
EFFETTI GEOLOGICI SUPERFICIALI DEL TERREMOTO EMILIANO 2012:

studi finalizzati al miglioramento della sicurezza e sostenibilità dello sviluppo territoriale (EGEST)

LANFREDI SOFIA C.¹, MANTOVANI A.², PRIORE F.³,
TARABUSI G.^{2,4}, *CAPUTO R.²

1. Università di Modena e Reggio Emilia
 2. Università di Ferrara
 3. Università di Parma; ora Proambiente
 4. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Roma
- * Coordinatore Progetto EGEST

1. PREMESSA

Le pianure alluvionali, e tra queste quella Padana, rappresentano le aree più densamente popolate del pianeta grazie alla combinazione di fattori geologici, morfologici e idrologici che le rendono particolarmente idonee per estese coltivazioni, ma soprattutto per la realizzazione di grandi insediamenti urbani, importanti distretti industriali ed infrastrutture di collegamento. Così come per altri bacini di avansossa tettonicamente attivi, il processo di rottura cosismica nel sottosuolo della Pianura Padana non riesce a propagarsi fino alla superficie topografica (*i.e.* fagliazione cieca) e ciò rende questo tipo di sorgenti sismogeniche particolarmente difficili da identificare e caratterizzare (¹). I terremoti del maggio 2012 infatti hanno avuto origine proprio da due segmenti ciechi del cosiddetto Arco Ferrarese, che rappresenta il settore più avanzato dell'Appennino Settentrionale sepolto (²). Essi hanno generato un blando sollevamento (massimo 15-25 cm) della pianura per un'estensione di circa 40 x 10 km che soltanto sofisticate tecniche satellitari e livellazioni terrestri ad alta precisione (³) hanno potuto mettere in evidenza. In un contesto geo-

logico di subsidenza regionale, di forti apporti fluviali da parte del Po e dei suoi affluenti appenninici, e dei lunghi tempi di ritorno, questi 'rigonfiamenti' cosismici della superficie terrestre vengono progressivamente sepolti durante i lunghi periodi intersismici e la topografia progressivamente 'pareggiata' mascherando quindi in larga parte gli effetti di terremoti passati.

Sempre a causa dei lunghi tempi di ritorno, e sebbene la pericolosità sismica (intesa come probabilità di eccedenza di un determinato valore di scuotimento nei prossimi 50 anni) sia relativamente modesta, il rischio sismico in Pianura Padana non può essere trascurato a causa dell'elevata esposizione e vulnerabilità che caratterizzano il territorio. Tutto ciò è diventato incontrovertibile a partire dal 20 maggio 2012. La sequenza sismica, infatti, ha avuto rilevanti ripercussioni sul tessuto sociale, economico e culturale delle province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara. Il "terremoto emiliano" ha posto ancora una volta in evidenza le irrisolte problematiche del territorio italiano in ambito di prevenzione, mitigazione e comunicazione del rischio. Il sisma del 2012 ha interessato 54 comuni coinvolgendo un territorio dove vivono complessivamente circa un milione di persone. Le scosse maggiori (con M_w 6.1 e 5.9) hanno inoltre compromesso un intero polo industriale che produce circa il 2% del PIL nazionale e provocato ingenti danni sia al patrimonio edilizio abitativo che a quello storico-architettonico di numerosi centri emiliani. Gli eventi sismici più importanti hanno anche indotto fenomeni di liquefazione in varie località, situate in corrispondenza di canali abbandonati dei fiumi Secchia, Panaro, Reno e Po, in un'area estesa tra il settore occidentale della provincia di Ferrara e l'attuale corso del fiume Secchia. Nel giugno 2012, il Consorzio regionale Spinner invitò le

Università del territorio a collaborare alla realizzazione di percorsi di dottorato di ricerca su tematiche di interesse per la Regione Emilia-Romagna rientranti nei settori ritenuti strategici da Horizon 2020, il nuovo strumento finanziario dell'Unione Europea per la ricerca e l'innovazione, volto alla trasformazione delle nuove conoscenze scientifiche in prodotti e servizi innovativi, con la finalità ultima di creare nuova crescita e occupazione in Europa. Le tematiche di ricerca originariamente individuate dovevano anche essere coerenti con le vocazioni imprenditoriali del territorio regionale tenendo in considerazione i fabbisogni di competenze qualificate delle imprese e del sistema economico locale.

