

Carlotta Sergiacomi\*,  
Claudio Fagarazzi

Department of Agriculture, Food,  
Environment and Forestry (DAGRI),  
University of Florence, Italy

E-mail: [carlotta.sergiacomi@unifi.it](mailto:carlotta.sergiacomi@unifi.it),  
[claudio.fagarazzi@unifi.it](mailto:claudio.fagarazzi@unifi.it)

Keywords: *Seismic Vulnerability  
Assessment (SVA), Multi-Criteria  
analysis (MCDC), Geographic  
Information Systems (GIS)*

Parole chiave: *Valutazione della  
vulnerabilità sismica (SVA), Analisi  
multi-criterio (MCDC), Sistemi  
Informativi Territoriali (SIT)*  
JEL codes: C31, C38, O18, R58

\*Corresponding author

## Modelli Decisionali Multi Criterio per l'analisi della vulnerabilità sismica a scala territoriale: il caso studio della Garfagnana (Toscana)<sup>1</sup>

Italy is one of the countries with the greatest historic heritage in the world, but also one of the most seismic. In this context an earthquake can cause significant damage. Usually, the vulnerability of a building is verified with in-depth and expensive structural assessment, without considering spatial relations and local context. In this study a method is proposed for the assessment of Territorial Seismic Vulnerability, based on both building characteristics and morphological and spatial parameters. It is an urban-scale approach that allows an objective classification of buildings using an economical procedure. The method, based on the development of a geographical Multiple Criteria Decision Making model and on the participatory approach of the Analytic Hierarchy Process, has been tested in the study area of Garfagnana (Tuscany). The model can be a useful support tool for urban planning, allowing the optimization of public resources in the most vulnerable areas.

### 1. Introduzione

Il territorio italiano si caratterizza per frequenti e catastrofici eventi sismici. Il National Institute of Geophysical and Vulcanology identifica ogni anno in Italia da 1700 a 2500 eventi con una intensità pari o superiore a  $2.5 M_L^2$ . Nell'Appennino Centrale sono stati documentati terremoti di forte intensità già a partire dal XI secolo ed eventi sismici rilevanti (con magnitudo  $\geq 6,0$ ) sono stati catalogati per gli ultimi cinque secoli (AA.VV., 2014). In questo contesto, la diffusa presenza di edifici storici realizzati con materiali edili locali (es. pietra e terracotta), con elevata densità edilizia e localizzati all'apice di promontori montani o contrafforti rocciosi, sono tra i principali fattori che hanno contribuito a incrementare le perdite in termini di vite umane e patrimonio urbano (Atzori *et al.*, 2009). I centri storici rappresentano sicuramente risorse fondamentali per lo sviluppo turistico ed economico del Paese, ma anche fattori che amplificano la vulnerabilità sismica dei luoghi e quindi la propensione al danno in caso di terremoto. Un altro aspetto rilevante riguarda la distinzione tra politiche di prevenzione e di ricostruzione. Come sostiene Woo "Il bilancio globale delle vittime dei terremoti è una tragica prova della continua necessità di migliorare il sistema decisionale sugli interventi in caso di

<sup>1</sup> The authors wish to thank the two anonymous Referees for their suggestion.

<sup>2</sup> ML Magnitudo Locale (Scala Richter). Fonte: <http://legacy.ingv.it/FAQ/faq.html#when>

terremoti” (Woo, 2011, p. 7). Per quanto riguarda la prevenzione al rischio sismico nel lungo termine risulta fondamentale l’attuazione di politiche efficienti di pianificazione territoriale. La gestione dell’emergenza invece richiede efficaci piani di soccorso e gestione delle catastrofi, accuratamente predisposti in una fase antecedente l’emergenza e ottenuti grazie alla sinergia tra i risultati della ricerca scientifica e le competenze tecniche degli operatori del settore.

Per questo, a partire dal 1909 attraverso il Regio Decreto n. 542<sup>3</sup>, sono stati introdotti indicatori specifici per la definizione delle zone sismiche e del rischio sismico, dove per rischio sismico si intende la misura del potenziale danno economico, sociale ed ambientale derivante da un evento sismico, stimata come prodotto di tre fattori: la pericolosità, l’esposizione (o valore esposto) e la vulnerabilità, che indica la suscettibilità di un edificio a subire danni (Barbat *et al.*, 2009). Il decreto faceva riferimento ai territori colpiti dai terremoti distruttivi di Reggio Calabria e Messina del 1908. La classificazione sismica dei Comuni italiani è stata poi estesa a tutto il territorio nazionale con il D.M. n. 515 del 3 Giugno 1981<sup>4</sup> e il D.M. 29 febbraio 1984<sup>5</sup>, sulla base di su uno studio di tipo probabilistico condotto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Tali decreti hanno costituito la base per l’aggiornamento della classificazione sismica avvenuto con l’emanazione dell’O.P.C.M. n. 3274 del 2003<sup>6</sup>. Con questa ordinanza è stata resa obbligatoria la verifica di vulnerabilità sismica per i cosiddetti edifici strategici e rilevanti, cioè quelle costruzioni che risultano particolarmente funzionali alle attività di protezione civile nel corso di eventi sismici (es. punti di raccolta, vie di fuga, centri di coordinamento per le attività di protezione civile) o le cui conseguenze ad un eventuale collasso si rivelerebbero estremamente dannose per la popolazione e il contesto territoriale<sup>7</sup>. Si tratta di una verifica estremamente costosa, diventata quindi obbligatoria per scuole, municipi, ospedali ecc., ma non per edifici residenziali, industriali o produttivi<sup>8</sup>. A tale norma ha fatto seguito il D.M. 28 febbraio 2017 n. 58<sup>9</sup> che individua due metodi per la determinazione della classe di rischio sismico, uno di carattere convenzionale e uno di carattere semplificato, per contenere i costi della valutazione della vulnerabilità sismica dei singoli edifici. Si tratta però

<sup>3</sup> Regio Decreto n. 542 del 15 Luglio 1909 “Estensione a tutti i Comuni della Calabria e dei Circondari di Messina e Castoreale le norme tecniche ed igieniche approvata dal R.D. 18 aprile 1909, n. 193, e fissa le aree per le nuove edificazioni.” (G.U. n. 185 del 9 Agosto 1909).

<sup>4</sup> D.M. n. 515 del 3 Giugno 1981. Riguardante la classificazione sismica del territorio e basati su uno studio del CNR.

<sup>5</sup> D.M. del 29 Febbraio 1984 Riguardante la classificazione sismica del territorio e basati su uno studio del CNR.

<sup>6</sup> O.P.C.M. del 20 marzo 2003, n. 3274, “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”. (GU Serie Generale n.105 del 08-05-2003 - Suppl. Ordinario n. 72).

<sup>7</sup> art. 2, comma 3, O.P.C.M. 3274/2003.

<sup>8</sup> Ibidem.

<sup>9</sup> D.M. 28 febbraio 2017 n. 58 “Sisma Bonus - Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni nonché le modalità per l’attestazione, da parte di professionisti abilitati, dell’efficacia degli interventi effettuati.” poi modificato dal D.M 7 marzo 2017 n. 65.

di una stima soggettiva legata alle competenze dei molteplici tecnici che possono eseguire le analisi sui singoli edifici delle aree urbanizzate.

L'analisi di vulnerabilità sismica a livello territoriale rappresenta invece una valutazione di contesto, che non esamina solo le caratteristiche morfologico-strutturali del singolo edificio, ma anche: le relazioni spaziali tra i vari edifici; le relazioni con le vie di fuga e gli spazi aperti; le caratteristiche geomorfologiche dei terreni su cui insistono gli edifici. Questo tipo di analisi è stata affrontata in numerosi studi (Alizadeh *et al.*, 2018; Walker *et al.*, 2014), ma solo pochi hanno integrato gli aspetti connessi alla morfologia territoriale (Armaş, 2012; Jenness, 2006; Karimzadeh e Matsuoka, 2018). La criticità evidenziata da tali studi è rappresentata dalla difficoltà di acquisizione di archivi dati completi ed esaustivi (inventario degli edifici, informazioni sulla rete viaria, ecc). Per questo, una valida soluzione è legata all'impiego di metodologie in grado di utilizzare dati telerilevati, ovvero metodologie GIS capaci di acquisire dati in modo speditivo grazie all'uso di immagini satellitari o foto aeree (Alizadeh *et al.*, 2018; Bono e Gutiérrez, 2011; Erden e Karaman, 2012; Rezaie e Panahi, 2015). La valutazione della vulnerabilità sismica territoriale basata su sistemi di informazione geospaziali può quindi rappresentare la soluzione al problema della limitata disponibilità di dati (Hizbaron *et al.*, 2012; Kougkoulos *et al.*, 2018; Servi, 2004; Sinha *et al.*, 2016).

Nel presente lavoro viene proposta la valutazione della Vulnerabilità Sismica Territoriale (VST), misurata in relazione alle specifiche caratteristiche strutturali e all'organizzazione spaziale e funzionale del sistema urbano in cui gli edifici sono inclusi. Si tratta di un approccio a scala urbana che consente una classificazione omogenea dell'edificato senza risentire della diversa sensibilità e professionalità dei tecnici coinvolti, garantendo costi estremamente contenuti rispetto a quelli necessari nel caso di approfondite classificazioni di vulnerabilità sui singoli edifici. La metodologia si basa sullo sviluppo di un modello di analisi multicriteriale geografico (MCDM GIS) fondato sull'approccio partecipativo garantito da un processo di analisi gerarchica (AHP) (Erden e Karaman, 2012; Malczewski, 1999; Saaty, 1977, 1980; Silavi *et al.*, 2006). I database per la costruzione degli indicatori derivano sia da dati telerilevati, sia da archivi facilmente reperibili presso le Pubbliche Amministrazioni (PPAA.) (es. carta tecnica regionale). La metodologia è stata testata in un territorio caratterizzato da una pericolosità sismica di classe 2<sup>10</sup> su cui sussistono buone probabilità di forti terremoti, cioè l'area della Garfagnana situata nella parte settentrionale della Regione Toscana. L'area si trova vicino a un importante sistema di faglie dell'Appennino centrale: l'Etrurian Fault System<sup>11</sup>.

## 2. Stato dell'arte

In letteratura esistono diverse definizioni di vulnerabilità sismica dell'edificato (Alizadeh *et al.*, 2018; Karimzadeh *et al.*, 2014; Lagomarsino e Podestà, 2004) e ad

<sup>10</sup> OPCM 3274 del 20/03/2003.

