

APPLICAZIONE E ANALISI DELL'INDICE DI QUALITÀ PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA

B. Quadrio¹, M. Ambrosanio², M. Ioannilli², F. Bramerini³, S. Castenetto³, G. Naso³

¹ CNR-IGAG, Roma

² Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Università "Tor Vergata", Roma

³ Dipartimento della Protezione Civile, Roma

A partire dal 2010, nell'ambito del programma previsto dalla legge 77/2009, sono stati finanziati sul territorio nazionale 1657 studi di microzonazione sismica (MS). Nel 2013, con la prospettiva di verifica e ottimizzazione delle risorse impiegate e di garanzia di livelli qualitativi omogenei, nell'ambito dei lavori della Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica istituita con DPCM 21/04/2010, è stato predisposto un metodo sperimentale (Quadrio *et al.*, 2013), basato sul sistema standard di archiviazione dei dati geografici adottato a livello nazionale (CTMS, 2013), finalizzato a calcolare un indice di qualità, a partire dalla tipologia e dalla distribuzione geografica delle indagini effettuate all'interno delle singole microzone.

Il metodo che è stato messo a punto è finalizzato a restituire un quadro sintetico (attraverso un indice convenzionalmente denominato "indice di qualità" - IQ) dell'insieme dei dati che vengono utilizzati per caratterizzare ciascuna microzona e ad orientare eventuali azioni da intraprendere al fine di migliorare o elevare i livelli qualitativi degli studi effettuati. L'indice di qualità è formulato sulla base della tipologia e della distribuzione delle indagini (pregresse e condotte *ex novo*) e sulla qualità dei dati di base (cartografie di base, elaborazioni) a partire da quanto definito in ICMS (2008) e come integrati attraverso gli Standard (CTMS, 2013). È, quindi, un indice basato sulle conoscenze di base degli studi di MS.

Una serie di sperimentazioni ha consentito di mettere in luce aspetti e criticità dell'indice. Grazie ai contributi delle Regioni e dei tecnici che operano nell'ambito degli studi di MS, sono state apportate una serie di modifiche e integrazioni al metodo originariamente messo a punto, consentendo una valutazione finale degli elaborati, il più possibile coerente con i dati effettivamente utilizzati per la realizzazione degli studi.

Indice di Qualità (IQ). La metodologia di calcolo di IQ analizza uno studio di MS in base al livello di confidenza conoscitiva delle singole microzone che lo compongono, a loro volta analizzate ciascuna in base alle indagini in esse condotte (geologiche, geotecniche, geofisiche ecc.) e ai dati di base utilizzati (cartografie geologiche, geomorfologiche, ecc.). Ciò si esplica nel valutare due aspetti fondamentali: il primo relativo alla tipologia di indagini esperite per caratterizzare ciascuna microzona, il secondo legato alla distribuzione geografica delle indagini stesse all'interno della singola microzona.

L'indice si basa sulla valutazione di una serie di dati oggettivi, senza entrare nel merito delle elaborazioni effettuate a giudizio esperto dai singoli professionisti.

L'IQ della carta di MS viene definito complessivamente componendo gli Indici di Qualità delle singole microzone (IQ_x , con x numero identificativo della singola microzona). Ciascuno degli IQ_x è a sua volta derivato dalla combinazione di due indici distinti:

- Indice di tipologia (It_x), riferito alla tipologia delle indagini presenti nella microzona;
- Indice di distribuzione (Id_x), riferito alla distribuzione delle indagini presenti nella microzona.

La metodologia di valutazione che è stata definita è applicabile, variando opportuni parametri, a tutti e tre i livelli di approfondimento degli studi di MS.

Indice di tipologia (It_x). L'Indice di tipologia (It_x) valuta l'affidabilità conoscitiva della singola microzona in funzione della tipologia delle indagini effettuate. In uno studio di MS le diverse tipologie di indagini effettuabili presentano profili di significatività diversi in funzione della tipologia di microzona e del livello di approfondimento. In primo luogo, nella metodologia sviluppata viene esaminata la presenza/assenza di cosiddette "indagini essenziali", in funzione di (Tab. 1):

- ciascuno dei gruppi di tipologie di indagini
- il tipo di microzona (stabile, stabile suscettibile di amplificazione e instabile)
- il livello di approfondimento dello studio di MS

Tab. 1 - Gruppi di tipologie di indagini per livello di approfondimento di MS e per tipo di microzona.