Considerando la particolare condizione di emergenza causata dal terremoto, nel bando si ritenne utile accogliere e valutare anche domande relative a tecnologie, metodologie e processi per il recupero, la rigenerazione e la riorganizzazione dei territori, dei tessuti produttivi e dell'edilizia pubblica e privata, in chiave di sicurezza e sostenibilità. Ci si rese infatti conto che lo sviluppo e la ricostruzione dei territori emiliani e dei loro tessuti produttivi in seguito allo sciame sismico non poteva prescindere dall'analisi di dettaglio di quanto accaduto e dalla comprensione delle cause che portarono alla perdita di vite e di infrastrutture.

Nell'ambito del Programma "Spinner 2013" è stato quindi approvato il progetto di ricerca "Effetti Geologici Superficiali del Terremoto emiliano 2012: studi finalizzati al miglioramento della sicurezza e sostenibilità dello sviluppo territoriale" (EGEST), proposto da 23 ricercatori e professori appartenenti ai quattro Atenei emiliani, e sono state così cofinanziate 3 borse di studio finalizzate ai dottorandi del Progetto. Al contributo della Regione Emilia-Romagna (50%), si sono aggiunti quelli delle Università di Ferrara, Modena-Reggio Emilia e Parma, nonché del Comune di Sant'Agostino mediante una apposita convenzione di ricerca. I dottorandi sono stati selezionati mediante concorsi pubblici e, ai tre dottorandi con borsa (A.M., C.L.S e F.P.), se ne è aggiunto un quarto senza borsa (G.T.).

Obiettivo del Progetto EGEST era quello di creare figure altamente qualificate che potessero contribuire ad affinare gli attuali criteri di analisi degli effetti geologici superficiali dei terremoti e fossero in grado di operare come esperti di riferimento e coordinamento per studi finalizzati al miglioramento della sicurezza del territorio, attraverso indagini di macro e micro-zonazione sismica, e nella definizione degli interventi di recupero, rigenerazione e riorganizzazione degli insediamenti abitativi e produttivi.

Nel presente articolo sono stati sintetizzati, per ovvia necessità di spazio, i principali risultati delle quattro tesi di dottorato sviluppate nell'ambito del Progetto EGEST. Dalle ricerche svolte sono già state tratte, o sono in corso di stampa, diverse pubblicazioni su riviste nazionali ed internazionali ed i maggiori risultati sono stati presentati a vari congressi.

2. STUDIO DELL'ATTIVITÀ TETTONICA RECENTE IN SETTORI DI PIANURA: UN APPROCCIO MULTIDISCIPLINARE

Da un punto di vista scientifico, la sequenza sismica emiliana ha rappresentato un'importante caso di studio geologico poiché ha generato una serie di rilevanti effetti cosismici secondari come diffuse manifestazioni di liquefazione lungo i corsi di antichi canali fluviali, sollevamenti tettonici nell'intorno delle aree epicentrali ed amplificazioni locali del moto del suolo.

In quest'area, il sottosuolo è prevalentemente costituito da alternanze di sabbie, limi e argille di origine alluvionale del Pleistocene medio-Olocene riferibili a due cicli deposizionali di ordine maggiore, il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES); questa successione poggia generalmente su un substrato costituito da depositi marini e transizionali del Pleistocene inferiore-medio (RER & ENI-AGIP, 1998).

