande vulnerabilità sismica, originata da diversi fattori, fra cui la modesta qualità costruttiva di molti edifici nelle aree rurali e piccoli centri urbani e la vetustà di numerosissime altre costruzioni che, sebbene di gran pregio architettonico, non sono adeguatamente tutelate dai terremoti. Giocano poi un ruolo importante anche le trascuratezze nell'edificato contemporaneo e la scarsa qualità delle costruzioni pubbliche, fra cui le scuole, che al contrario dovrebbero essere rigorosamente monitorate e messe in sicurezza. Infine, anche l'ubicazione di costruzioni in siti inadatti gioca un ruolo importante nel definire il grado di vulnerabilità sismica delle abitazioni. Spesso l'edificato è ubicato in siti già dissestati da frane, che vengono poi riattivate dai terremoti. Questa preesistente ed elevata vulnerabilità sismica dell'edificato continua a causare disastri sismici in Italia, anche negli ultimi decenni, quando tecniche di costruzioni più moderne hanno sensibilmente migliorato la risposta sismica dei nuovi edifici (GUIDOBONI, VALENSISE, 2011).

---

<sup>1</sup> Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Scienze della vita e dell'ambiente; f.marincioni@univpm.it.

<sup>2</sup> Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Scienze della vita e dell'ambiente; mik.marconi@gmail.com.

La valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici è quindi una delle attività più importanti nella mitigazione del rischio sismico. Questa stima di vulnerabilità può essere condotta a diverse scale, variando dal singolo edificio fino all'intero insieme di edifici in una certa regione. I metodi per stimare la vulnerabilità sismica sono generalmente distinti in tre gruppi: metodi basati sul giudizio di esperti; metodi di tipo analitico; e metodi di tipo empirico (ROTA, PENNA, STROBBIA, 2008). Esistono anche numerosi esempi di approccio ibrido che combinano i diversi elementi di questi tre gruppi (GIOVINAZZI, LAGOMARSINO, 2006; KAPPOS, PANAGOPOULOS, PANAGIOTOPOULOS, PENELIS, 2006).

I metodi basati sul giudizio degli esperti stimano la vulnerabilità attraverso analisi statistiche di informazioni ottenute da squadre di professionisti a cui è stato chiesto di valutare i potenziali danni che edifici di varia tipologia subirebbero se sottoposti a dati livelli di scuotimento sismico (ATC, 2008). Tali metodi non sono limitati dalla disponibilità di dati, tuttavia dipendono strettamente dall'esperienza degli esperti coinvolti, che potrebbe determinare valutazioni inconsistenti o erranee.

I metodi analitici al contrario determinano univocamente le curve di vulnerabilità di uno o più edifici attraverso l'elaborazione di modelli numerici di tipo ingegneristico strutturale (CALVI, 1999; CROWLEY, PINHO, BOMMER, 2004). Tuttavia per analisi su larga scala tale approccio richiede grandi quantità di dati e capacità computazionali estremamente impegnative e che richiedono lunghi tempi di analisi. L'efficacia di tali metodologie è limitata anche dalla non disponibilità dei valori di certi parametri necessari al modello numerico strutturale adottato.

I metodi empirici utilizzano come fonte dati principale i danni censiti dopo l'evento sismico e li elaborano statisticamente per ricavare indici di vulnerabilità sismica degli edifici (ROTA, PENNA, STROBBIA, 2008, GIOVINAZZI, LAGOMARSINO, 2006; GRIMAZ, MERONI, PETRINI, TOMASONI, ZONNO, 1997). I dati usati in questi metodi sono ricavati dalle osservazioni dirette che tengono in considerazione sia le caratteristiche dell'edificato sia l'energia che scuote il terreno. Tuttavia anche per questo ultimo gruppo di metodi di stima della vulnerabilità esistono limitazioni, fra cui la natura eterogenea dei dati raccolti. Inoltre, i parametri misurati cambiano da luogo a luogo (anche dati diverse fra loro) e nel tempo (progredire della conoscenza sui terremoti). Questo è un problema in quanto i metodi empirici richiedono l'elaborazione di numerosi record comparabili fra loro, al fine di validare statisticamente il modello risultante.

Il presente studio sviluppa un modello empirico che confronta e integra i dati relativi ai danni strutturali raccolti dopo il terremoto Marche-Umbria del 1997 con magnitudo momento (Mw) 6,1 ed epicentro a Colfiorito nel comune di Foligno, con i dati sulle condizioni dell'edificato nella regione Marche raccolti durante il censimento dell'Istituto Nazionale di Statistica condotto nel 2001.