Livello	Tipo zona	Gruppo						
MS1	stab	a	b					
	stab amp	a	b	c				
	instab	a	c					
MS2	stab	a	b					
	stab amp	a	b	c	d	e		
	instab	a	b	c	d	e		
MS3	stab	a						
	stab amp	a	b	c	d	e	f	g
	instab	a	b	c	d	e	f	g

Per ciascuno dei gruppi di tipologie di indagini deve essere presente almeno un'indagine essenziale. Vengono considerate essenziali le indagini che forniscono parametri direttamente utili alla descrizione compiuta della pericolosità sismica locale della microzona e la loro presenza è considerata indispensabile per raggiungere un risultato almeno sufficiente in termini di affidabilità di contenuti nell'ambito di uno studio di MS.

In secondo luogo, ad ogni tipologia di indagine è stato assegnato, a giudizio esperto, un punteggio (che rappresenta una misura sintetica della significatività dell'indagine stessa), diversificato secondo il livello di approfondimento e il tipo di microzona.

A titolo esemplificativo viene riportato in Tab. 2 l'elenco delle indagini con i relativi punteggi dei gruppi "a" e "b" relativamente al livello MS1 per le zone stabili.

In base alla verifica della presenza/assenza delle indagini essenziali e al calcolo del totale dei punteggi associati alle indagini (considerate una sola volta per ciascuna tipologia), ogni microzona dello studio viene classificata secondo una scala qualitativa, che esprime un giudizio sull'idoneità del tipo di indagini effettuate.

Successivamente viene effettuata una normalizzazione della somma dei punteggi in funzione della tipologia della microzona e del livello di approfondimento (MS1, MS2 e MS3).

Il risultato del calcolo della somma dei punteggi e della normalizzazione di questa somma è It_x .

Tab. 2 - Esempio di punteggi associati a ciascuna tipologia di indagine a seconda del livello di approfondimento dello studio e della tipologia di microzona.

Livello	Tipo_zona	Gruppo	ID_indagine	Tipo_indagine	Punteggio
MS1	stab amp	a	1:25k-1:11k	Carta geologico-tecnica	0.5
MS1	stab amp	a	1:10k-1:6k	Carta geologico-tecnica	3
MS1	stab amp	a	1:5k-1:2k	Carta geologico-tecnica	5
MS1	stab amp	b	REMI	REMI	2
MS1	stab amp	b	SDMT	dilatometria sismica	3
MS1	stab amp	b	SCPT	prova penetrometrica con cono sismico	3
MS1	stab amp	b	DH	down-hole	4
MS1	stab amp	b	CH	cross-hole	5
MS1	stab amp	b	UH	up-hole	3
MS1	stab amp	b	HVSR	Microtremori a stazione singola	2
MS1	stab amp	b	ESAC_SPAC	ESAC/SPAC	2.5
MS1	stab amp	b	SL	Sismica a riflessione	2
MS1	stab amp	b	SR	Sismica a rifrazione	2
MS1	stab amp	b	SASW	SASW	2
MS1	stab amp	b	MASW	MASW	2
MS1	stab amp	b	FTAN	FTAN	2

Indice di distribuzione (Id_x). L'indice di distribuzione (Id_x) è stato formulato al fine di quantificare in un valore sintetico diverse caratteristiche riguardanti la distribuzione spaziale delle indagini all'interno delle singole microzone.