<sup>11</sup> <https://ingvterremoti.com/2013/02/06/>

esse sono legate differenti metodologie di valutazione. Una prima classificazione proposta da Vicente *et al.* (2011) mette in relazione i metodi alle tecniche di analisi impiegate, distinguendo tra:

- tecniche dirette: basate su indicatori sintetici che riassumono il livello di vulnerabilità degli edifici. (Calvi, 1999; D'Ayala e Speranza, 1999);
- tecniche indirette: basate su un set di indicatori in grado di stimare il danno atteso (es. metodo ATC-21, 1988; schede GNDT, 1994);
- tecniche convenzionali: fondate su un indice di vulnerabilità al quale non viene poi associata una previsione di danno (es. metodo ATC-13, 1985; metodo HAZUS, 1999).
- Un'altra classificazione proposta da Novelli nel 2017 si fonda sulle modalità di esecuzione dell'analisi e sulle basi conoscitive e le fonti dati utilizzate. In questo caso sono differenziati:
  - metodi empirici: basati su elaborazioni di dati derivati dall'osservazione di danni subiti dagli edifici a causa di eventi sismici passati (Barbat *et al.*, 2009; Vicente *et al.*, 2011);
  - metodi analitici: basati su modelli numerici che stimano la risposta sismica dell'edificio (Karimzadeh e Matsuoka, 2018; Lourenço e Roque, 2006);
  - metodi soggettivi: basati sul giudizio di esperti (Zuccaro *et al.*, 2015);
  - metodi ibridi: basati su diverse fonti di dati (Novelli, 2017).

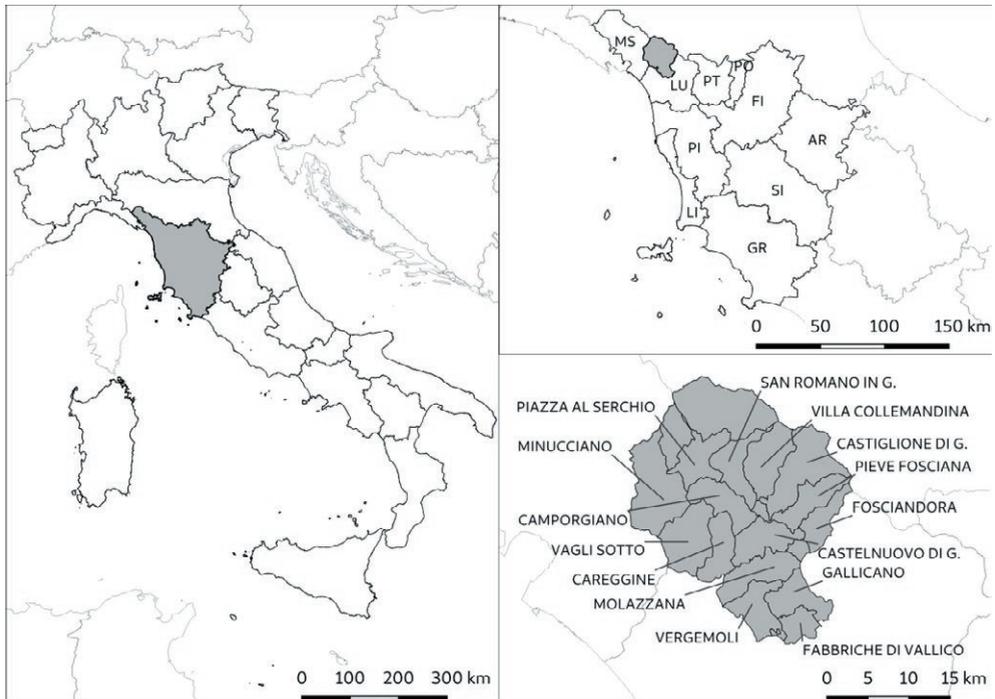
La metodologia proposta applica una tecnica convenzionale (poiché definisce un Indice di Vulnerabilità Sismica Territoriale), con l'uso di dati empirici (es. indagini storiche su tecniche e materiali di costruzione) e metodi analitici (es. Topographic Position Index). Inoltre, la metodologia in oggetto propone il passaggio da un modello di analisi della vulnerabilità sismica a scala di singolo edificio (Lourenço e Roque, 2006) ad uno a scala territoriale (Alizadeh *et al.*, 2018; Arma, 2012), per il quale è necessario evolversi da un approccio di tipo ingegneristico-strutturale ad un'analisi di tipo geo-spaziale. Molti modelli di analisi territoriale proposti in letteratura studiano gli aggregati urbani (Vicente *et al.*, 2011) e la morfologia del territorio (Costanzo *et al.*, 2016; Hizbaron *et al.*, 2012), ma restano ancora strettamente connessi all'indagine di carattere strutturale-architettonico del singolo edificio (Karimzadeh *et al.*, 2014; Lourenço e Roque, 2006) o considerano altri parametri come la pericolosità sismica e l'esposizione (Arma, 2012). Nel caso di studio la metodologia si riconduce ad approcci già sviluppati da altri autori (Alizadeh *et al.*, 2018; Karimzadeh *et al.*, 2014; Silavi *et al.*, 2006), ma approfondisce aspetti legati ad indicatori macrostrutturali dell'edificato (es. altezza degli edifici), della struttura urbana (es. densità edilizia) e della morfologia del territorio sul quale insistono gli edifici (es. Topographic Position Index).

### 3. Caso studio: la Garfagnana

L'area di studio (Figura 1) si sviluppa su 15 Comuni situati nella parte Nord-Ovest della Toscana in Provincia di Lucca (la c.d. Garfagnana).

La struttura insediativa di questo territorio è caratterizzata da numerosi nuclei urbani di dimensioni ridotte e prevalente origine rurale. Lo sviluppo dei cen-

Figura 1. Inquadramento dell'area di studio: la Garfagnana (fonte: nostra elaborazione).



tri abitati di fondovalle invece è relativamente recente. Questa conformazione del territorio urbanizzato deriva dalla struttura orografica e idrografica locale, caratterizzata dalla presenza di due catene montuose (Appennini e Alpi Apuane) e del bacino del fiume Serchio. L'area, localizzata in corrispondenza di un importante sistema di faglie dell'Appennino centrale (Etrurian Fault System), si caratterizza per una classe di pericolosità sismica di livello 2 e rientra quindi nella fascia territoriale a maggiore pericolosità sismica della Regione Toscana.

#### 4. Materiali e metodi

Come anticipato, l'analisi della vulnerabilità sismica territoriale è concepita come un problema spaziale e non come una valutazione dei parametri caratterizzanti il singolo manufatto edilizio (Rashed e Weeks, 2003). Per questo la metodologia integra da un lato sistemi informativi geografici per la geolocalizzazione dei dati e dall'altro un processo decisionale basato su modelli multicriteriali (MCDM) spaziali, caratterizzati da parametri rappresentati attraverso layers cartografici (Alizadeh *et al.*, 2018; Armaş, 2012; Rezaie e Panahi, 2015; Sinha *et al.*, 2016). La revisione bibliografica dei modelli MCDM spaziali, sviluppati per l'analisi della vulnerabilità sismica, evidenzia che il metodo più comunemente applicato è basato sul

processo di analisi delle gerarchie (AHP) (Alizadeh *et al.*, 2018; Barbat *et al.*, 2009; Rezaie e Panahi, 2015; Sadrykia *et al.*, 2017), sviluppato da Saaty nel 1977. Il metodo da un lato permette di ponderare la rilevanza dei vari indicatori sulla base di giudizi di esperti e dall'altro di quantificare criteri in aree con carenza di dati (Sadrykia *et al.*, 2017). La possibilità di avere un quadro conoscitivo georeferenziato, con indicatori morfologici e urbanistici ad elevata risoluzione spaziale (10x10m), rappresenta un valido supporto per il decisore pubblico che deve definire interventi mirati alla salvaguardia dell'incolumità delle popolazioni in un'ottica di razionalizzazione delle risorse disponibili (Alizadeh *et al.*, 2018; Bernetti e Fagarazzi, 2002; Cozzi *et al.*, 2016).

#### 4.1 MCDM

I modelli di analisi multicriteriale spaziale si caratterizzano per il fatto che i risultati dipendono dalla localizzazione geografica, dalla forma e dalla dimensione degli oggetti ricavati dai dati di input. Tali modelli vengono prevalentemente rappresentati attraverso geodatabases di tipo raster. (Bernetti, 2006; Bernetti e Fagarazzi, 2002; Eastman e Jiang, 1995; Jiang e Eastman, 2000; Mogorovich, 2019). Per questo nei modelli MCDM spaziali ciascun criterio decisionale, ovvero ciascun fattore che incrementa o decrementa la vulnerabilità di un territorio per un dato aspetto (morfologia, densità edilizia, altezza edifici, ecc.), è rappresentato tramite uno specifico layer raster, in cui le variabili decisionali del modello sono rappresentate dai valori che assumono i diversi pixels e che esprimono la vocazionalità del territorio verso un dato aspetto (es. vulnerabilità sismica). Formalmente definito  $P_j$  il pixel  $j$ -esimo in una rappresentazione raster di un dato territorio e  $x_{i,j}$  il valore assunto dal  $j$ -esimo pixel per l' $i$ -esimo criterio, l'insieme dei criteri decisionali del problema può essere definito come:

$$P_j = \{x_{i,j} | x_{i,j} \in [0,1], i = 1,2,\dots,m; j = 1,2,\dots,n\} \quad (1)$$

##### 4.1.1 La normalizzazione e aggregazione dei dati

I criteri decisionali, rappresentati dai layers tematici sono generalmente espressi con indicatori che presentano diverse unità di misura. Basti pensare alle grandezze con cui sono espresse la pendenza (%) e l'altezza degli edifici (m). Per questo è quindi necessaria una loro normalizzazione nell'intervallo [0,1] prima di procedere all'aggregazione dei criteri secondo i procedimenti previsti nei modelli MCDM. Il metodo più semplice per effettuare tale normalizzazione è quello della distanza dal punto ideale o del valore massimo riscontrato per ogni criterio (Malczewski, 1999):

$$x_{i,j} = \frac{R_{i,j} - R_i^{min}}{R_i^{max} - R_i^{min}} \quad R_i^{min} = 0 \rightarrow x_{i,j} = \frac{R_{i,j}}{R_i^{max}} \quad (2)$$

Con:

$x_{i,j}$  = valore normalizzato [0,1] del criterio  $i$ -esimo per il pixel  $j$ -esimo;

$R_{i,j}$  = valore non normalizzato del criterio  $i$ -esimo per il pixel  $j$ -esimo;

$R_i^{min}$  = valore minimo del criterio  $i$ -esimo nel territorio esaminato;

$R_i^{max}$  = valore massimo del criterio  $i$ -esimo nel territorio esaminato.