*Area e metodo di studio*

La regione Marche copre una superficie di 9401 chilometri quadrati che estende dall'Appennino al Mare Adriatico. È abitata da circa un milione e mezzo di persone (densità abitativa di 165 abitanti per chilometro quadrato), anche se il 50% della popolazione è concentrata lungo il litorale adriatico (che rappresenta un settimo del territorio). La conformazione fisica di questa regione è il risultato della chiusura dell'oceano Ligure, avvenuta durante il Neogene a causa della subduzione della placca africana sotto quella euroasiatica (TAVARNELLI, 1997). La collisione tra le due placche continentali ha dato origine a un sistema di pieghe incurvate e parallele, con la convessità orientata verso la costa adriatica e che costituiscono le tre principali strutture fisiografiche della regione: la catena montuosa dell'Appennino umbro-marchigiano a ovest (che costituisce il 31% del territorio), la fascia collinare e la linea di costa a est (DEIANA, PIALLI, 1996). Le aree di pianura sono nei fatti inesistenti e limitate alla sottile fascia litorale e in prossimità delle pianure alluvionali dei fiumi che scorrono dall'appennino al mare.

Per quanto concerne il metodo di ricerca, l'assunto di base di questo studio è che l'effetto o danno potenziale (rischio), derivante da un terremoto (pericolo), dipende, oltre che severità dell'evento stesso, anche da certe caratteristiche intrinseche degli elementi esposti (vulnerabilità; ALEXANDER, 2003). Il presente studio assume che la relazione tra danno, pericolo e vulnerabilità, segua una funzione matematica di tipo logistico, ossia una curva che descrive una forma ad "S" di crescita. Nello specifico, la forma della funzione, la posizione delle soglie e la pendenza della parte di crescita esponenziale, è definita dalle caratteristiche che descrivono la vulnerabilità della popolazione e degli edifici soggetti al terremoto. La funzione logistica usata per la stima del danno sismico è la seguente:

$$Danno = \frac{D_{max}}{1 + \left(\frac{D_{max}}{D_{min}} - 1\right) * e^{-S * V}} \quad [1]$$

Dove:

–“Dmax” è il livello massimo di danno, che nel nostro caso assumiamo uguale a 1 ovvero alla distruzione di tutti gli edifici;

–“Dmin” è il livello minimo di danno provocato da una scossa sismica. Tale valore teoricamente è uguale a 0; tuttavia per risolvere analiticamente l'equazione [1] è possibile accettare solo valori che tendono a 0;

–“e” è il numero di Nepero ( $\approx 2,718$ );

–“S” è la magnitudo o misura dell'energia rilasciata da terremoto (severità del pericolo sismico);

–“V” indica la vulnerabilità sismica della popolazione e degli edifici colpiti dal sisma. Essa è definita secondo caratteristiche intrinseche degli edifici,

quali ad esempio: età, materiale di costruzione, altezza, contiguità con altri edifici.

Infine, ponendo la seguente condizione:

$$R = \ln \left( \frac{\frac{1}{D_{min}} - 1}{\frac{1}{Danno} - 1} \right) \quad [2]$$

Dove “R” è il rischio sismico, è possibile riscrivere l’equazione [1] come di seguito:

$$V = \frac{R}{S} \quad [3]$$

Poiché la vulnerabilità sismica “V” è determinata da diversi parametri, l’equazione [3] può essere riscritta come di seguito:

$$V_1^\alpha * V_2^\beta * V_3^\gamma * \dots * V_n^v = \frac{R}{S} \quad [4]$$

Dove:

– “Vn” è uno degli n parametri che determinano la vulnerabilità sismica di un edificio;

– “α”, “β”, “γ”, “v” sono i coefficienti di regressione di ciascun parametro che definiscono il peso delle diverse componenti.

È necessaria, infine, una trasformazione logaritmica per risolvere linearmente l’equazione [4] e determinare il valore dei coefficienti e dell’intercetta “k” per cui la funzione modellata meglio descrive la realtà:

$$\alpha * \ln(V_1) + \beta * \ln(V_2) + \gamma * \ln(V_3) + \dots + v * \ln(V_n) + k = \ln\left(\frac{R}{S}\right) \quad [5]$$

Tre tipologie di dato sono necessarie per risolvere questa equazione: (A) parametri che determinano la vulnerabilità sismica di un edificio; (B) i danni al patrimonio edilizio causati da un determinato terremoto; (C) parametri fisici che definiscono l’energia rilasciata da tale terremoto. In concreto, per questo studio sulla vulnerabilità sismica della regione Marche, sono state raccolte le informazioni di seguito descritte.

(A) Vulnerabilità sismica edifici. Per ogni fabbricato è stato identificato: (i) età, (ii) materiale di costruzione, (iii) numero dei lati che un edificio condivide con altre costruzioni (contiguità) e (iv) numero dei piani di un edificio (altezza). Questi dati sono stati estrapolati dal censimento della popolazione e degli edifici svolto dall’ISTAT nel 2001. I parametri raccolti dalla banca dati del censimento 2001 sono riportati nella tabella 1.