In particolare Id_x caratterizza ciascuna microzona dal punto di vista:

- dell'area della microzona sottoposta ad indagine in rapporto all'area totale della microzona. Per poter effettuare tale caratterizzazione è necessario che vengano preliminarmente determinati, sulla base di un giudizio esperto, degli intorni delle indagini all'interno dei quali si ritiene siano estendibili i risultati delle indagini stesse. Si assume, in generale, che sia condizione di maggiore affidabilità quella in cui la superficie esterna agli intorni sia di piccole dimensioni rispetto alla superficie totale della microzona;
- della distribuzione spaziale delle indagini presenti nella microzona, assumendo una maggiore affidabilità per quelle microzone in cui le indagini presentano una distribuzione uniforme; il concetto di distribuzione uniforme è stato tradotto analiticamente. In modo intuitivo è stato inteso come quella distribuzione per cui le indagini non sono concentrate in uno o più cluster, né sono eccessivamente distanti tra loro, bensì sono distribuite su tutta la superficie della microzona, in modo tale che non vi siano parti della microzona eccessivamente distanti da indagini.

La coesistenza di una serie di elementi legati alla valutazione di tale parametro rende considerevole il grado di complessità. Id_x deve infatti tenere in contemporanea considerazione il grado di copertura della microzona e la distribuzione delle indagini al suo interno, in contesti con microzone dalla forma e dimensione estremamente variabile. È risultata evidente l'impossibilità di adottare procedure di calcolo basate sulle tradizionali tecniche di analisi spaziale delle distribuzioni di punti (Ebdon, 1985; Silverman, 1986) o di *tassellation* (Du *et al.*, 1999) poiché queste restituiscono, nello specifico problema in esame, valori non completamente significativi per poter valutare la distribuzione. Infatti nella problematica qui affrontata si è in presenza di zone dalla forma estremamente variabile e in cui i punti di indagine sono in numero

limitato, di conseguenza non sono utilizzabili metodi che risentano fortemente degli effetti di bordo o, viceversa, che non considerino affatto l'esistenza di un confine; nemmeno percorribile è l'ipotesi di assumere come riferimento distribuzioni ottimali basate su configurazioni non analiticamente univoche, come nel caso di Voronoi centroidali, che in caso di poche indagini possono corrispondere a distribuzioni di tipo completamente diverso.

Per il calcolo dell'indice I_d , è stata definita una zona intorno alle indagini in cui si ritiene siano estendibili i risultati dell'indagine stessa (area di pertinenza), di dimensioni dipendenti dalla tipologia di microzona e del contesto in cui ricade. Ciò si traduce nel calcolo di un buffer, a distanze parametrizzate, intorno alle indagini e solo limitatamente all'interno del perimetro della microzona in cui ricade l'indagine.

In una prima ipotesi (Quadrio *et al.*, 2013), alla quale sono seguite una serie di sperimentazioni, la dimensione dei buffer delle indagini era principalmente basata, oltre che sulla tipologia della microzona, sul contesto geologico all'interno del quale ricadeva la microzona stessa.

Sulla base di evidenze sperimentali, la definizione dei raggi di buffer è stata ricalibrata, basandosi principalmente sulla tipologia della microzona e adottando un valore costante per indagini ricadenti in zone stabili e instabili: le aree instabili non dipendono in generale dal contesto geologico e pertanto il buffer legato alle indagini ricadenti in tali ambiti può essere considerato univoco; allo stesso modo, le incertezze legate alla caratterizzazione delle zone stabili sono da considerare invariate a seconda dei diversi contesti geologici analizzati.

I raggi di buffer delle indagini ricadenti in zone stabili suscettibili di amplificazione sono stati invece differenziati sulla base del livello di conoscenza dell'area indagata, dipendente dal contesto nel quale ricade, definendo tre gruppi definiti dalla Tab. 3:

Tab. 3 - Valori dei raggi di buffer per la definizione di I_{dx} per i diversi tipi di microzona.

Zona	Gruppo	Descrizione sintetica	Livello di conoscenza	Raggio buffer (m)
Zona stabile	-	-	-	150
Zona stabile suscettibile di amplificazione	A	Amplificazioni dovute a cause molto ben investigabili perché definibili già da rilievi di superficie	Alto	120
	B	Amplificazioni dovute a cause investigabili con indagini geofisiche e geotecniche poco profonde	Medio	90
	C	Amplificazioni dovute a cause difficilmente investigabili perché molto profonde e/o perché dovute a più cause concomitanti o non univocamente individuabili	Basso	60
Zona instabile	-	-	-	30

Ad ogni gruppo, la cui descrizione sintetica è riportata in Tab.3, sono associati diversi contesti tipo, riportati in Tab. 4:

Operativamente, l'indice I_{dx} si basa sul concetto che a distanze dalle indagini inferiori al raggio di buffer l'informazione relativa all'indagine sia estrapolabile ed estendibile, mentre a distanze maggiori vi sia una carenza che pesa in maniera proporzionale al quadrato della distanza. Tale carenza è quantificata dall'indice valutando la distribuzione delle distanze dal buffer in maniera pesata rispetto alla superficie corrispondente a ciascuna distanza.