Nel presente studio il processo di normalizzazione si è basato sul criterio della distanza dall'ideale (Bernetti e Fagarazzi, 2002; Romano, 2006).

Considerato che lo scopo dei modelli MCDM spaziali è generalmente rappresentato dalla definizione di un indice complessivo che rappresenti i diversi criteri esaminati si è quindi proceduto all'aggregazione di tali criteri secondo la regola basata sulla loro somma pesata. In tale procedimento i pesi  $w_i$  attribuiti ai singoli criteri  $i$ , sono funzione dell'importanza relativa data dai decisori e tale che  $w_i=1$ . Formalmente tale regola di aggregazione può essere rappresentata:

$$V_j = \sum_{i=1}^n x_{i,j} w_i \quad (3)$$

Dove:

$V_j$  = vulnerabilità sismica del pixel  $j$ -esimo;

$x_{i,j}$  = valore normalizzato [0,1] del criterio  $i$ -esimo per il pixel  $j$ -esimo;

$w_i$  = peso del criterio  $i$ -esimo;

$n$  = numero di criteri  $i$ -esimi.

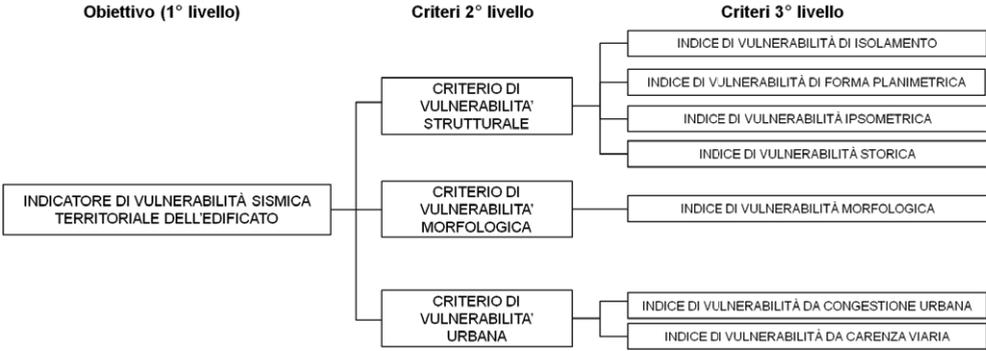
#### 4.1.2 Definizione del vettore pesi con metodo AHP

Una delle tecniche maggiormente utilizzate per la definizione dei pesi relativi  $w_i$  di ciascun criterio  $i$  fa riferimento alla teoria dell'analisi gerarchica AHP sviluppata da Saaty nel 1977 (Alizadeh *et al.*, 2018; Dodgson *et al.*, 2009; Malczewski, 2004; Saaty, 1980). In particolare l'AHP si caratterizza per la possibilità di essere in grado di valutare problemi decisionali anche complessi e di permettere l'applicazione di modelli in ambito mono o multi decisionale (Bernetti, 2006). Il metodo, applicato in molteplici analisi della vulnerabilità sismica dei territori (Alizadeh *et al.*, 2018; Barbat *et al.*, 2009; Rezaie e Panahi, 2015; Sadrykia *et al.*, 2017) si basa su una serie di steps.

Durante la prima fase di scomposizione del problema decisionale, gli elementi caratterizzanti sono stati disaggregati nel diagramma gerarchico sulla base di criteri e sottocriteri<sup>12</sup> che identificano aspetti omogenei del problema (in questo caso: infrastrutture, morfologia del territorio, ecc.) (Alizadeh *et al.*, 2018; Dodgson *et al.*, 2009; Malczewski, 2004; Saaty, 1980). Sono stati quindi definiti: l'obiettivo generale di primo livello, i criteri di secondo e terzo livello (Figura 2).

<sup>12</sup> Si ricorda che i criteri di uno stesso livello sono mutuamente indipendenti (Saaty 1980).

Figura 2. Procedimento di gerarchizzazione AHP (fonte: nostra elaborazione).



Nella seconda fase, sono state costruite tre matrici di confronto a coppie, che hanno permesso la comparazione di tutti i criteri di secondo livello e dei sottocriteri di terzo livello relativi ai criteri di vulnerabilità strutturale e di vulnerabilità urbana. Le matrici sono state sottoposte a un panel di decisori che hanno espresso le loro priorità comparando a coppie i criteri. Al fine di ottenere un’analisi completa dei parametri sottoposti a giudizio, è stato costituito un gruppo di 12 esperti provenienti da diverse discipline. Tra questi: due architetti, due geometri, due geologi, tre ingegneri e tre urbanisti. I soggetti coinvolti nello studio provengono in parte dell’ambiente accademico e in parte da studi privati di settore. La valutazione si è basata su una successione di domande quali-quantitative, ovvero: quale dei due fattori è maggiormente rilevante? Quanto è più rilevante? Per rispondere alla seconda domanda è stato fatto riferimento alla scala di importanza relativa utilizzata dallo stesso Saaty (1980), che permette di esprimere un giudizio positivo con un valore compreso tra (1) e (9) (Fagarazzi, 2006).

Nella terza fase è stato stimato il peso dei singoli criteri tramite il metodo degli autovalori, mentre nella quarta ed ultima fase è stata effettuata l’analisi di consistenza dei giudizi attraverso l’Indice di Consistenza (CI) della matrice (Saaty, 1980), per verificare la coerenza tra i giudizi espressi dai singoli decisori. Saaty, nel 1980, ha sviluppato uno specifico indice in grado di esprimere il livello di consistenza delle matrici di confronto a coppie. L’indice è definito dalla seguente equazione:

$$CI = \frac{\alpha_{max} - n}{n - 1} \tag{4}$$

Dove:

$\alpha_{max}$  = autovettore max della matrice;

$n$  = ordine della matrice.

Lo stesso Saaty ha fornito una regola pratica per la valutazione della bontà degli giudizi. Se il CI assume valori minori o uguali a 0.1, allora il valutatore si può ritenere soddisfatto dei suoi giudizi (D’Apuzzo e Ventre, 1995). Il CI di ogni tabella di confronto a coppie sottoposta ai diversi esperti è risultato essere inferiore a 0.1, esprimendo quindi una consistenza accettabile nella coerenza dei giudizi espressi (Tabella 4, Tabella. 6).

Il coinvolgimento dei decisori nell'ambito dell'analisi AHP è stato effettuato in modo individuale per evitare problematiche come la polisemia dei termini, causata dal fatto che il codice linguistico non è pienamente condiviso nel gruppo, la comunicazione non è perfetta (Marradi, 1994) e si può incorrere nel condizionamento dovuto alla presenza di soggetti carismatici che non consentono la libera espressione delle posizioni minoritarie (Tourangeau e Rasinski, 1988). Il coinvolgimento individuale ha quindi richiesto la definizione di una metodologia di aggregazione dei vettori pesi individuati dai singoli decisori. Operativamente, i metodi di aggregazione delle preferenze più frequentemente utilizzati sono tre (Haimes e Chankong, 1985; Kacprzyk *et al.*, 1988): la valutazione additiva, la valutazione moltiplicativa e la logica sfocata (Romano, 2006). In questo caso è stato scelto un metodo di aggregazione delle preferenze di tipo moltiplicativo in modo da enfatizzare l'impatto della valutazione di ciascun decisore sul risultato dell'aggregazione. In particolare, come anche proposto da Aczél e Saaty nel 1983 per lo sviluppo del metodo AHP, è stata utilizzata la media geometrica come metodo di aggregazione (Bernetti, 2006). Per cui, dati  $S$  decisori (dove  $S = s$ , con  $s = 1, \dots, n$  decisori), il peso globale o complessivo di ogni criterio  $i$ -esimo sarà pari a:

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{s=1}^n w_{s,i}} \quad (5)$$

Dove:

$W_i$  = peso complessivo del criterio  $i$ -esimo

$w_{s,i}$  = peso attribuito dal decisore  $s$ -esimo

$n$  = numero complessivo dei decisori

In tal modo, è stato introdotto un approccio valutativo dei decisori totalmente non compensatorio, fino al caso limite della situazione di veto allorché un decisore attribuisce ad un criterio una valutazione pari a zero (Romano, 2006).

#### 4.2 Le basi dati

Il Sistema Informativo Territoriale (o SIT) ha rappresentato l'elemento nodale per lo sviluppo del modello MCDM spaziale. L'archivio è stato realizzato sia in formato vettoriale che in formato raster, con celle quadrate di 10x10m, in modo da sviluppare un'analisi ad un dettaglio tale da poter discriminare il singolo edificio o la singola strada. L'impiego di basi dati raster rappresenta la configurazione più diffusa nell'ambito degli studi sulla vulnerabilità sismica in ragione delle sue elevate potenzialità e capacità elaborative (Alizadeh *et al.*, 2018; Barbat *et al.*, 2009; Rezaie e Panahi, 2015; Sadrykia *et al.*, 2017).

Le basi dati utilizzate traggono origine dal portale GEOscopio della Regione Toscana<sup>13</sup> e si caratterizzano per i seguenti layers cartografici:

<sup>13</sup> <https://www.regione.toscana.it/-/geoscopio>

- Archivio degli edifici (vettoriale): sedimi edilizi toscani periodizzati con sei soglie temporali dal 1832 al 1996<sup>14</sup> contenenti informazioni su: quota piano di campagna, quota piano di gronda; numero piani fuori terra; altezza degli edifici; periodizzazione storica; tipologia d'uso dell'edificio; area; volume; perimetro.
- Archivio degli edifici pubblici strategici e rilevanti (vettoriale): relativo agli edifici strategici individuati in Toscana dal Dipartimento di Protezione Civile con disponibilità di informazioni su materiale di costruzione e analisi di vulnerabilità effettuate<sup>15</sup>.
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10'000 (vettoriale e raster): da cui sono derivati gli archivi cartografici del grafo stradale (distinti per tipologia, larghezza, ecc.).
- Digital Terrain Model (DTM): raster appositamente costruito (10x10m) sulla base delle primitive quotate (punti e linee) della Carta Tecnica Regionale in scala 1:10'000.