Uno dei principali effetti cosismici dovuti alla riattivazione di faglie inverse sepolte è la deformazione della superficie topografica ed il conseguente sollevamento di un settore più o meno ampio nell'intorno dell'epicentro. Nel contesto della Pianura Padana, il ripetersi nel tempo di simili eventi sismici ha causato effetti cumulativi nella successione stratigrafica e nella morfologia dando luogo a successioni sedimentarie 'condensate' e, temporaneamente, a blandi gradienti topografici che influiscono sull'idrografia. L'interazione tra la tettonica attiva ed il reticolo idrografico ha quindi notevolmente influenzato la distribuzione dei sedimenti sia in superficie che in profondità, generando importanti variazioni stratigrafiche laterali e, di conseguenza, cambiamenti nella proprietà fisiche dei materiali. Queste variazioni sono particolarmente evidenti nella geologia profonda⁽²⁾, ma possono essere riconosciute anche nei depositi più superficiali^(4,5). A riprova di questo, nelle aree di sinclinale lo spessore delle alluvioni medio-tardoquaternarie supera le centinaia di metri, mentre in corrispondenza delle anticlinali in crescita si riduce a meno di cento metri. In simili contesti geologici in cui il substrato sismico è sepolto da una spessa coltre di sedimenti alluvionali scarsamente consolidati, la valutazione della sola pericolosità sismica di base non è quindi sufficiente a definire l'azione sismica.

Per fornire una corretta valutazione della pericolosità sismica e della risposta sismica locale è necessario conoscere le caratteristiche litologiche, geomeccaniche, geotecniche e geofisiche dei depositi non consolidati che giacciono al di sopra del substrato sismico. Al fine di studiare gli effetti dell'evoluzione tettonica recente nel sottosuolo poco profondo (fino a qualche centinaia di metri) del settore centrale dell'Arco Ferrarese, queste problematiche sono state affrontate attraverso l'applicazione di diverse tecniche di indagine⁽⁶⁾.

2.1. SISMICA PASSIVA PER LA REALIZZAZIONE DI SEZIONI GEOFISICHE PSEUDO-2D

Un approccio valido per la caratterizzazione di sito è la determinazione del profilo della velocità delle onde di taglio e della frequenza fondamentale di risonanza. Tuttavia, ottenere misure dirette di V_s su aree estese risulta particolarmente oneroso; tale limitazione può essere superata utilizzando particolari tecniche che sfruttano il rumore sismico ambientale, come la tecnica basata sul rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e verticale del moto del suolo (HVSR o H/V) ⁽⁷⁾ e quelle basate sull'analisi delle proprietà dispersive delle onde superficiali (e.g. Re.Mi, SPAC, ESAC) ⁽⁸⁾. Il metodo dei rapporti spettrali è oggi ampiamente utilizzato negli studi di microzonazione sismica a supporto della pianificazione territoriale e degli studi di risposta sismica locale, per lo studio della geometria dei bacini sedimentari e molto altro ancora. La frequenza corrispondente al massimo della funzione H/V (f_0) è in stretta relazione con la frequenza della copertura sedimentaria ⁽⁹⁾ e quindi con