Tab. 4 - Contesti tipo associati ai gruppi delle zone suscettibili di amplificazione.

Gruppo	Contesto tipo
A	<ul style="list-style-type: none"> - Versanti in roccia - Rupi in roccia - Creste o cime - Valli strette in roccia - Zone di pianura con substrato molto profondo
B	<ul style="list-style-type: none"> - Successioni litostratigrafiche con contrasti di impedenza a piccole profondità - Paleovalvei sepolti - Successioni litostratigrafiche con inversioni di velocità a piccole profondità - Substrato sepolto articolato a piccole profondità
C	<ul style="list-style-type: none"> - Successioni di versante in terreni soffici (effetti topografici e litostratigrafici) - Successioni di rupe in terreni soffici (effetti topografici e litostratigrafici) - Aree pedemontane con incertezze sull'andamento del substrato sepolto - Valle stretta colmata da terreni soffici (effetti topografici e litostratigrafici)

Indice di qualità delle microzone (IQ_x) e della carta (IQ). Per ciascuna microzona, l'indice di distribuzione (Id_x) viene composto con l'indice di tipologia (It_x) per ottenere un indice di qualità (IQ_x) della microzona. I diversi indici delle microzone contribuiscono a un indice di qualità (IQ) della carta di MS (Quadrio *et al.*, 2013).

Tool in ambiente GIS. Uno specifico *tool* è stato sviluppato in ambiente GIS per il completo calcolo degli indici da parte dell'utente, senza necessità di elaborazioni manuali aggiuntive, e per la presentazione dei risultati. Il *tool* utilizza in ingresso i dati di MS strutturati secondo gli Standard (CTMS, 2013) e consente all'utente di inserire, tramite specifiche maschere, eventuali informazioni aggiuntive utili per il calcolo degli indici.

Il *tool* restituisce una serie di tematismi in forma grafica (Quadrio *et al.*, 2013), corrispondenti ai diversi indici calcolati, che consentono una percezione rapida e intuitiva dei risultati ottenuti.

Per quanto riguarda l'indice di tipologia, viene anche elaborata la componente alfanumerica dei dati, fornendo come risultato per ciascuna microzona anche l'indicazione sulle eventuali indagini essenziali mancanti, in formato tabellare.

È stato inoltre progettato un *format* tipo (Fig. 1) nel quale sono riassunti anche in forma statistica i principali risultati ottenuti. Una sezione di tale *format* è dedicata all'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE). Vengono riportati gli elementi dell'analisi in relazione alle tipologie di microzona all'interno delle quali ricadono.

Sperimentazione. La messa a punto del *tool* ha permesso una serie di sperimentazioni rapide e semi automatizzate, che hanno consentito di migliorare le ipotesi iniziali. Nello specifico, sono state valutate le variazioni dei due indici Id_x e It_x al variare dei dati di ingresso (distribuzione e tipologia delle indagini).

Per quanto riguarda Id_x , al fine di poter determinare ad un primo livello la sensibilità dell'indice, sono state effettuate diverse simulazioni su microzone schematiche ideali, in cui sono stati fatti variare numero e posizione delle indagini. Nello specifico, sono state scelte due configurazioni: una prima più uniforme di forma quadrata e una seconda di forma allungata al fine di simulare maggiormente i casi reali in cui le microzone sono caratterizzate da asimmetrie ed eccentricità. È stato osservato che i valori di Id_x tendono ad aumentare all'aumentare dell'area dei buffer rispetto a quella della microzona. L'algoritmo tende a penalizzare i casi in cui nella microzona siano presenti un maggior numero di indagini in forma clusterizzata,