(B) Danni al patrimonio edilizio causati dal terremoto Marche-Umbria del 26 settembre 1997 con epicentro a Colfiorito nel comune di Foligno. Per ogni comune della regione Marche è stato calcolato il numero di edifici: inagibili (I), parzialmente inagibili (Ip), temporaneamente inagibili (It), e agibili in seguito

a operazioni di pronto intervento ( $A_{pi}$ ). Al fine di misurare il valore del rischio “R” (equazione [5]) è stato calcolato per ogni comune della regione Marche l’indice di “Danno”, applicando la formula seguente:

$$Danno = \frac{(I + 0.5 * (I_p + I_t) + 0.1 * A_{pi})}{Edifici\ totali}$$

I dati sono stati forniti dal Centro funzionale della Protezione civile della regione Marche, tramite l’accesso alle circa 23.000 schede AeDES (acronimo che significa “agibilità e danno nell’emergenza sismica”) compilate per il rilevamento dei danni, pronto intervento e agibilità per gli edifici ordinari nell’emergenza post sismica.

(C) Energia rilasciata dal terremoto. Dalla banca dati ISIDe (Instrumental Seismological Instrumental and Parametric Data-Base) dell’Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia è stata ricavata la magnitudo e le coordinate geografiche dell’ipocentro del terremoto Marche-Umbria del 1997. Successivamente, usando il software ESRI ArcGIS è stata applicata la legge di attenuazione sismica (SABETTA, PUGLIESE, 1996) per calcolare il valore medio della componente verticale del picco di accelerazione al suolo (in  $ms^{-2}$ ) per ciascun comune del territorio marchigiano. Tale valore è necessario per definire la severità del pericolo sismico “S” nell’equazione [5].

CATEGORIA	VARIABILE (espressa in % sul totale degli edifici)		
ETÀ E MATERIALE DI COSTRUZIONE	Costruiti prima del:	1919	Muratura
		1946	
		1961	
		1971	
		1981	
		1991	
		2001	
		1919	Calcestruzzo
		1946	
		1961	
		1971	
		1981	
		1991	
		2001	
CONTIGUITÀ	su un lato		
	su due o più lati		
	senza contiguità		
ALTEZZA EDIFICIO	due o più piani		
	tre o più piani		
	quattro o più piani		
	cinque o più piani		

Tabella 1. Elenco dei parametri raccolti dalla banca dati del censimento 2001 (ISTAT)

Inoltre, sempre utilizzando il software ESRI ArcGIS, in particolare lo script “Ordinary Least Squares”, sono state analizzate tutte le combinazioni possibili tra i parametri che esprimono la vulnerabilità e gli indici “S” e “R” ed il risultato ha prodotto ben 588 regressioni lineari (modelli logistici). Di conseguenza, al fine di poter determinare quale modello usare, è stato necessario valutare una serie d’indici statistici volti a determinare la qualità del modello. In particolare, sono stati computati: il coefficiente di determinazione (definisce l’aderenza tra il modello e la realtà); l’indice VIF (indica ridondanza tra le variabili quando computa valori maggiori di 7); l’indice Joint F-Statistic (indica la significatività statistica del modello); l’indice Joint Wald (indica la robustezza statistica del modello); l’indice Koenker-BP (determina la presenza di errori sistematici e di varianza nell’analisi di regressione lineare).

Delle 588 regressioni sono state eliminate quelle con l’indice di Koenker (BP) significativo (e che quindi presentavano errori sistematici e di varianza), quelle con Joint Wald e Joint F-Statistic non significativi (cioè i modelli né significativi né robusti) e quelle con una o più variabili con indice VIF maggiore di 7 (quindi con variabili ridondanti). Infine, fra le regressioni rimanenti è stata scelta quella con il coefficiente di determinazione più alto, cioè il modello che meglio si adattava alla situazione reale.

La validazione finale del modello è stata ottenuta mappando la deviazione tra l’“Indice di danno” riportato dalle schede AeDES e il “Danno” calcolato applicando il modello selezionato.

### *Risultati*

Il modello di regressione selezionato è composto dalle seguenti quattro variabili rappresentanti il numero degli edifici (espresso in percentuale) con le seguenti caratteristiche costruttive: muratura prima del 1971 (V1); calcestruzzo prima del 1946 (V2); alti due o più piani (V3); contigui su un lato (V4). La vulnerabilità sismica di un edificio secondo il modello selezionato è quindi uguale a:

$$V = 2.079 * V_1 + 2.374 * V_2 + 0.864 * V_3 + 1.151 * V_4 + 0.563$$

Andando a sostituire nell’equazione [1] i valori della vulnerabilità sismica degli edifici e il valore medio della componente verticale del picco di accelerazione al suolo, ricavati per ciascun comune considerato, otteniamo un modello empirico del “danno atteso” nei vari comuni marchigiani a seguito di un sisma con le stesse caratteristiche di quello Marche-Umbria del 1997 (fig. 1).