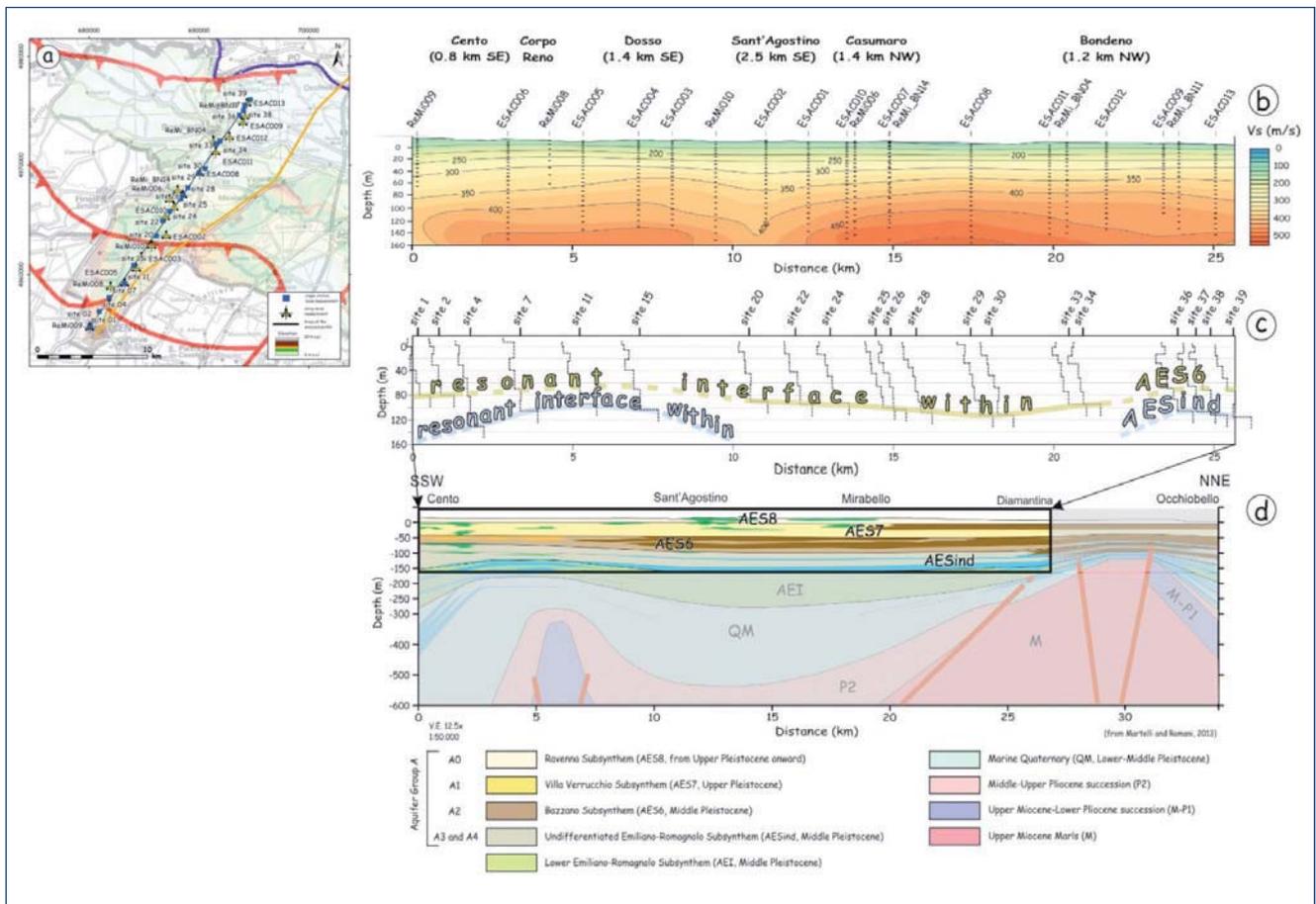
il suo spessore. In contesti di bassa pianura dove il principale contrasto di impedenza è in genere fuori dalla portata delle più comuni indagini geotecniche, l'integrazione di tale informazione con altri dati (e.g. sondaggi e misure di V_s) consente di stimare la profondità dell'interfaccia risonante attraverso apposite procedure di inversione.

Nell'ambito degli studi di microzonazione, queste indagini sono generalmente limitate arealmente. L'idea è stata quindi quella di realizzare tali misure lungo un profilo esteso tra gli abitati di Cento e Bondeno, in direzione SSW-NNE trasversalmente alla direzione dei sovrascorrimenti sepolti (Fig. 1a). Sono state quindi realizzate diverse indagini di sismica passiva in array (ESAC), per ricostruire altrettanti profili di V_s , e misure a stazione singola (H/V) per ottenere la frequenza di risonanza fondamentale per ognuno dei siti investigati (Fig. 1a).

La distribuzione delle V_s (Fig. 1b) e delle frequenze di risonanza fondamentale lungo tale transetto, permette di individuare strutture anticlinali sepolte laddove la successione stratigrafica è 'condensata', e quindi una

Figura 1.

- (a) Ubicazione delle indagini di sismica passiva in array (triangoli gialli) e a stazione singola (quadrati blu).
- (b) Distribuzione della velocità delle onde di taglio a partire dalle indagini di sismica passiva in array.
- (c) Profondità dell'interfaccia risonante ricavata dalle indagini di sismica passiva a stazione singola.
- (d) Confronto dei risultati ottenuti con la sezione geologica ricostruita da Martelli e Romani ⁽⁴⁸⁾ (linea arancione in Fig. 1a).



loro attività tettonica recente. L'interfaccia risonante così ricostruita (Fig. 1c) è in buon accordo con le principali discontinuità stratigrafiche della successione continentale quaternaria (Fig. 1d) che è possibile seguire lungo l'intero profilo investigato (10,11).