INDICE DELLA QUALITA' DEI DATI PER GLI STUDI DI MS (IQ)

DATI E RISULTATI SINTETICI					
Regione	Emilia-Romagna				
Provincia	Parma				
Comune	Pellegrino Parmense				
Cod. ISTAT	034028				
Area delle microzone con indagini (%)	79				
Area della microzone senza indagini (%)	21				
Suddivisione del territorio (superfici in %)					
Stab	0	Stab_amp	98	Instab	2
INDICE DI QUALITÀ DELLA CARTA (IQ _{MS})					
IQ (solo microzone con indagini)	0.79				
Classe	B				

Superficie per tipo di microzona e indici di tipologia e distribuzione (%)					
		Stab	Stab amp	Instab	Totale
It (superfici in %)	buono/ottimo	0	32	0	32
	sufficiente	0	42	0	42
	insufficiente	0	5	0	5
	NC	0	19	2	21
Id (superfici in %)	buono/ottimo	0	54	0	54
	sufficiente	0	25	0	25
	insufficiente	0	0	0	0
	NC	0	19	2	21

Elementi dell'analisi della CLE per tipo di microzona					
CLE	ES (n°)				
	AE (n°)				
	AC (%)				
	AS (n°)				
	US (n°)				

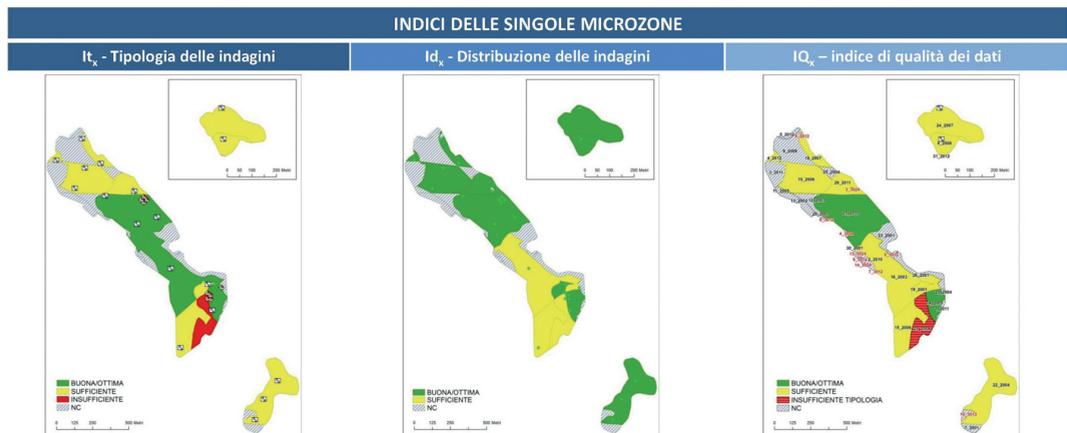


Fig. 1 – Format tipo con i risultati restituiti dal sistema.

rispetto a casi con un numero minore di indagini, ma uniformemente distribuite. Oltre ai casi ideali è stata effettuata una sperimentazione su circa 50 casi reali, relativi a microzonazioni ubicate in contesti geografici differenti.

I risultati osservati sono necessariamente funzione della dimensione delle microzone e della concentrazione di indagini in esse presenti. A parità di dimensioni delle microzone e numero di indagini, i risultati sono del tutto analoghi a quelli osservati su casi ideali.

Per quanto riguarda It_x , è stata condotta una sperimentazione sulle indagini presenti nelle microzone mantenendo costante la distribuzione e variandone la tipologia. La variazione della tipologia di indagine porta ad una declassazione o ad un miglioramento dell'indice a seconda che vengano eliminate o introdotte indagini ritenute essenziali per il livello di approfondimento o il tipo di microzona.

La coerenza dei punteggi associati a ciascun tipo di indagine per la definizione di It_x è stata esaminata anche attraverso un'analisi economica. Sulla base di un valore medio del costo di ciascuna indagine definito dai prezziari regionali italiani (Regione Emilia-Romagna, Regione Toscana, Regione Lombardia, Regione Calabria), è stata valutata la distribuzione dei punteggi associati alle indagini in relazione ai costi (Fig. 2). Per le indagini non quantificabili a corpo, è stata adottata una misura standard (p. es.: 30 m per sondaggi e prove penetrometriche).