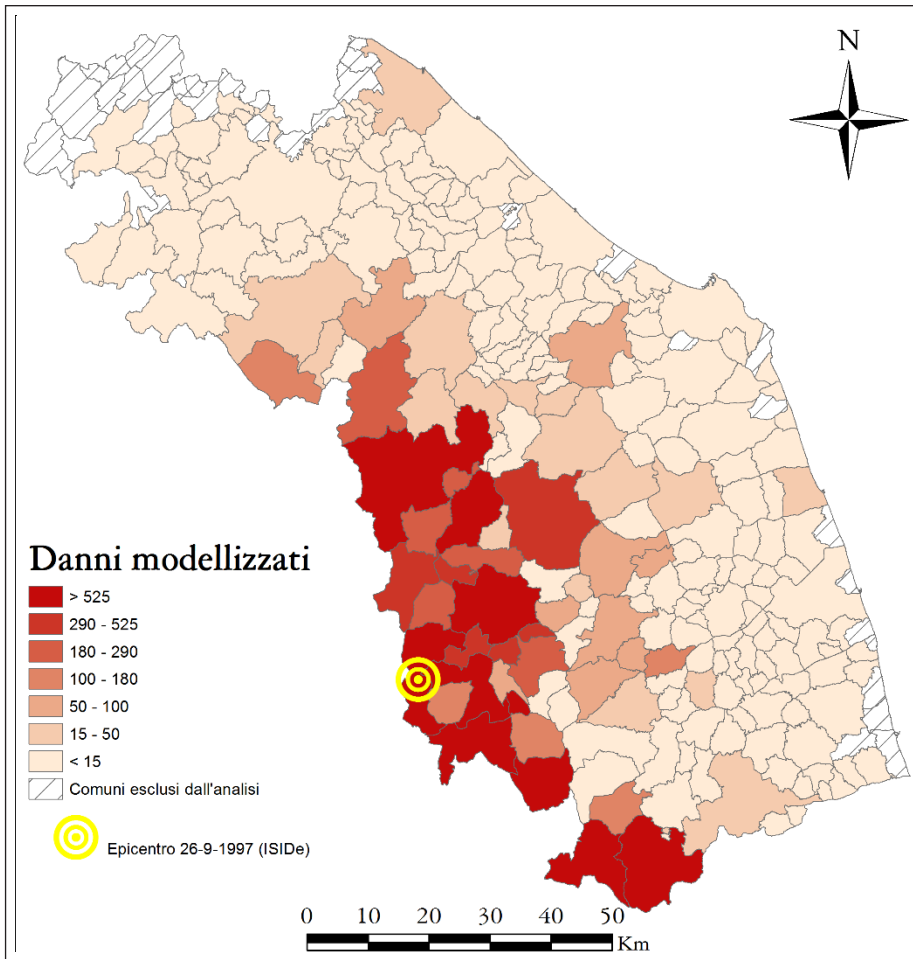


Figura 1. Danni attesi dal terremoto Marche-Umbria del 1997 secondo il modello della vulnerabilità sismica sviluppato nel presente studio. Le categorie nella legenda rappresentano il numero di edifici inagibili nei vari comuni della regione Marche

Tale modello ha un coefficiente di determinazione pari a 0.7662, l'indice Joint F-Statistic e Joint Wald sono entrambi significativi mentre l'indice Koenker (BP) non è significativo (valori riportati in tab. 2).

La deviazione tra modello e realtà (danni reali misurati dopo il terremoto Marche-Umbria del 1997) è contenuta sotto il valore 0,5 di deviazioni standard sulla maggior parte del territorio regionale (fig. 2). Il modello sembra sovrastimare i danni nelle immediate prossimità dell'epicentro e nei comuni più lontani, mentre sottostima i danni in una piccola fascia centrale compresa fra epicentro e comuni più lontani.

Variabile	Coeff.	Errore standard	Robustezza	VIF
Intercetta	0.563	0.454955	0.0173*	-
Edifici in muratura costruiti prima del 1971	2.079	0.393174	0.0000*	1.47
Edifici in calcestruzzo costruiti prima del 1946	2.374	0.724196	0.0001*	1.35
Edifici su più piani	0.864	0.619084	0.0498*	1.05
Edifici con un lato contiguo	1.151	0.492443	0.0045*	1.28
Indice statistico		Prob.		
Coefficiente di determinazione	0.7662			
Joint F-statistic	17.2797	(>F)	0.00000*	
Joint Wald	129.3419	(>chi squared)	0.00000*	
Koenker (BP)	2.9570	(>chi squared)	0.706611*	
* significativo ( $p < 0.05$ )				