### 4.3 *Indice di Vulnerabilità Sismica Territoriale*

#### 4.3.1 Criterio di vulnerabilità strutturale

In letteratura, molti studi hanno esaminato la correlazione esistente tra i parametri strutturali in ambito sismico, tra i quali: la regolarità planimetrica, l'altezza e l'epoca di costruzione, la stabilità strutturale degli edifici (Alizadeh *et al.*, 2018; Banica *et al.*, 2017; Guéguen *et al.*, 2007; Sarris *et al.*, 2010; Zuccaro *et al.*, 2008).

Il criterio di vulnerabilità strutturale è stato definito dalla combinazione di quattro sub-criteri:

- Indice di vulnerabilità di isolamento (Ii);
- Indice di vulnerabilità di forma planimetrica (Fp);
- Indice di vulnerabilità ipsometrica (Ih);
- Indice di vulnerabilità storica (Ivs).

L'aggregazione dei quattro sub-criteri è stata realizzata grazie ad un'operazione di mapalgebra, che ha consentito la somma pesata delle quattro mappe raster dei singoli sub-criteri.

#### *Indice di vulnerabilità di isolamento*

L'indice valuta le interazioni statiche tra edifici contigui. Rappresenta un parametro molto importante nella valutazione degli aggregati urbani localizzati in contesti sismici (Armaş, 2012; Vicente *et al.*, 2011). Formalmente misura il grado di inclusione strutturale di un edificio rispetto a quelli adiacenti. L'indice di vulnerabilità di isolamento assume valori pari a 0 quando è totalmente isolato e quindi strutturalmente meno vulnerabile a eventi sismici per effetto di edifici contigui, mentre assume valori pari a 1 quando è totalmente incluso in altri edifici (Figura 3). È calcolato per singolo edificio ed è dato da:

<sup>14</sup> Catasto Generale Toscano. Fonte: <http://www.archiviodistato.firenze.it/catastotoscano/>

<sup>15</sup> <https://www.regione.toscana.it/-/patrimonio-edilizio-pubblico-in-toscana>

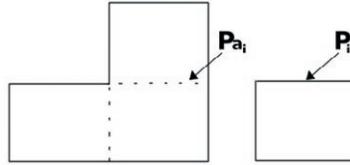
$$I_a = \frac{Pa_i}{P_i} \tag{6}$$

Dove:

$P_{ai}$  = porzione del perimetro dell'edificio  $i$ -esimo coincidente con il perimetro di altri edifici adiacenti;

$P_i$  = perimetro dell'edificio  $i$ -esimo.

Figura 3. Perimetri aggregati (fonte: nostra elaborazione).



*Indice di vulnerabilità di forma planimetrica*

L'indice valuta la vulnerabilità sismica conseguente alla forma planimetrica degli edifici. In particolare, considerato che una planimetria compatta conferisce maggiore stabilità sismica agli edifici (Guéguen *et al.*, 2007; Vicente *et al.*, 2011; Zuccaro *et al.*, 2008), si assume che la forma circolare sia quella in grado di garantire la maggiore stabilità strutturale ed un buon comportamento antisismico (Paolillo, 2005). L'indice di vulnerabilità di forma planimetrica tende quindi a 1 quanto più la planimetria del singolo edificio è articolata e dispersa (Figura 4b), mentre tende a 0 quanto più la planimetria dell'edificio è compatta e approssimabile a quella di un cerchio (Figura 4a). L'indice, calcolato per singolo edificio, è dato da:

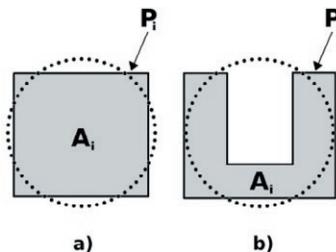
$$C_f = 1 - \frac{2\pi^2\sqrt{A_i/\pi}}{P_i} \tag{7}$$

Dove:

$A_i$  = superficie dell'edificio  $i$ -esimo;

$P_i$  = perimetro dell'edificio  $i$ -esimo.

Figura 4. Relazione stabilità/forma planimetrica (fonte: nostra elaborazione).



### *Indice di vulnerabilità ipsometrica*

L'indice valuta la vulnerabilità sismica conseguente all'altezza degli edifici, parametro che rende le costruzioni particolarmente vulnerabili ad eventi sismici (Alizadeh *et al.*, 2018; Armaş, 2012; Banica *et al.*, 2017; Ripepe *et al.*, 2014; Sarris *et al.*, 2010; Zuccaro *et al.*, 2008). L'altezza, in metri, dei singoli edifici è calcolata per differenza tra la quota di gronda e la quota del piano di campagna rilevabile nei layers cartografici, ovvero:

$$I_h = Qg_i - Qc_i \quad (8)$$

Dove:

$Qc_i$  = è la quota del piano di campagna dell'edificio  $i$ -esimo;

$Qg_i$  = è la quota di gronda dell'edificio  $i$ -esimo.

Più elevato è l'indice di altezza maggiore è la vulnerabilità sismica dell'edificio.

### *Indice di vulnerabilità storica*

L'indicatore stima, in modo indiretto, la vulnerabilità sismica degli edifici in relazione alle tecniche di costruzione e ai materiali utilizzati. Quest'ultimi influenzano infatti la stabilità strutturale degli edifici (Arma, 2012; Guéguen *et al.*, 2007; Rezaie e Panahi, 2015; Zuccaro *et al.*, 2008). Considerato che le tecniche di costruzione ed i materiali utilizzati si sono evoluti nel tempo, apportando progressivi miglioramenti in termini di stabilità statica (Banica *et al.*, 2017; Sarris *et al.*, 2010), è possibile individuare un'omogeneità di tipologie strutturali all'interno di ogni periodo storico. Guidoboni e Ferrari (2000a, 2000b) hanno identificato delle sezioni cronologiche omogenee all'interno delle quali collocare tradizioni costruttive del patrimonio urbanistico italiano. Gli autori propongono una classificazione delle città italiane in cinque periodi storici a partire dal V secolo fino alla prima metà del XX secolo. Tale classificazione si inserisce in un'ottica di analisi sismica territoriale al fine di favorire la rappresentazione di scenari sismici e di ricostruzione post-sismica. Gli autori sostengono che le caratteristiche del patrimonio edilizio italiano derivino da importanti fattori tra i quali: l'epoca storica, che ha visto il prevalere di determinate tecniche costruttive anche grazie agli scambi sociali e culturali con popolazioni dominanti o influenti (es. cultura Greca e Etrusca); la localizzazione geografica, che ha favorito l'utilizzo di particolari materiali costruttivi sulla base della disponibilità delle risorse locali. I tessuti urbani che appartengono alla medesima classe temporale sono dunque caratterizzati da una analoga vulnerabilità agli eventi sismici. Il patrimonio edilizio è quindi in parte influenzato da alcune variabili storiche, come materiali e tecniche costruttive, che possono modificare gli effetti attesi di un evento sismico attraverso processi di mitigazione o amplificazione del danno.

Non essendo disponibile un database che definisca tecniche e materiali da costruzione per ogni edificio presente nell'area di indagine, si è giunti alla stima di tali parametri a partire da due fonti di dati. Da un lato l'archivio di 44 edifici localizzati in Garfagnana, censiti come Edifici pubblici strategici e rilevanti nelle aree soggette a rischio sismico, per i quali sono disponibili indagini strutturali ap-

Tabella 1. Indice di vulnerabilità storica discreto normalizzato (fonte: nostra elaborazione).

Periodo di costruzione edifici	Anno di riferimento	Indice vulnerabilità storica	Indice normalizzato
$P_1 < 1954$	1954	4.58	1
$1954 \leq P_2 < 1978$	1967	2.59	0.56
$1978 < P_3 \leq 1996$	1987	1.07	0.23
$P_4 > 1996$	1998	0.66	0.14

profondite che identificano tecniche e materiali di costruzione e l'epoca di realizzazione dei singoli edifici. Dall'altro lato l'archivio della periodizzazione storica di tutto l'edificato dell'area di studio, ricavato dai dati dei sedimi edilizi della Regione Toscana. Sulla base dei dati disponibili è stato possibile definire una funzione interpolante che esprime, con buona approssimazione ( $R^2=0.74$ ), l'esistenza di una correlazione tra tipologia costruttiva ed epoca di realizzazione degli edifici (Ripepe *et al.*, 2014). La funzione, che definisce per ogni edificio un indice di vulnerabilità storica, è data da:

$$Ivs_i = 10^{38} \cdot e^{(-0.044 \cdot x_i)} \quad (9)$$

Dove:

$Ivs_i$  = indice di vulnerabilità storica dell' $i$ -esimo edificio;

$x_i$  = anno di costruzione dell'edificio  $i$ -esimo.

Per attribuire l'indice di vulnerabilità storica a tutti i poligoni afferenti all'archivio dei sedimi edilizi, è stato fatto riferimento all'anno centrale delle due classi di periodizzazione 1954-1978 e 1978-1996, mentre per la classe inferiore e superiore sono stati presi a riferimento gli anni limite (1954 e 1996) (Tabella 1).

#### 4.3.2 Criterio di vulnerabilità morfologica

Numerosi studi dimostrano che la morfologia del terreno influenza la vulnerabilità sismica degli edifici tramite effetti di amplificazione delle onde sismiche (Costanzo *et al.*, 2016; Nguyen e Gatmiri, 2007; Pessina e Fiorini, 2014; Sarris *et al.*, 2010; Walker *et al.*, 2014). Per classificare il territorio secondo il fattore di amplificazione topografica l'UE ha definito l'European Technical Code (EC8)<sup>16</sup>, che individua quattro tipologie morfologiche con grado di amplificazione sismica progressivamente crescente da T1 a T4, impiegate nel presente studio per definire il criterio di vulnerabilità morfologica. Il procedimento di classificazione si basa sullo sviluppo delle seguenti fasi:

<sup>16</sup> Normativa europea: UNI EN 1998-1.

- (1) Elaborazione di mappe tramite Topographic Position Index (TPI) per il territorio esaminato:
  - (a) Elaborazione mappa TPI per aree circolari di piccole dimensioni ( $r=50\text{m}$ );
  - (b) Elaborazione mappa TPI per aree circolari di grandi dimensioni ( $r=450\text{m}$ );
- (2) Classificazione del territorio secondo le categorie della Landform Classification (Weiss, 2001);
- (3) Classificazione del territorio secondo la normativa EC8:
  - (a) Elaborazione mappa delle pendenze medie per aree circolari di 100 m;
  - (b) Elaborazione mappa delle pendenze massime per aree circolari di 100 m;
  - (c) Classificazione tramite EC8 sulla base di: Landform classification; Pendenza media; Pendenza massima.