Tale analisi è stata definita per ogni tipologia di microzona e livello di approfondimento dello studio. L'analisi ha mostrato come esista una correlazione diretta tra il costo delle indagini e i punteggi, permettendo di migliorare situazioni anomale: in generale, indagini con un costo più elevato hanno associato un punteggio più elevato. È inoltre interessante notare come emergano

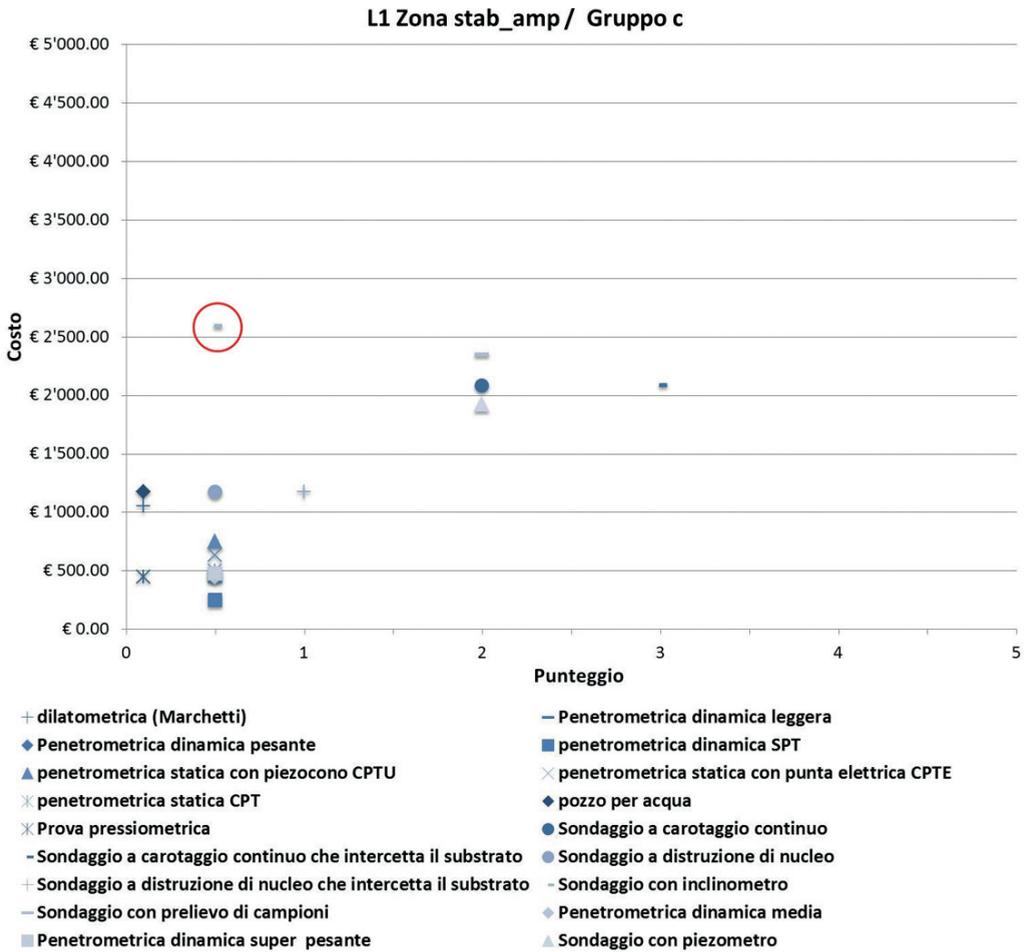


Fig. 2 – Analisi dei prezzi delle indagini in relazione al punteggio associato per il calcolo di I_{tx} . L’analisi si riferisce alle indagini del gruppo “c”, livello MS1, zona stabile suscettibile di amplificazione. Nel cerchio rosso, l’indagine fuori trend tipo “sondaggio con inclinometro”.