Tabella 2. Risultati statistici

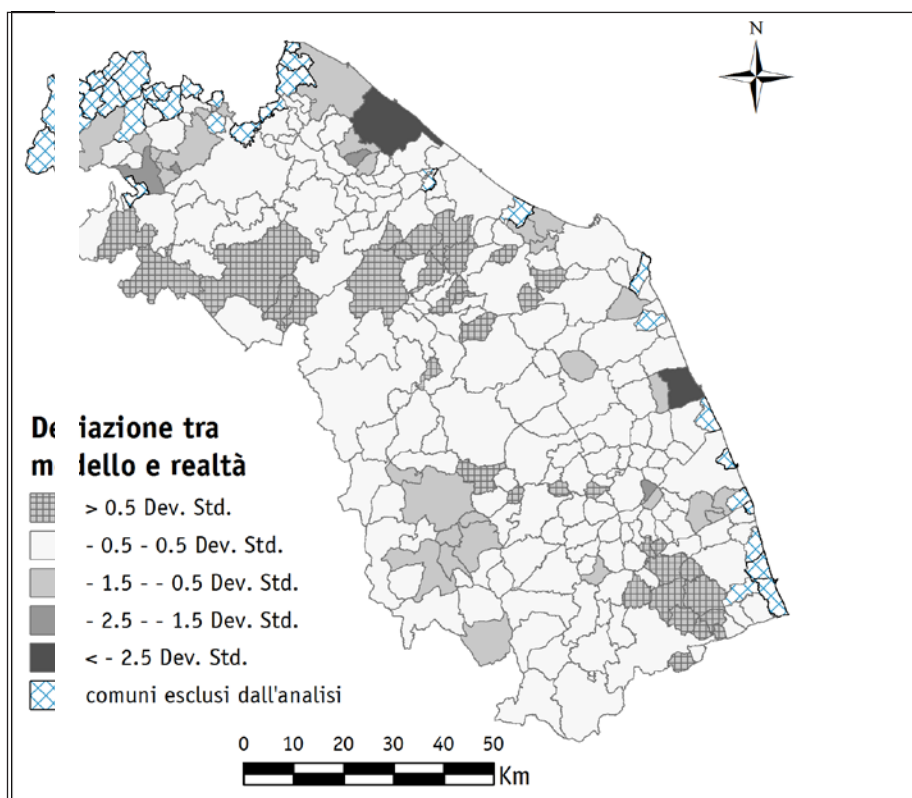


Figura 2. Discrepanza tra i danni modellizzati e quelli realmente rilevati dopo il terremoto Marche-Umbria del 1997. I comuni chiari sono quelli dove il discostamento tra modello e realtà è minore a 0.5 deviazioni standard. I comuni in scuro sono le zone dove il modello si discosta maggiormente dal danno misurato (il retino indica una sovrastima, mentre senza retino il modello sottostima il danno). La concentrazione delle aree scure nelle immediate vicinanze dell'epicentro è probabilmente dovuta al fatto che la legge di attenuazione sismica di Sabetta e Pugliese incrementa i valori di PGA nelle immediate vicinanze dell'epicentro

Infine, la sovrapposizione del suddetto modello di vulnerabilità con le mappe di pericolosità sismica della regione Marche ha permesso di sviluppare mappe del rischio sismico indicanti la distribuzione spaziale dei potenziali danni, simulando diverse magnitudo e diversi epicentri. Nella figura successiva è visualizzata una simulazione dei danni che si registrerebbero a seguito di un terremoto di magnitudo 6 con un ipotizzato ipocentro all'interno di ciascuna sezione di censimento ISTAT (fig. 3). Tale simulazione mostra come un terremoto di magnitudo uguale o maggiore di 6 creerebbe già gravi danni all'edificato in molte zone della regione Marche. Il modello evidenzia valori più bassi di vulnerabilità strutturale nella fascia litoranea, la quale, seppur densamente abitata, ha costruzioni più moderne rispetto alla fascia appenninica.