2.2. METODI GEODETICI E GEOLOGICO-GEOTECNICI PER LO STUDIO DEGLI EFFETTI DI SITO

A seguito degli eventi del maggio 2012, i dati ottenuti attraverso l'impiego di tecniche di indagine geodetica sia satellitari che terrestri, come il DInSAR e la livellazione di alta precisione, hanno evidenziato la presenza di due ampie aree in sollevamento parzialmente sovrapposte che si estendono in direzione WNW-ESE tra i Comuni di Mirandola e Sant'Agostino, caratterizzate da uno spostamento massimo pari a circa 20 cm (3). Entrambe queste tecniche sono risultate essere in buon accordo, anche se lungo il tracciato delle linee di livellazione che attraversano l'area epicentrale sono state localmente osservate notevoli discrepanze. Ad esempio, lungo la linea G-F-C (Fig. 2a), sia i dati satellitari che terrestri mostrano movimenti verticali che documentano una lieve subsidenza a sud ed un forte sollevamento nel settore centrale. La linea H-D-B (Fig. 2b), invece, mostra importanti discrepanze tra le due tecniche geodetiche nel settore tra Sant'Agostino e Mirabello dove si registrano valori di subsidenza notevoli per diversi caposaldi.

Al fine di investigare le possibili cause, sono state analizzate in dettaglio le condizioni geomorfologiche dell'area, le caratteristiche geologiche del sottosuolo nelle vicinanze di ciascun caposaldo e la distribuzione spaziale delle liquefazioni osservate.

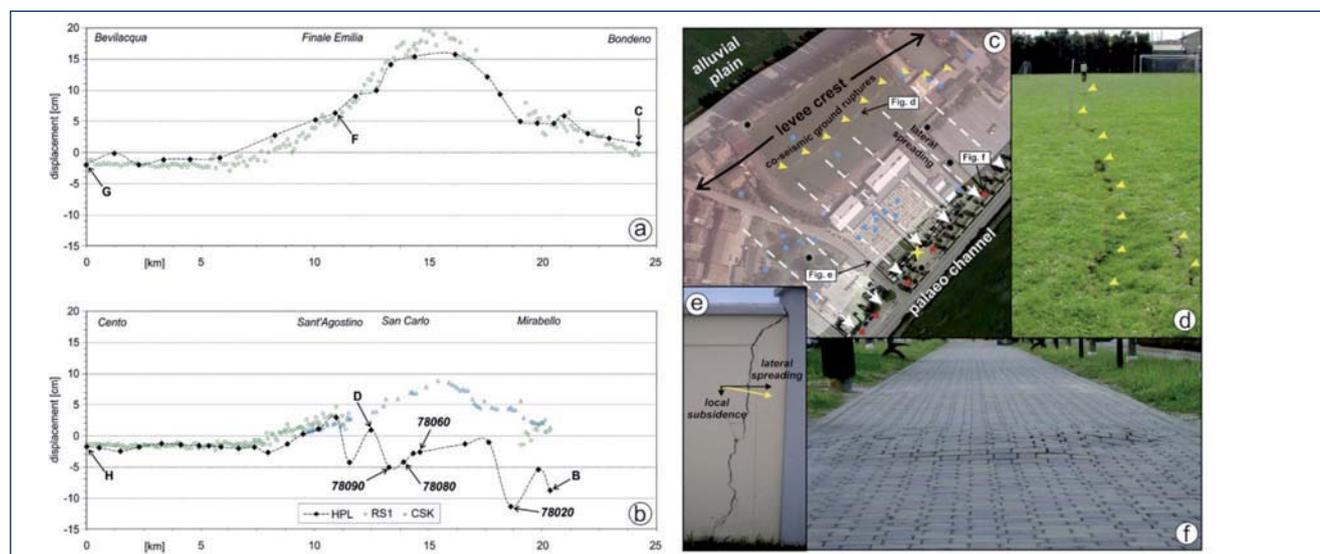
A puro titolo di esempio, si riporta il caso del caposaldo numero 78020, ubicato all'ingresso del cimitero di Mirabello (Fig. 2c), per il quale è stata osservata una subsidenza di 11.4 cm (Fig. 2b). L'area cimiteriale si sviluppa lungo la base del paleo argine sinistro del Reno (Fig. 2c). La stratigrafia superficiale ricostruita a partire da alcuni sondaggi consiste di alternanze di sabbie limose e di limi sabbiosi saturi nei primi 5 m che giacciono al di sopra di uno spesso corpo di sabbie medie. In conseguenza del terremoto del 20 maggio, tali condizioni predisponenti hanno infatti dato luogo a diffusi fenomeni di liquefazione che hanno deformato il suolo in prossimità del caposaldo (Fig. 2f), indotto subsidenza per compattazione e importanti scivolamenti laterali (Fig. 2d-e).