indagini correttamente fuori *trend* (ad es. con costi molto elevati), che hanno una valenza in termini di punteggio molto bassa in relazione al contesto nelle quali ricadono. In Fig. 2, a titolo esemplificativo, è mostrato l’andamento dei costi delle indagini relative ad uno studio di livello I ricadenti in zone stabili suscettibili di amplificazione. Come è possibile notare esiste un buon accordo generale tra punteggi e costi. Fuori dal *trend* si colloca l’indagine tipo “sondaggio con inclinometro” alla quale è associato un punteggio molto basso pur presentando un costo superiore al resto delle indagini del gruppo: tale indagine non è infatti appropriata in relazione al contesto in cui ricade.

Discussione. Nel corso della predisposizione della metodologia e delle conseguenti applicazioni che sono state effettuate su numerose MS prodotte in attuazione dell’art 1 della legge 77 sono emersi alcuni elementi critici ed alcuni aspetti positivi.

Uno dei principali elementi di debolezza del sistema riguarda l’attribuzione dei punteggi alle singole indagini per la definizione di I_{tx} . La valutazione di tale parametro è da considerarsi ancora troppo dipendente da un giudizio esperto e non ancora supportato da una sufficiente base sperimentale che consenta di definire un *ranking* di validità nell’ambito dei diversi tipi di indagine. Una sperimentazione a livello più ampio, che si renderà possibile grazie al crescente

numero di studi prodotti, consentirà una valutazione su una casistica tale da consentire una visione più completa rispetto ai punteggi associati ai diversi tipi di indagine.

Uno degli aspetti positivi è senz'altro quello dovuto al fatto che indipendentemente dalle condizioni strutturali favorevoli fino ad oggi adottate per la predisposizione degli studi (CTMS, 2013), l'approccio metodologico è indipendente rispetto a questi e può essere adottato più in generale come modalità non solo valutativa in corso d'opera, ma come strumento orientativo per una serie di scelte finalizzate al miglioramento qualitativo complessivo.

In particolare la correlazione esistente (come sopra evidenziato) fra costi delle indagini e miglioramento dell'indicatore può essere utilizzata come percorso virtuoso di ottimizzazione e orientamento delle scelte. È altresì vero che il fatto di aver adottato il sistema di standardizzazione su larga scala (per tutto il territorio nazionale) consente di mettere a confronto una mole di dati fortemente dipendente da diversi contesti territoriali e approcci metodologici anche molto diversi. È infatti questa condizione che costituisce il presupposto per focalizzare il nucleo concettuale portante del metodo proposto, su due fattori: tipologia delle indagini e loro distribuzione. Tale nucleo concettuale potrebbe costituire il naturale presupposto per una serie di metodologie applicabili in modo più generale anche in altri contesti.

Riconoscimenti. Si ringraziano Dario Albarello (Università di Siena), Massimo Baglione (Regione Toscana), Giovanni Calcagni (Consiglio Nazionale dei Geologi), Antonio Colombi (Regione Lazio), Luca Martelli (Regione Emilia-Romagna), Massimiliano Moscatelli (CNR-IGAG), Andrea Motti (Regione Umbria), Giuseppe Raspa (UniRoma1) per i contributi e le integrazioni e InTime s.r.l. per la realizzazione del software.

Bibliografia

- CTMS, Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica; 2013: *Articolo 5, comma 7 dell'OPCM 13 novembre 2010, n.3907 - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica* – Versione 3.0 Roma, Ottobre 2013. http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_3.0_open.pdf
- Ebdon D.; 1985: *Statistics in geography*. Blackwell, Oxford, UK
- Du Q., Faber V., & Gunzburger, M.; 1999: *Centroidal Voronoi tessellations: applications and algorithms*. *SIAM review*, **41**, 637-676.
- Quadrio B., Ambrosiano M., Ioannilli M., Brammerini F, Castenetto S., Naso G.; 2013: *Definizione di un indice di affidabilità per gli studi di microzonazione sismica*. *Atti GNGTS, 2013 Vol 2*, 317-324
- Silverman, B. W.; 1986: *Density estimation for statistics and data analysis*. CRC press, USA, Vol. 26