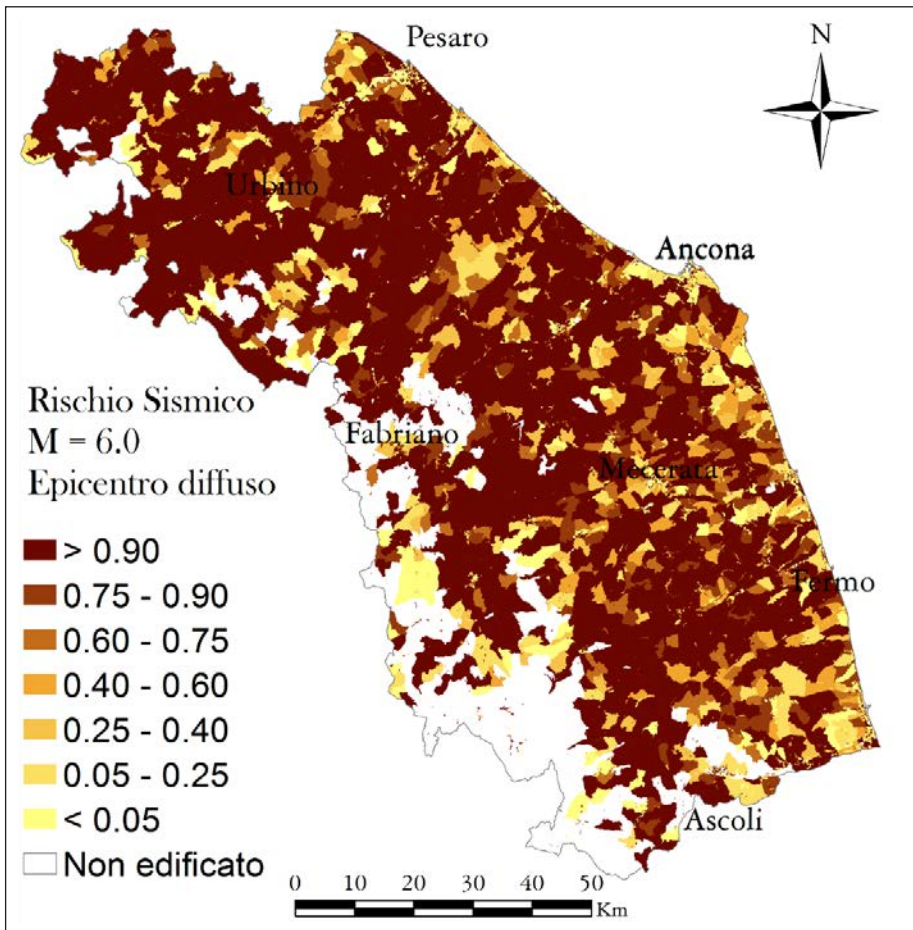


Figura 3. Rischio sismico nella regione Marche; simulazione dei danni che si registrerebbero se ogni sezione del censimento ISTAT venisse colpita da un terremoto di magnitudo momento 6

*Discussione*

Il modello di previsione della vulnerabilità sismica degli edifici nella regione Marche basato su GIS del presente studio, ha prodotto i risultati attesi e confermato le criticità già conosciute. Per esempio, il modello ha evidenziato che le case in calcestruzzo sono meno vulnerabili delle costruzioni in muratura portante, come già evidenziato in altri studi (GIOVINAZZI, LAGOMARSINO, 2006; CALVI, 1999). Le costruzioni in calcestruzzo più vulnerabili sono quelle costruite prima del 1946, mentre per quelle in muratura portante il periodo di costruzione con maggiore vulnerabilità si estende fino al 1971. Infatti, nei primi anni Settanta l'Italia per la prima volta adottò in maniera organica una serie di norme e codici anti sismici, fra cui, la Legge 1086 del 5 novembre 1971 «Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso e a struttura metallica» (Gazzetta Ufficiale n 321, del 21 dicembre 1971) e la Legge 64 del 2 febbraio 1974 «Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche» (Gazzetta Ufficiale n.76 del 21 marzo 1974). Quindi, il presente studio conferma, insieme ad altri lavori (GIOVINAZZI, LAGOMARSINO, 2006; BELLICOSO, 2011), che la promulgazione e implementazione del suddetto impianto normativo riuscì a diminuire la vulnerabilità sismica degli edifici in Italia a partire dagli anni Settanta.

Per quanto concerne l'altezza degli edifici, altro parametro considerato nel discusso modello di previsione, i risultati dello studio evidenziano che gli edifici con un numero di piani uguale o superiore a due sono più vulnerabili di quelli con un piano solo (D'AYALA, SPERANZA, 2003). A tal proposito sarebbe stato interessante poter verificare lo stato di vulnerabilità degli edifici che hanno subito elevazioni successive alla loro data di costruzione. Purtroppo dalle schede di censimento ISTAT non è possibile capire se l'altezza corrente di un edificio sia quella originale o derivi da piani aggiuntivi costruiti in tempi successivi. Tale informazione potrebbe aumentare la qualità del modello di vulnerabilità qui prodotto. Infatti, una casa progettata e costruita su più piani fin dall'inizio è sicuramente meno vulnerabile di un edificio modificato e comunque non conforme al progetto originario, come nel caso di numerosi edifici nei piccoli centri storici nell'entroterra marchigiano.

L'ultimo parametro considerato nel modello logistico, concerne la contiguità tra edifici. Quelli senza contiguità o con più lati contigui ad altri edifici sono risultati meno vulnerabili di quelli con un singolo lato contiguo. In effetti, la contiguità di edifici eterogenei è stata già individuata come fattore importante nel modulare la vulnerabilità sismica degli edifici (D'AYALA, SPERANZA, 2003). Anche in questo caso, le informazioni ricavate dal censimento ISTAT riguardante la contiguità sarebbero state molto più efficaci se avessero permesso di capire se le attuali piante (forme) degli edifici siano quelle originali o derivino da aggiunte laterali di vani costruiti successivamente.

Le differenze riscontrate tra i danni reali stimati con le schede di valutazione post sisma AeDES del terremoto Marche-Umbria del 1997 e il

risultato dell'applicazione del modello di vulnerabilità sismica discusso in questo articolo, sono principalmente localizzate sia nell'immediata vicinanza dell'epicentro, sia nei comuni più lontani da questo. È probabile che tal effetto sia dovuto al margine di errore insito nell'applicazione della legge di attenuazione sismica Sabetta-Pugliese utilizzata nel modello. In effetti, nel presente lavoro a causa della mancanza di mappe di microzonazione sismica, non viene considerato l'importante effetto prodotto da suolo e substrato roccioso nella propagazione delle onde sismiche. La creazione di un mosaico di mappe microsismiche che coprano la regione Marche permetterebbe di limitare il margine d'incertezza prodotto dall'applicazione della suddetta tale legge di attenuazione sismica.