2.3. METODI GEOTECNICI PER LA VALUTAZIONE QUANTITATIVA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Disponendo di dettagliate mappature dei severi fenomeni di liquefazione verificatesi tra gli abitati di Sant'Agostino, San Carlo e Mirabello e di numerosi dati geotecnici forniti da indagini in-situ, è maturata l'idea di quantificare

Figura 2.

(a) e (b) Movimenti verticali misurati lungo due linee di livellazione che attraversano perpendicolarmente l'area epicentrale del 20 maggio 2012. HPL: livellazione di alta precisione (rombi neri); dati satellitari, RSI: RADARSAT-1; CSK: COSMO-SkyMed. (c) Area cimiteriale di Mirabello con la distribuzione degli effetti cosmici secondari osservati, tra i quali emissioni puntuali di sabbia (punti blu), deformazioni del terreno (quadrati rossi), sondaggi (stelle nere), fratturazioni del suolo (freccette gialle) e movimenti gravitazionali dovuti a fenomeni di lateral spreading (freccette bianche). La stella gialla mostra l'ubicazione del caposaldo 78020 che ha subito una subsidenza pari a 11.4 cm. (d) Fratture del suolo osservate lungo la cresta dell'argine abbandonato. (e) Conseguenze dei fenomeni di lateral spreading lungo il muro laterale del cimitero. (f) Esempio di deformazioni del suolo associate a fenomeni di liquefazione poco profonda.



il potenziale di liquefazione mediante due diversi indici, il 'Liquefaction Potential Index' (LPI) ⁽¹²⁾ ed il 'Liquefaction Severity Number' (LSN) ⁽¹³⁾; dal primo si ricava la suscettibilità alla liquefazione di un deposito e, dal secondo, la quantificazione dei possibili effetti di danneggiamento indotti da questo tipo di fenomeno. Entrambi i metodi sono stati applicati in due aree test: Sant'Agostino-San Carlo e Mirandola che, nonostante la medesima distanza epicentrale rispetto alla scossa del 20 maggio (compresa tra 10 e 17 km), hanno mostrato evidenze di liquefazione molto diverse. Un parametro fondamentale per la stima del potenziale di liquefazione è il valore di accelerazione al suolo, che è stato stimato per ciascuna delle verticali indagate attraverso la GMPE proposta da Bindi *et al.* ⁽¹⁴⁾. In totale sono state considerate 60 indagini penetrometriche (23 a Mirandola e 37 tra Sant'Agostino-San Carlo), in corrispondenza di zone sia con evidenza (23) che mancanza (37) di liquefazioni su-

perficiali manifeste. Nelle aree liquefatte, LSN varia tra 7.5 e 25.7 e LPI tra 6.9 e 27.6; viceversa, nelle aree non liquefatte il valore degli indici è generalmente inferiore a 10, a parte qualche eccezione. La distribuzione statistica dei valori ottenuti (Fig. 3a-b) è in buon accordo con i valori soglia più comunemente proposti e utilizzati in letteratura ⁽¹⁵⁾. Un valore aggiunto di questa indagine è certamente rappresentato dal confronto tra i valori di LPI ed LSN che ha permesso di definire quattro classi di terreni caratterizzati da differenti condizioni geologiche-geotecniche di sottosuolo capaci di generare o meno manifestazioni di liquefazione in superficie (Fig. 3c).