*Elaborazione mappe TPI per il territorio esaminato*

Il TPI è un operatore focale il cui algoritmo si basa sull'analisi di dati cartografici raster. In particolare nel presente studio il TPI analizza i dati di una finestra mobile circolare e definisce il valore del pixel centrale in funzione dei valori dei pixels situati nel suo intorno (Jenness, 2006). L'utilizzo del TPI risulta particolarmente efficace per aree di studio non troppo estese e con caratteristiche territoriali eterogenee come il caso della Garfagnana (De Reu *et al.*, 2013; Lucchesi *et al.*, 2007; Monacci e Lucchesi, 2010; Pessina e Fiorini, 2014). Formalmente, l'indicatore TPI per un'area di raggio  $R$ , è dato da:

$$TPI(R) = \frac{H_c - H_{avg}}{H_{std}} * 100 + 0.5 \quad (10)$$

Dove:

$H_c$  = quota del pixel centrale del kernel<sup>17</sup>;

$H_{avg}$  = quota media dei pixel inclusi nell'area circolare attorno al pixel centrale;

$H_{std}$  = deviazione standard delle quote dei pixel inclusi nell'area circolare attorno al pixel centrale.

Il valore del TPI risente dell'ampiezza della finestra mobile (kernel) ed è per questo che la metodologia prevede la comparazione di due finestre di diversa ampiezza (Weiss, 2001). In generale valori positivi del TPI indicano che il punto centrale si trova più in alto rispetto all'ambiente medio circostante, mentre valori negativi del TPI indicano una posizione più bassa rispetto alle aree attigue.

*Classificazione del territorio secondo categorie della Landform Classification*

Per definire le tipologie secondo la Landform Classification la procedura prevede il calcolo di due TPI per aree di ampiezza diversa. Nel caso specifico, è stato

---

<sup>17</sup> Il kernel o neighborhood, rappresenta una finestra di ampiezza standard (es. 5x5 pixel se quadrata) rispetto alla quale l'operatore focale effettua le elaborazioni. La finestra, dopo ogni elaborazione, si muove sul layer raster da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso, elaborando la totalità dei dati raster del territorio esaminato.

Tabella. 2. Criteri per la classificazione del territorio in Landform categories (fonte: Jenness, 2006).

Landform categories	Small neighborhood (raggio 50 mt)	Large neighborhood (raggio 450 mt)	Slope
canyons, deeply incised streams	$TPI \leq -1$	$TPI \leq -1$	-
midslope drainages, shallow valleys	$TPI \leq -1$	$-1 < TPI < 1$	-
upland drainages, headwaters	$TPI \leq -1$	$TPI \geq 1$	-
u-shaped valleys	$-1 < TPI < 1$	$TPI \leq -1$	-
plains small	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	$\leq 5^\circ$
open slopes	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	$> 5^\circ$
upper slopes, mesas	$-1 < TPI < 1$	$TPI \geq 1$	-
local ridges, hills in valleys	$TPI \geq 1$	$TPI \leq -1$	-
midslope ridges, small hills in plain	$TPI \geq 1$	$-1 < TPI < 1$	-
mountain tops, high ridges	$TPI \geq 1$	$TPI \geq 1$	-

calcolato il TPI rispetto a due finestre mobili circolari: una con raggio di 50 metri e una con raggio di 450 metri<sup>18</sup> (Tagil e Jenness, 2008). Dalla combinazione delle mappe dei due TPI e della mappa delle pendenze è stato possibile classificare il territorio secondo le 10 Landform categories definite da Weiss nel 2001 e aggiornati da Jenness nel 2006 (Tabella 2).

#### *Classificazione del territorio secondo l'European Technical Code (EC8)*

Per classificare il territorio secondo il fattore di amplificazione topografica definito dal Codice EC8 si è proceduto secondo la metodologia proposta da Costanzo *et al.* nel 2016. La classificazione è avvenuta analizzando congiuntamente la mappa della Landform Classification e le mappe delle pendenze medie e massime realizzate con finestre mobili circolari di 100 m di raggio (Costanzo *et al.*, 2016) seguendo i criteri illustrati in Tabella 3.

#### 4.3.3 Criterio di vulnerabilità urbana

Numerosi studi sulla vulnerabilità sismica territoriale hanno evidenziato che la densità delle strutture e infrastrutture urbane rappresenta un fattore che influenza la vulnerabilità sismica a scala territoriale (Hizbaron *et al.*, 2012; Rezaie e Panahi, 2015). Allo scopo di computare tali effetti nel modello di valutazione della VST

<sup>18</sup> Le dimensioni delle finestre mobili (neighbourhood) sono state definite sulla base dei risultati di uno studio effettuato dall'Università di Balikesir in Turchia (Tagil & Jenness, 2008). Lo studio, realizzato su un territorio con caratteristiche morfologiche analoghe alla Garfagnana, ha infatti conseguito risultati molto rappresentativi.

Tabella 3. Criteri per la valutazione della classe di amplificazione topografica secondo l'European Technical Code (EC8) (fonte: nostra rielaborazione da Costanzo *et al.*, 2016).

Landform category	Pendenza media	Pendenza max	EC8 Class	Indice normalizzato
mountain tops, high ridges				
local ridges, hills in valley	-	≥ 30°	T4	1
upper slopes, mesas				
mountain tops, high ridges				
local ridges, hills in valley	-	≥ 15°	T3	0.75
upper slopes, mesas				
midslope ridges, small hills in plains	≥ 15°	-	T2	0.50
open slopes				
mountain tops, high ridges				
local ridges, hills in valley	-	<15°	unclassified	-
upper slopes, mesas				
other	-	-	T1	0.25

sono stati determinati due indicatori capaci di misurare sia il livello di congestione urbana che il grado di carenza viaria.

#### *Indice di vulnerabilità da congestione urbana*

La densità urbana incide profondamente sugli effetti di un evento sismico (Armaş, 2012; Banica *et al.*, 2017; Rezaie e Panahi, 2015; Sarris *et al.*, 2010). Innanzitutto l'elevata densità dell'edificato è implicitamente connessa alla presenza di un'alta concentrazione di popolazione che può essere messa a rischio; inoltre, la compattezza degli edifici determina una maggiore difficoltà nella gestione dell'emergenza in termini di accesso e facilità delle operazioni. Per cercare di valutare tali aspetti è stato predisposto un indicatore che fa riferimento alla spacematrix di Berghauser Pont e Haupt (2007). Il metodo si basa su due indicatori (Figura 5): l'indice di superficie occupata (GSI – Ground Space Index) e l'indice di superficie costruita (FSI – Floor Space Index) che vengono valutati su unità urbanistiche elementari (lotti, isolati o distretti) (de Jong, 2011). Formalmente, i due indicatori sono così definiti:

Si è ritenuto opportuno strutturare un indicatore che consideri la combinazione dei due indici, definendo degli isoquanti di Vulnerabilità Sismica Urbana (es. VCU0,1; VCU0,4; VCU0,7 in Figura 6). Ciascun isoquanto è definito dal prodotto dei due indici, per cui formalmente avremo:

$$VCU_i = FSI_i \cdot GSI_i \quad (11)$$

Figura 5. Indicatori FSI e GSI (fonte: De Jong, 2011).

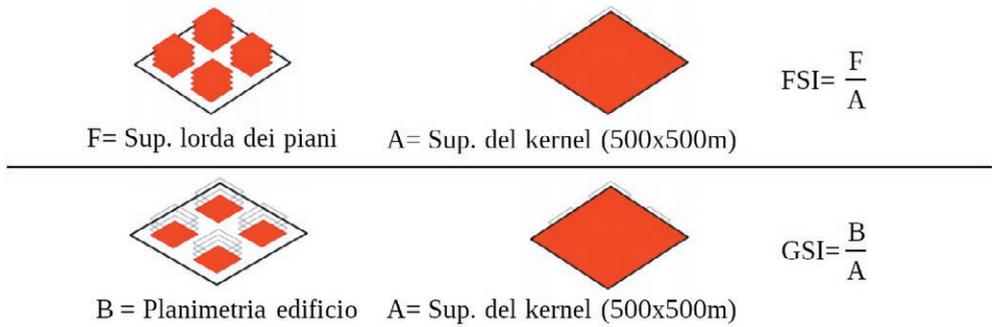
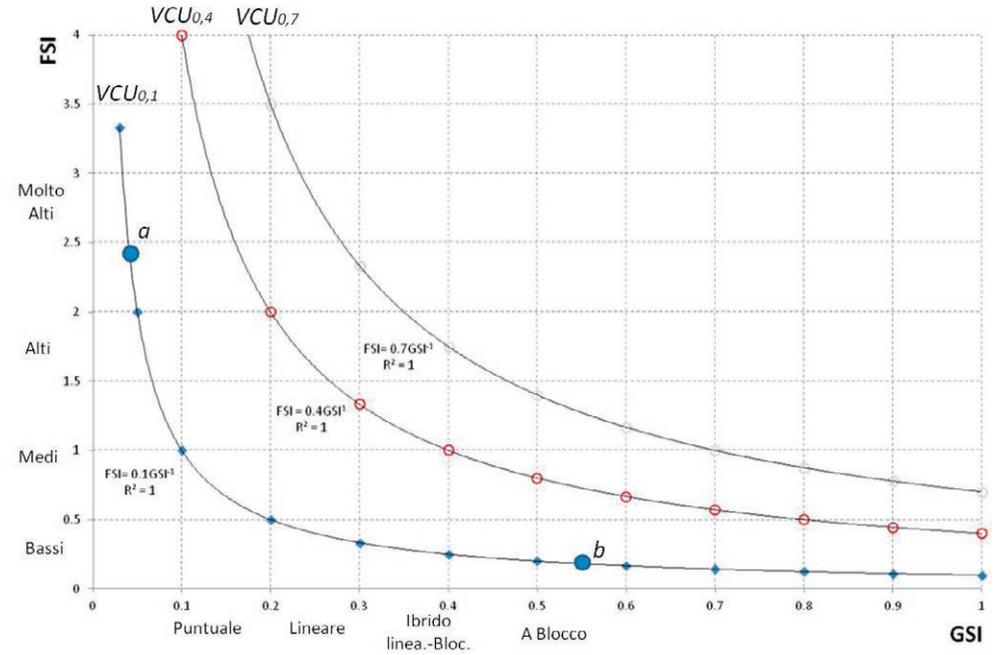


Figura 6. Esempio di Indice di Vulnerabilità da Congestione urbana al variare di GSI e FSI (fonte: nostra rielaborazione da De Jong, 2011).