### *Conclusioni*

Il modello empirico per la stima e mappatura della vulnerabilità sismica degli edifici discusso in questo articolo rappresenta un approccio speditivo ed economico per una valutazione veloce del rischio e dei potenziali danni derivanti da un terremoto in una certa località. Considerando che il database dei censimenti ISTAT copre l'intero territorio italiano ed è omogeneamente aggiornato ogni dieci anni, un tale metodo potrebbe essere facilmente esteso su scala nazionale. Inoltre, il modello potrebbe essere sensibilmente migliorato se nei futuri censimenti ISTAT venissero raccolte informazioni relative alla tipologia costruttiva degli edifici, regolarità e difformità in elevazione e pianta, nonché eventuali migliorie strutturali successive alla costruzione (per esempio catene e barbacani).

L'integrazione del suddetto modello empirico in ambiente GIS permette veloci analisi del rischio. Per esempio, la sovrapposizione del modello di vulnerabilità con mappe di pericolosità sismica permetterebbe di sviluppare mappe del rischio sismico, indicanti la potenziale distribuzione spaziale dei danni alle strutture e alle persone, simulando diverse magnitudo e diversi epicentri. Un esempio di questo tipo di output è stato presentato e discusso nella figura 3. L'applicazione del GIS rende anche più semplice il monitoraggio e l'aggiornamento dei dati relativi alle condizioni di vulnerabilità degli edifici, nonché della popolazione, nel caso si volessero inserire dati di resilienza e capacità di adattamento della comunità locale al pericolo.

Indubbiamente, la Protezione civile e molte amministrazioni pubbliche già usano sistemi GIS nelle loro analisi della vulnerabilità, rischio e resilienza, sebbene in Italia queste applicazioni siano ancora sporadiche e inconsistenti. Lo sviluppo di standard che rendano questi sistemi e relativi output comparabili alle varie scale giurisdizionali (comune, regione, stato, internazionale), permetterebbe da un lato di costruire scenari di rischio e dall'altro di validare e testare l'efficacia di diverse strategie di gestione e riduzione del rischio disastri. A questo riguardo, la simulazione riportata nella figura 3 mette chiaramente in

evidenza differenti necessità di attività prevenzione e riduzione del rischio disastri tra la fascia costiera e quella appenninica della regione Marche. Inoltre, essendo l'interno di questa regione scarsamente popolato, eccetto per Urbino, Fabriano e la fascia intermedia tra Macerata e Ascoli Piceno, un eventuale terremoto in queste aree richiederebbe degli interventi di protezione civile relativamente contenuti e circoscritti. Per di più, essendo il problema principalmente di natura strutturale, vecchi edifici costruiti prima della normativa antisismica, un piano di migliorie strutturali (retrofitting) del patrimonio edilizio di queste zone appenniniche, oltre che auspicabile sarebbe di entità contenuta in termini di costi e potrebbe concretamente ridurre il problema della vulnerabilità sismica nella regione Marche.

#### BIBLIOGRAFIA

- DAVID ERIC ALEXANDER, *Natural disasters*, New York, Springer Science & Business Media, 1993.
- ATC (Applied Technology Council) 21, *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazard - A Handbook*, Redwood City, FEMA, 1988.
- ALESSANDRA BELLICOSO, *Italian anti-seismic legislation and building restoration*, in «International Journal for Housing Sciences», XXXV (2011), n. 3, pp. 137-147.
- GIAN MICHELE CALVI, *A displacement based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings*, in «Journal of Earthquake Engineering», III (1999), n. 3, pp. 411-438.
- HELEN CROWLEY, RUI PINHO, JULIAN J. BOMMER, *Probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation*, in «Bulletin of Earthquake Engineering», II (2004), pp. 173-219.
- DINA D'AYALA, ELENA SPERANZA, *Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings*, in «Earthquake Spectra», XIX (2003), n. 3, pp. 479-509.
- GIOVANNI DEIANA, GIAMPAOLO PIALLI, *Le province strutturali dell'Appennino Umbro-Marchigiano*, in «Memorie della Società Geologica Italiana», L (1996), pp. 27-36.
- SONIA GIOVINAZZI, SERGIO LAGOMARSINO, *Vulnerability Methods and Damage Scenario for Seismic Risk Analysis as Support to Retrofit Strategies: an European Perspective*, in «Atti del Convegno New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE) Conference 2006», Paper Number 14, <http://hdl.handle.net/10092/439>.
- STEFANO GRIMAZ, FABRIZIO MERONI, VINCENZO PETRINI, RICCARDO TOMASONI, GAETANO ZONNO, *Il ruolo dei dati di danneggiamento del terremoto del Friuli nello studio di modelli di vulnerabilità sismica degli edifici in muratura*, in «La scienza e i terremoti», Udine, Forum Editore, 1997, pp. 89-96.
- EMANUELA GUIDOBONI, GIANLUCA VALENSISE, *Il peso economico e sociale dei disastri sismici in Italia negli ultimi 150 anni*, Bologna, Bononia University Press, 2011.
- ANDREAS J. KAPPOS, GEORGIOS PANAGOPOULOS, CHRISITOS PANAGIOTOPOULOS, GREGORIOS PENELIS, *A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings*, in «Bulletin of Earthquake Engineering», IV (2006), n. 4, pp. 391-413.
- CHARLES KENNY, *Global Why Do People Die in Earthquakes? The Costs, Benefits and Institutions of Disaster Risk Reduction*, in «Developing Countries», Washington, The World Bank, Policy Research Work Paper 4823, 2009 (<http://preventionweb.net/go/8462>).
- KRISTIN D. MARANO, DAVID J. WALD, TREVOR I. ALLEN, *Global earthquake casualties due to secondary effects: a quantitative analysis for improving rapid loss analyses*, in «Natural Hazards», LII (2010), pp. 319-328.