Dove:

$VCU_i$  = Vulnerabilità da congestione urbana del kernel  $i$ -esimo.

Le unità urbanistiche in questo caso sono valutate attraverso un kernel mobile di dimensioni 51x51 pixel (510x510m), in cui l'operatore focale stima il rapporto F/A dei pixels inclusi, per la stima di FSI, e il rapporto B/A dei pixels inclusi, per la stima di GSI.

### *Indice di vulnerabilità da carenza viaria*

Uno dei criteri che incide maggiormente sulla vulnerabilità sismica di un territorio è rappresentato dalla presenza di viabilità e spazi aperti circostanti gli edifici, nonché dalla loro ampiezza (Hizbaron *et al.*, 2012). In caso di evento sismico tale infrastruttura è infatti funzionale a garantire la rapida evacuazione della popolazione e la presenza di spazi sicuri in cui rifugiarsi, come pure il facile raggiungimento da parte dei mezzi d'emergenza (Bono e Gutiérrez, 2011). Per questo è stato definito un indice di densità viaria che valuti non solo la concentrazione della rete stradale, ma anche la tipologia di rete, ovvero la sua larghezza e capacità di flusso. Pertanto, grazie alla CTR 1:10.000 della Regione Toscana è stato possibile produrre una mappa raster della viabilità con quattro classi<sup>19</sup>:

- classe 0: assenza di viabilità;
- classe 1: strada con larghezza inferiore a 3.5 metri;
- classe 2: strada con larghezza compresa tra 3.5 e 7 metri;
- classe 3: strada con larghezza superiore a 7 metri.

L'indice di densità viaria è stato quindi definito attraverso un operatore focale con kernel di 34x34 pixel (340x340m), in cui l'operatore stima la media dei valori dei pixels inclusi. Formalmente:

$$\bar{x}_j = \max v - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{v,j} \quad v = \{0,1,2,3\} \quad (12)$$

Dove:

$\bar{x}_j$  = indice di vulnerabilità da densità viaria del pixel  $j$ -esimo;

$x_{v,j}$  = valore della classe  $v$ -esima per il pixel  $j$ -esimo;

$n$  = numero di pixels del kernel.

Un'area servita da un elevato numero di strade di classe 3 avrà una minore vulnerabilità sismica viaria rispetto a una zona servita da un ridotto numero di strade di classe 1.

## 5. Risultati

L'analisi delle gerarchie (AHP) ha evidenziato la particolare rilevanza dell'indice storico ( $w=0.355$ ) nella definizione del criterio strutturale (Tabella 4). Per i professionisti e gli studiosi coinvolti nell'indagine assumono quindi un ruolo particolarmente importante i materiali e le tecniche costruttive, mentre risulta meno rilevante l'isolamento dell'edificio ( $w=0.106$ ) (Tabella 4). La valutazione rispetto ai parametri urbanistici evidenzia una particolare importanza del fattore di congestione urbana ( $w=0.667$ ) rispetto alla presenza di infrastrutture viarie (Tabella 5). Infine, per quanto attiene i macrocriteri (strutturale, urbanistico e morfologico) il criterio che assume la maggiore importanza è quello strutturale ( $w=0.556$ ), a con-

<sup>19</sup> Ai pochi segmenti stradali di cui non era stata rilevata alcuna dimensione è stata assegnata la classe 1.

Tabella 4. Pesì criteri di terzo livello: criterio di vulnerabilità strutturale (fonte: nostra elaborazione).

Criteri	Pesì attribuiti dai singoli esperti						Pesì globali (media geometrica)
	esperto 1	esperto 2	esperto 3	esperto 4	esperto 5	esperto 6	
Iv storica	0.330	0.498	0.282	0.059	0.262	0.326	0.355
Iv ipsometrico	0.318	0.111	0.256	0.332	0.343	0.177	0.279
Iv forma perimetrale	0.152	0.249	0.226	0.308	0.204	0.317	0.260
Iv isolamento	0.200	0.142	0.236	0.302	0.191	0.180	0.106
Indice di consistenza	0.063	0.098	0.042	0.069	0.088	0.056	

Tabella 5. Pesì criteri di terzo livello: criterio di vulnerabilità urbana (fonte: nostra elaborazione).

Criteri	Pesì attribuiti dai singoli esperti						Pesì globali (media geometrica)
	esperto 1	esperto 2	esperto 3	esperto 4	esperto 5	esperto 6	
Iv carenza viaria	0.670	0.550	0.650	0.150	0.310	0.610	0.333
Iv congestione urbana	0.330	0.450	0.350	0.850	0.790	0.390	0.667

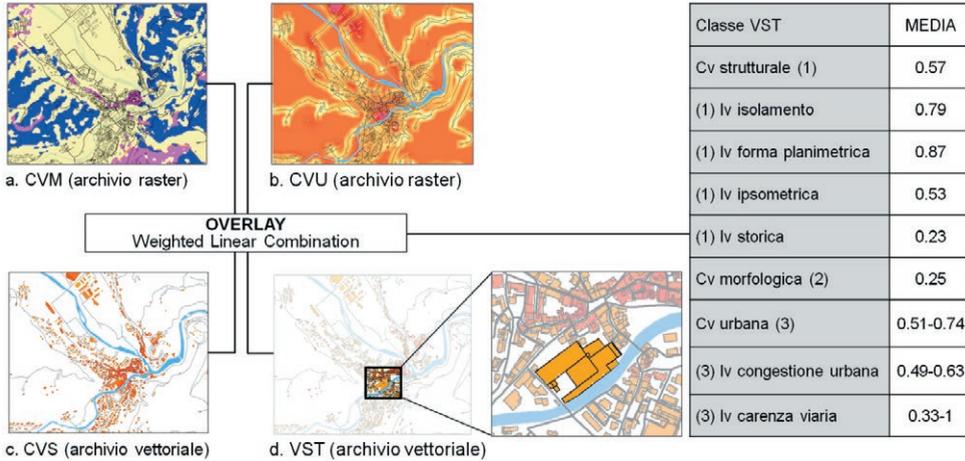
Tabella 6. Peso criteri di secondo livello (fonte: nostra elaborazione).

Criteri	Pesì attribuiti dai singoli esperti						Pesì globali (media geometrica)
	esperto 1	esperto 2	esperto 3	esperto 4	esperto 5	esperto 6	
Cv strutturale	0.402	0.296	0.439	0.320	0.400	0.368	0.556
Cv morfologica	0.319	0.364	0.314	0.384	0.341	0.280	0.301
Cv urbano	0.279	0.340	0.247	0.296	0.259	0.353	0.143
Indice di consistenza	0.038	0.017	0.057	0.025	0.034	0.021	

ferma del fatto che per gli esperti tali parametri sono prevalenti ai fini della definizione della vulnerabilità sismica rispetto ai parametri morfologici ( $w=0.301$ ) e urbani ( $w=0.143$ ) (Tabella 6).

I risultati delle elaborazioni su base GIS hanno portato alla realizzazione: di un archivio vettoriale, rappresentato dalla mappa di vulnerabilità sismica strutturale (Figura 7c); di due mappe raster, rappresentate dalla vulnerabilità sismica morfologica (Figura 7a) e dalla vulnerabilità sismica urbana (Figura 7b). L'ultima aggregazione è stata eseguita tra archivi vettoriali, previa assegnazione dei contenuti delle due mappe raster a una mappa vettoriale dell'edificato. In tale modo è stato possibile procedere alla somma pesata dei layers vettoriali rappresentativi dei tre macrocriteri.

Figura 7. Mappe relative a: (a) criterio di vulnerabilità morfologica; (b) criterio di vulnerabilità urbana; (c) criterio di vulnerabilità strutturale; (d) indicatore di vulnerabilità sismica territoriale (fonte: nostra elaborazione).



Il risultato finale è costituito da una mappa vettoriale della VST nella quale ad ogni poligono, che rappresenta un edificio, è attribuito un database di informazioni relative al valore assunto dai diversi criteri di secondo e terzo livello e dalla VST complessiva (Figura 7d). Per rendere facilmente interpretabile il risultato agli stakeholders si è quindi proceduto ad una riclassificazione dell'edificato secondo quantificatori linguistici basati su tre classi qualitative: bassa, media e alta vulnerabilità. Per questo si è fatto riferimento alle funzioni di appartenenza proposte da Bernetti e Fagarazzi nel 2002 per la conversione, in termini linguistici, di valori normalizzati nell'intervallo  $[0,1]$ . Per tale conversione è stato impiegato il metodo di Chen e Hwang (1992) con i seguenti range:

- classe 1 - vulnerabilità bassa: valori minori di 0.385;
- classe 2 - vulnerabilità media: valori compresi tra 0.385 e 0.615;
- classe 3 - vulnerabilità alta: valori maggiori di 0.615.

Sulla base dei risultati emerge che gli edifici ad alta VST sono pari a 490, rappresentano quasi il 2% del patrimonio edilizio complessivo dell'area di studio e sono collocati principalmente all'interno dei nuclei urbani storici. Gli edifici cui è attribuito un livello medio di VST sono pari a 10'196 e rappresentano circa il 40% dell'edificato. Nel contesto della Garfagnana infine sono presenti 14'873 edifici a bassa VST, pari a oltre il 58% dell'edificato dell'area (Tabella 7).

## 6. Discussione e conclusione

Il presente studio propone una metodologia di valutazione della vulnerabilità sismica territoriale (VST) dei singoli edifici in relazione alle specifiche caratteri-

Tabella 7. Numero di edifici per classe di Vulnerabilità Sismica Territoriale divisi per Comune (fonte: nostra elaborazione).

Comune	N° edifici per classe VST			Edifici totali per Comune
	Bassa	Media	Alta	
Camporgiano	1'282	902	26	2'210
Careggine	427	149	0	576
Castelnuovo di Garfagnana	1'847	1.399	111	3'357
Castiglione di Garfagnana	887	788	43	1'718
Fabbriche di Vallico	425	332	12	769
Fosciandora	298	563	31	892
Galliciano	1'682	1'324	86	3'092
Giuncugnano	410	45	0	455
Minucciano	1'431	106	0	1'537
Molazzana	615	706	24	1'345
Piazza al Serchio	1'464	688	15	2'168
Pieve Fosciandora	1'021	636	20	1'677
San Romano in Garfagnana	851	782	21	1'654
Sillano	564	311	12	887
Vagli Sotto	584	249	14	847
Vergemoli	296	490	30	816
Villa Collemantina	789	726	45	1560
Edifici totali per classe VST	14'873	10'196	490	25'560

stiche strutturali e all'organizzazione spaziale e funzionale del sistema urbano. Si tratta di una proposta che può rappresentare un valido strumento di supporto per realizzare rapidi screening di tutto il patrimonio edilizio situato su ampi territori sismici. La puntuale classificazione dei singoli edifici permette infatti di individuare, su ampi contesti, le strutture più sensibili dal punto di vista sismico. Per esse sarà possibile programmare indagini più approfondite ed eventuali politiche di incentivazione degli interventi antisismici.