- MARIA ROTA, ANDREA PENNA, CLAUDIO LUCIANO STROBBIA, *Processing Italian damage data to derive typological fragility curves*, in «Soil Dynamics and Earthquake Engineering», XXVIII (2008), pp. 933-947.
- FABIO SABETTA, ANTONIO PUGLIESE, *Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions*, in «Bulletin of the Seismological Society of America», LXXXVI (1996), n. 3, pp. 337-352.
- ENRICO TAVARNELLI, *Structural evolution of a foreland fold-and-thrust belt: the Umbria-Marche Apennines, Italy*, in «Journal of Structural Geology», XIX (1997), n. 3-4, pp. 523-534.

MAPPARE LA VULNERABILITÀ SISMICA DEGLI EDIFICI NELLA REGIONE MARCHE; UN MODELLO EMPIRICO DI PREVISIONE BASATO SU GIS – Questo studio applica un modello probabilistico per formulare scenari di pericolosità sismica nella Regione Marche, applicando il principio che la distribuzione spazio-temporale dei piccoli terremoti aiuta a mappare la distribuzione della probabilità di eventi sismici più distruttivi. Un catalogo sismico dal 1981 a oggi è stato compilato per l'intera regione e ad esso è stata applicata la tecnica dei “pattern informatics” definendo così una mappa di pericolosità sismica della Regione Marche per i prossimi dieci anni. Successivamente è stata calcolata la vulnerabilità sismica degli edifici basandosi su quattro parametri: l'anno e il materiale di costruzione, il numero di piani e il grado di contiguità tra edifici. Questi dati sono stati presi dal censimento ISTAT del 2001. Il modello usato per il calcolo della vulnerabilità è una regressione di tipo sigmoideale tra i quattro parametri citati e i danni reali provocati da un terremoto noto. Per questo studio è stato usato l'evento Umbro-Marchigiano del 26 settembre 1997 (epicentro 43.084° N 12.812° E, magnitudine momento 6 Mw). Infine, combinando i modelli di pericolosità sismica e di vulnerabilità dell'edificato, è stato prodotto un database georeferenziato del rischio sismico (probabilità di danno) per i prossimi dieci anni nella Regione Marche.

MAPPING SEISMIC VULNERABILITY OF BUILDINGS IN THE MARCHE REGION; A GIS BASED EMPIRICAL FORECAST MODEL – This study proposes a probabilistic model to formulate scenarios of seismic hazard in the Marche Region. The space-time distribution principle was applied. Such principle postulate that the analysis of the distribution of small earthquakes help mapping the probability of greater and more destructive earthquakes. A seismic catalog from 1981 to present was compiled for the entire region, and then the “pattern informatics” techniques was applied to define the seismic hazard map of the Marche Region for the next ten years. Subsequently, the seismic vulnerability of buildings was assessed analyzing four parameters: year and material of construction, the number of floors and the degree of contiguity between buildings. These data had been extracted from the 2001 ISTAT census report. The model used to compute vulnerability was a sigmoidal regression among the four parameters mentioned above and the real damage caused by a known earthquake. This study used the Umbria-Marche of 26 September 1997 event (epicenter 43084 N ° 12,812 ° E, moment magnitude 6 Mw). Finally, by combining the model of seismic hazard and that of vulnerability of buildings, a geo-referenced database of

seismic risk was computed to show the damage probability in the Marche Region over the next ten years.

PAROLE CHIAVE: Vulnerabilità sismica degli edifici; Regione Marche; Modelli empirici di previsione; GIS; Mappe di rischio sismico.

KEYWORDS: Seismic vulnerability of buildings; Marche Region; Empirical forecast models; GIS; Seismic risk maps.