I risultati conseguiti su uno specifico ambito territoriale, hanno infatti permesso l'identificazione di nuclei storici caratterizzati da elevata vulnerabilità strutturale. Si tratta di aree ad elevata criticità conseguenti a molteplici fattori, tra questi: (i) presenza di edifici antichi (Indice di vulnerabilità storica elevato), (ii) altezze mediamente superiori ai 9 metri (Indice di vulnerabilità ipsometrica elevato) e (iii) disposizione aggregata prevalente (Indice di vulnerabilità di isolamento elevato). A tali aspetti si associano poi condizioni morfologiche particolarmente sfavorevoli dovute alla localizzazione degli edifici in corrispondenza di poggi o alture che amplificano la vulnerabilità ad eventi sismici. L'esame specifico dei risultati conseguiti

nei centri storici<sup>20</sup> ha evidenziato che oltre il 60% degli edifici situati in tali contesti presentano VST media o alta. In particolare, per tali edifici sono stati registrati elevati valori di vulnerabilità strutturale (variabili tra 0.5 e 0.83). Viceversa, le strutture edilizie più recenti, realizzate dopo il 1978, siano esse di carattere residenziale o industriale, oltre a presentare una minore vulnerabilità strutturale (variabile tra 0.11 e 0.57) si collocano anche in contesti morfologici e urbanistici che non amplificano la vulnerabilità sismica (pianura e collina).

Un punto critico del modello è sicuramente rappresentato dall'esigenza di acquisire archivi vettoriali con elevata qualità geometrica. L'applicazione, pur lavorando su ampia scala cartografica, mira a classificare i singoli manufatti edili; di conseguenza, le geometrie dovrebbero rappresentare piuttosto fedelmente la realtà territoriale. Attualmente, negli archivi vettoriali disponibili presso le PPAA, sono invece rilevabili errori, soprattutto nelle aree a maggiore concentrazione di edifici, come i nuclei storici urbanizzati. In questi contesti è stato rilevato che nelle carte tecniche regionali, anche in scala 1:10'000, sono spesso presenti geometrie aggregate invece di poligoni suddivisi da vie pedonali di piccole dimensioni. In questi casi la vulnerabilità di forma planimetrica risulta sovrastimata a causa dell'articolazione complessa del poligono e anche la vulnerabilità di isolamento tende a valori elevati. A questo si aggiunge il fatto che il grafo stradale della Regione Toscana presenta alcuni tratti stradali senza classificazione dimensionale, ai quali è stato necessario attribuire, in via cautelativa, la classe dimensionale minore. Un ulteriore punto da approfondire risulta essere l'aspetto di natura strettamente architettonica legato ai materiali costruttivi, la cui influenza sull'effetto dell'evento sismico risulta rilevante (Alizadeh *et al.*, 2018; Banica *et al.*, 2017; Barbat *et al.*, 2009; Sarris *et al.*, 2010; Zuccaro *et al.*, 2008). La funzione di correlazione tra l'epoca di realizzazione del manufatto edilizio e la tecnica di costruzione impiegata (Indice di vulnerabilità storica), rappresenta tuttavia un'efficace strategia per un'analisi di tipo speditivo, quale quella proposta nel presente modello d'indagine. In assenza di informazioni dettagliate risulta infatti utile poter sviluppare strategie d'indagine che valorizzino gli archivi pubblici già disponibili, riducendo tempi e risorse necessarie per studi di dettaglio sui singoli edifici. Per migliorare la valutazione di tale aspetto sarebbe quindi auspicabile un'integrazione del modello con una specifica indagine campionaria sui materiali del patrimonio edilizio regionale e sui corrispondenti periodi di costruzione. Al riguardo esistono alcuni esempi di questo tipo d'indagine tra i quali quello di Arrighetti del 2016 sull'archeologia architettonica e quello di D'Ayala e Speranza del 1999 sulla meccanica strutturale. L'elevata qualità, affidabilità e completezza degli strati informativi utilizzati nella valutazione è quindi un prerequisito indispensabile per lo sviluppo di un modello rappresentativo, in grado di giungere ad una classificazione puntuale di ogni singolo edificio presente nel territorio di indagine.

---

<sup>20</sup> Sono stati considerati appartenenti ai centri storici gli edifici presenti all'interno di un'areale di 150 mq a partire dal baricentro dei poligoni rappresentanti i tessuti urbani ad impianto storico geolocalizzati nel territorio di studio.

Con le dovute integrazioni la metodologia proposta può quindi rappresentare un importante strumento di supporto per i diversi settori della PP.AA.. I risultati ottenuti, infatti, consentirebbero una collocazione più efficiente delle risorse pubbliche, concentrando le iniziative in contesti urbani sismicamente più critici, dove proporre e supportare l'attuazione di puntuali e approfondite indagini di vulnerabilità sismica. La maggiore conoscenza delle condizioni di vulnerabilità sismica a scala urbana, permetterebbe inoltre un miglioramento dell'organizzazione emergenziale, consentendo sia di individuare edifici e aree urbane potenzialmente più vulnerabili, sia di identificare edifici e aree sicure in cui pianificare punti di raccolta e vie di fuga. Per queste ultime aree sarà possibile definire azioni prescrittive nei piani urbanistici volte a mantenere o addirittura ridurre la loro vulnerabilità.

Grazie a tale metodologia sarebbe quindi possibile estendere le costose valutazioni, attualmente limitate ai soli edifici strategici e rilevanti, anche a tutte le altre categorie edilizie: residenziale, industriale e commerciale. La scelta di combinare parametri prettamente strutturali dei singoli edifici con parametri caratterizzanti la dimensione territoriale permette inoltre di includere nella definizione della vulnerabilità sismica del singolo edificio anche le condizioni di vulnerabilità di tutto il tessuto urbano che lo circonda, fornendo una visione valutativa ampia e coerente delle condizioni reali. Concludendo, è plausibile ipotizzare che il crescente sviluppo delle tecniche di telerilevamento, anche da immagini satellitari, possa colmare gli attuali gap informativi di carattere territoriale (dimensione della viabilità; conformazione dei poligoni edilizi nei centri storici; ecc.). Tale sviluppo, unitamente a quello delle tecnologie informatiche e dell'analisi remota delle tecniche costruttive, potrebbe garantire il raggiungimento di importanti risultati nel campo dell'analisi della vulnerabilità sismica e della pianificazione territoriale.

## References

- AA.VV. (2014). *Terremoto: Io non rischio. Speciale Toscana*, INGV. Giunti Progetti Educativi S.r.l. [https://ingvterremoti.com/wp-content/uploads/2015/06/9-toscana\\_19-06\\_web.pdf](https://ingvterremoti.com/wp-content/uploads/2015/06/9-toscana_19-06_web.pdf)
- Aczél, J., & Saaty, T. L. (1983). Procedures for synthesizing ratio judgements. *Journal of Mathematical Psychology*, 27(1), 93–102.
- Alizadeh, M., Hashim, M., Alizadeh, E., Shahabi, H., Karami, M. R., Pour, A. B., Pradhan, B., & Zabihi, H. (2018). Multi-criteria decision making (MCDM) model for seismic vulnerability assessment (SVA) of urban residential buildings. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/ijgi7110444>
- Armaş, I. (2012). Multi-criteria vulnerability analysis to earthquake hazard of Bucharest, Romania. *Natural Hazards*, 63(2), 1129–1156. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0209-2>
- Arrighetti, A. (2016). Materiali e tecniche costruttive del Mugello tra basso Medioevo e prima Età Moderna. *Arqueologia de La Arquitectura*, 13, 1–16. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2016.001>
- ATC-13. (1985). Earthquake damage evaluation data for California. Report ATC-13, Applied Technology Council. Redwood City, California, US.
- ATC-21. (1988). Rapid visual screening of building for potential seismic hazards: a handbook. Applied Technology Council, FEMA 145. Redwood City, California, US.
- Atzori, S., Hunstad, I., Chini, M., Salvi, S., Tolomei, C., Bignami, C., Stramondo, S., Trasatti, E., Antonioli, A., & Boschi, E. (2009). Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of

- the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy). *Geophysical Research Letters*, 36, 1–6. <https://doi.org/10.1029/2009GL039293>
- Banica, A., Rosu, L., Muntele, I., & Grozavu, A. (2017). Towards urban resilience: a multi-criteria analysis of seismic vulnerability in Iasi City (Romania). *Sustainability*, 9(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su9020270>
- Barbat, A. H., Carreño, M. L., Pujades, L. G., Lantada, N., Cardona, O. D., & Marulanda, M. C. (2009). Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1), 17–38.
- Berghauser Pont, M., & Haupt, P. (2007). The relation between urban form and density. *Urban Morphology*, 11(1), 62–65.
- Bernetti, I. (2006). Modelli di valutazione ambientale (2006). In Menghini S. (Ed.). *Risorse naturali e ambiente. Strumenti di valutazione*. Bologna, FrancoAngeli.
- Bernetti, I., & Fagarazzi, C. (2002). L'impiego dei modelli multicriteriali geografici nella pianificazione territoriale. *Aestimum*, 41, 1–26. <https://doi.org/10.13128/Aestimum-6405>
- Bono, F., & Gutiérrez, E. (2011). A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1443–1455. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.08.002>
- Calvi, G. M. (1999). A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(3), 411–438. <https://doi.org/10.1080/13632469909350353>
- Chen, S.-J., & Hwang, C.-L. (1992). *Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag.
- Costanzo, A., Montuori, A., Silva, J. P., Silvestri, M., Musacchio, M., Doumaz, F., Stramondo, S., & Buongiorno, M. F. (2016). The combined use of airborne remote sensing techniques within a GIS environment for the seismic vulnerability assessment of urban areas: An operational application. *Remote Sensing*, 8(146), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs8020146>
- Cozzi, M., Persiani, G., Viccaro, M., Riccioli, F., Fagarazzi, C., & Romano, S. (2016). Approcci innovativi per la classificazione delle aree rurali: dagli indirizzi europei all'applicazione locale. *Aestimum*, 67, 97–110. <https://doi.org/10.13128/Aestimum-17941>
- D'Apuzzo, L., & Ventre, A. G. (1995). *Algebra lineare e geometria analitica 1: con un'introduzione al processo gerarchico analitico (the analytic hierarchy process)*. Padova, CEDAM.
- D'Ayala, D. F., & Speranza, E. (1999). Identificazione dei meccanismi di collasso per la stima della vulnerabilità sismica di edifici nei centri storici. *9th National Conference "L'Ingegneria Sismica in Italia."*
- de Jong, P. (2011). Density, form and performance. *Korean Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH Korea)*. Available online at: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:8829c914-2b7f-46d3-aebd-40ed7e1b6a56/> (Accessed 4 June 2020).
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J., & Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
- Dodgson, J. S., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L. D. (2009). *Multi-Criteria Analysis: a manual*. Department for Communities and Local Government: London, UK. Available online at: <http://eprints.lse.ac.uk/12761/> (Accessed 4 June 2020).
- Eastman, J. R., & Jiang, H. (1995). Fuzzy measures in multi-criteria evaluation. In *Proceeding of the Second International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Studies, May 21-23 (Fort Collins, Colorado)*, 527–534.
- Erden, T., & Karaman, H. (2012). Analysis of earthquake parameters to generate hazard maps by integrating AHP and GIS for Küçükçekmece region. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(2), 475–483. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-475-2012>
- Fagarazzi, C. (2006). Metodologie di analisi delle potenzialità ecoturistiche: un caso di studio. In Menghini S. (Ed.). *Risorse naturali e ambiente: strumenti di valutazione*. (pp. 155–182). Bologna, FrancoAngeli.

- GNDT-SSN. (1994). Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e secondo livello (muratura e cemento armato). Gruppo Nazionale per La Difesa Dai Terremoti, Roma GNDT.
- Guéguen, P., Michel, C., & Lecorre, L. (2007). A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: Application to Grenoble (France). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), 467–490. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9036-3>
- Guidoboni, E., & Ferrari, G. (2000a). Historical variables of seismic effects: economic levels, demographic scales and building techniques. *Annali Di Geofisica*, 43(4), 687–705.
- Guidoboni, E., & Ferrari, G. (2000b). The effects of earthquakes in historical cities: the peculiarity of the Italian case. *Annali Di Geofisica*, 43(4), 667–686.
- Haimes, Y. Y., & Chankong, V. (1985). *Decision Making with Multiple Objectives*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag.
- HAZUS. (1999). Earthquake loss estimation methodology—technical and user manuals. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Hizbaron, D. R., Baiquni, M., Sartohadi, J., & Rijanta, R. (2012). Urban vulnerability in Bantul district, Indonesia-towards safer and sustainable development. *Sustainability*, 4(9), 2022–2037. <https://doi.org/10.3390/su4092022>
- Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Available online at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm> (Accessed 4 June 2020).
- Jiang, H., & Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173–184. <https://doi.org/10.1080/136588100240903>
- Kacprzyk, J., Zadrozny, S., & Fedrizzi, M. (1988). An interactive user friendly decision support system for consensus reaching based on Fuzzy Logic with linguistic quantifiers. In Gupta, M.M., & Yamakawa, T. (Eds.). *Fuzzy Computing*. Amsterdam, Elsevier.
- Karimzadeh, S., & Matsuoka, M. (2018). Building Damage Characterization for the 2016 Amatrice Earthquake Using Ascending-Descending COSMO-SkyMed Data and Topographic Position Index. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(8), 2668–2682. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2825399>
- Karimzadeh, S., Miyajima, M., & Hassanzadeh, R. (2014). A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 263–280. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.026>
- Koungoulos, I., Cook, S. J., Jomelli, V., Clarke, L., Symeonakis, E., Dortch, J. M., Edwards, L. A., & Merad, M. (2018). Use of multi-criteria decision analysis to identify potentially dangerous glacial lakes. *Science of the Total Environment*, 621, 1453–1466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.083>
- Lagomarsino, S., & Podestà, S. (2004). Seismic Vulnerability of Ancient Churches: I. Damage Assessment and Emergency Planning. *Earthquake Spectra*, 20(2), 377–394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1193/1.1737735>
- Lourenço, P. B., & Roque, J. A. (2006). Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings. *Construction and Building Materials*, 20(4), 200–208.
- Lucchesi, F., Tabarrini, I., & Tofanelli, M. (2007). Cartografia per la visualizzazione della struttura insediativa e paesaggistica: due carte per la regione del Chianti. *Atti 11 Conferenza Nazionale ASITA, Centro Congressi Lingotto, Torino 6 – 9 Novembre 2007*, 1–8.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. New York, John Wiley & Sons.
- Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62(1), 3–65. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>
- Marradi, A. (1994). Referti, pensiero e linguaggio: una questione rilevante per gli indicatori. *Sociologia e Ricerca Sociale*, 15(43), 137–207.
- Mogorovich, P. (2019). *Sistemi Informativi Territoriali Appunti dalle lezioni Versione 3.216*. Available online at: [http://pages.di.unipi.it/mogorov/SIT\\_Vers\\_3\\_216](http://pages.di.unipi.it/mogorov/SIT_Vers_3_216) (Accessed 4 June 2020).
- Monacci, F., & Lucchesi, F. (2010). Geografia delle sedi in Garfagnana ( Lucca ). L' insegnamento dei geografi italiani riletto alla luce di un' esperienza di ricerca recente sulla crescita insediativa toscana. *Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA - Brescia 9-12 Novembre 2010*, 1369–1374.

- Nguyen, K. Van, & Gatmiri, B. (2007). Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(2), 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.06.005>
- Novelli, V. I. (2017). *Hybrid method for the seismic vulnerability assessment of historic masonry city centres*. PhD Thesis University College London. Available online at: [https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1553222/1/Novelli\\_ID\\_PHD\\_thesis.pdf](https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1553222/1/Novelli_ID_PHD_thesis.pdf) (Accessed 4 June 2020).
- Paolillo, P. L. (2005). Il contenimento della dispersione insediativa e l'uso degli indicatori nella valutazione ambientale strategica: un'applicazione in area vasta. *Urbanistica*, 128, 111–123.
- Pessina, V., & Fiorini, E. (2014). A GIS procedure for fast topographic characterization of seismic recording stations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, 248–258.
- Rashed, T., & Weeks, J. (2003). Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(6), 547–576. <https://doi.org/10.1080/1365881031000114071>
- Rezaie, F., & Panahi, M. (2015). GIS modeling of seismic vulnerability of residential fabrics considering geotechnical, structural, social and physical distance indicators in Tehran using multicriteria decision-making techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3), 461–474. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-461-2015>
- Ripepe, M., Lacanna, G., Deguy, P., Stefano, M. De, Mariani, V., & Tanganelli, M. (2014). ASITA 2014 Metodologia per una valutazione, a larga scala, della vulnerabilità sismica. Applicazione alla città di Firenze. *Conferenza ASITA 14-16 Ottobre*, 1049–1051.
- Romano, D. (2006). Le problematiche valutative delle risorse naturali e ambientali. In Menghini, S. (Ed). *Risorse naturali e ambiente: strumenti di valutazione*. Bologna, FrancoAngeli.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York, McGraw-Hill.
- Sadrykia, M., Delavar, M. R., & Zare, M. (2017). A GIS-based fuzzy decision making model for seismic vulnerability assessment in areas with incomplete data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 119. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040119>
- Sarris, A., Loupasakis, C., Soupios, P., Trigkas, V., & Vallianatos, F. (2010). Earthquake vulnerability and seismic risk assessment of urban areas in high seismic regions: application to Chania City, Crete Island, Greece. *Natural Hazards*, 54(2), 395–412. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9475-z>
- Servi, M. (2004). *Assessment of Vulnerability to Earthquake Hazards Using Spatial Multicriteria Analysis: Odunpazari, Eskisehir Case Study*. Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Silavi, T., Delavar, M. R., Malek, M. R., & Kamalian, N.; Karimizand, K. (2006). An integrated strategy for GIS-based fuzzy improved earthquake vulnerability assessment. *Proceedings of the Second International Symposium in Geo-Information for Disaster Management, ISPRS, 25-26 September 2006*, 6.
- Sinha, N., Priyanka, N., & Joshi, P. K. (2016). Using Spatial Multi-Criteria Analysis and Ranking Tool (SMART) in earthquake risk assessment: a case study of Delhi region, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 680–701. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.945100>
- Tagil, S., & Jenness, J. (2008). GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 8(6), 910–921.
- Tourangeau, R., & Rasinski, K. A. (1988). Cognitive processes underlying context effects in attitude measurement. *Psychological Bulletin*, 103(3), 299–314. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.103.3.299>
- Vicente, R., Parodi, S., Lagomarsino, S., Varum, H., & Silva, J. A. R. M. (2011). Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 1067–1096. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9233-3>
- Walker, B. B., Taylor-Noonan, C., Tabbernor, A., McKinnon, T. B., Bal, H., Bradley, D., Schuurman, N., & Clague, J. J. (2014). A multi-criteria evaluation model of earthquake vulnerability in Vic-

- toria, British Columbia. *Natural Hazards*, 74(2), 1209–1222. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1240-2>
- Weiss, A. D. (2001). Topographic position and landforms analysis. *Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA*. [https://doi.org/http://www.jennessent.com/downloads/TPI-poster-TNC\\_18x22.pdf](https://doi.org/http://www.jennessent.com/downloads/TPI-poster-TNC_18x22.pdf)
- Woo, G. (2011). Earthquake decision-making / Processo decisionale in caso di terremoto. *Ambiente Rischio Comunicazione*, 1, 7–10.
- Zuccaro, G., Albanese, V., Cacace, F., Mercuri, C., Papa, F., Pizza, A. G., Sergio, S., & Severino, M. (2008). Seismic vulnerability evaluations within the structural and functional survey activities of the COM bases in Italy. *AIP Conference Proceedings*, 1020(PART 1), 1665–1674. <https://doi.org/10.1063/1.2963797>
- Zuccaro, G., Dolce, M., De Gregorio, D., Speranza, E., & Moroni, C. (2015). La Scheda Cartis Per La Caratterizzazione Tipologico- Strutturale Dei Comparti Urbani Costituiti Da Edifici Ordinari. Valutazione dell'esposizione in analisi di rischio sismico. *Proceedings of the GNGTS*.