2.4. SVILUPPI FUTURI

I metodi geofisici basati sul rumore ambientale consentono di realizzare in breve tempo e a basso costo numerose indagini che, opportunamente elaborate in sezioni pseudo-2D, possono enfatizzare gli effetti della tettonica recente sui depositi più superficiali in contesti geologici e geodinamici di pianura. I risultati ottenuti mostrano chiaramente quanto fondamentale sia l'informazione al di sotto dei 30 m previsti dalla normativa al fine di una migliore pianificazione territoriale ed una più realistica valutazione della risposta di sito.

Attraverso l'attenta analisi della distribuzione areale dei fenomeni di liquefazione in superficie, lo studio della geomorfologia dell'area soggetta a questo tipo di manifestazioni e delle informazioni fornite dalle indagini geognostiche è stato possibile documentare come la topografia possa essere fortemente influenzata dalle condizioni geologiche locali invertendo finanche il segnale tettonico misurato su larga scala.

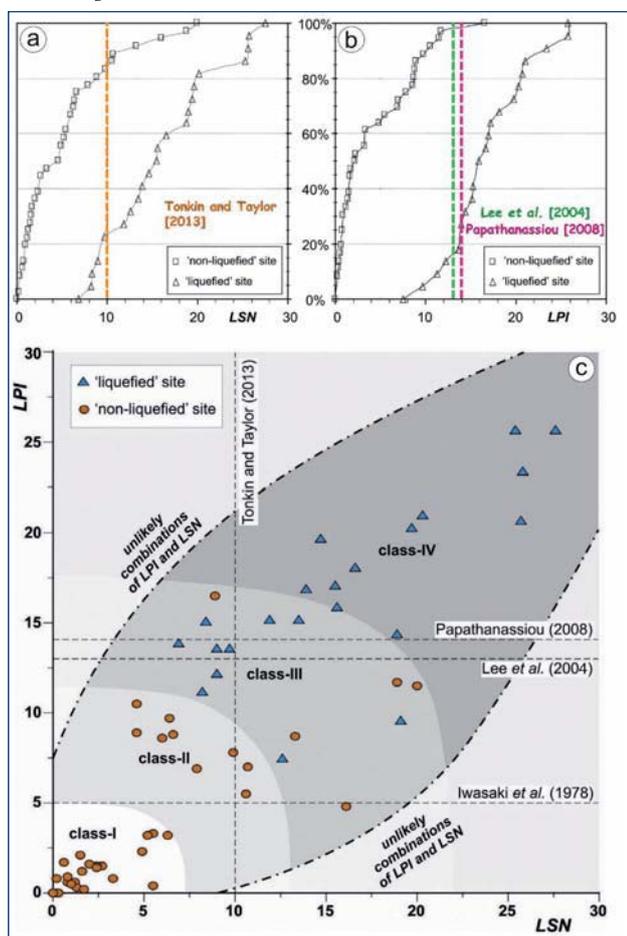
Le procedure di analisi che sfruttano i dati forniti dalle indagini geotecniche consentono di caratterizzare i primi metri del sottosuolo che giocano un ruolo fondamentale nel controllare il manifestarsi di effetti cosmici particolarmente rilevanti come la liquefazione. Una valutazione combinata di LPI e LSN può contribuire ad una migliore caratterizzazione del rischio di liquefazione in aree urbane.

In sintesi, questa tesi mostra come un simile approccio multidisciplinare può essere applicato con successo in bacini alluvionali tettonicamente attivi e caratterizzati dalla presenza nel sottosuolo di strutture anticlinali in crescita.

3. STUDIO INTEGRATO GEOMORFOLOGICO-GEOFISICO DELL'AREA EPICENTRALE

Un secondo aspetto importante affrontato nell'ambito del Progetto EGEST è il rapporto tra le strutture sismogeniche 'profonde' e gli effetti superficiali percepiti dagli osservatori ⁽¹⁶⁾. Al fine di comprendere tale rapporto è stato

Figura 3. Distribuzione statistica dei valori di LSN (a) e LPI (b) calcolati nelle due aree test e principali soglie (linee tratteggiate) comunemente utilizzate in letteratura per la liquefazione. (c) Correlazione tra i valori di LPI ed LSN. Le quattro tonalità di grigio rappresentano altrettante classi di terreni con diverse probabilità di generare fenomeni di liquefazione in superficie (I: quasi nessuna, II: poche, III: probabili; VI: molto probabili).



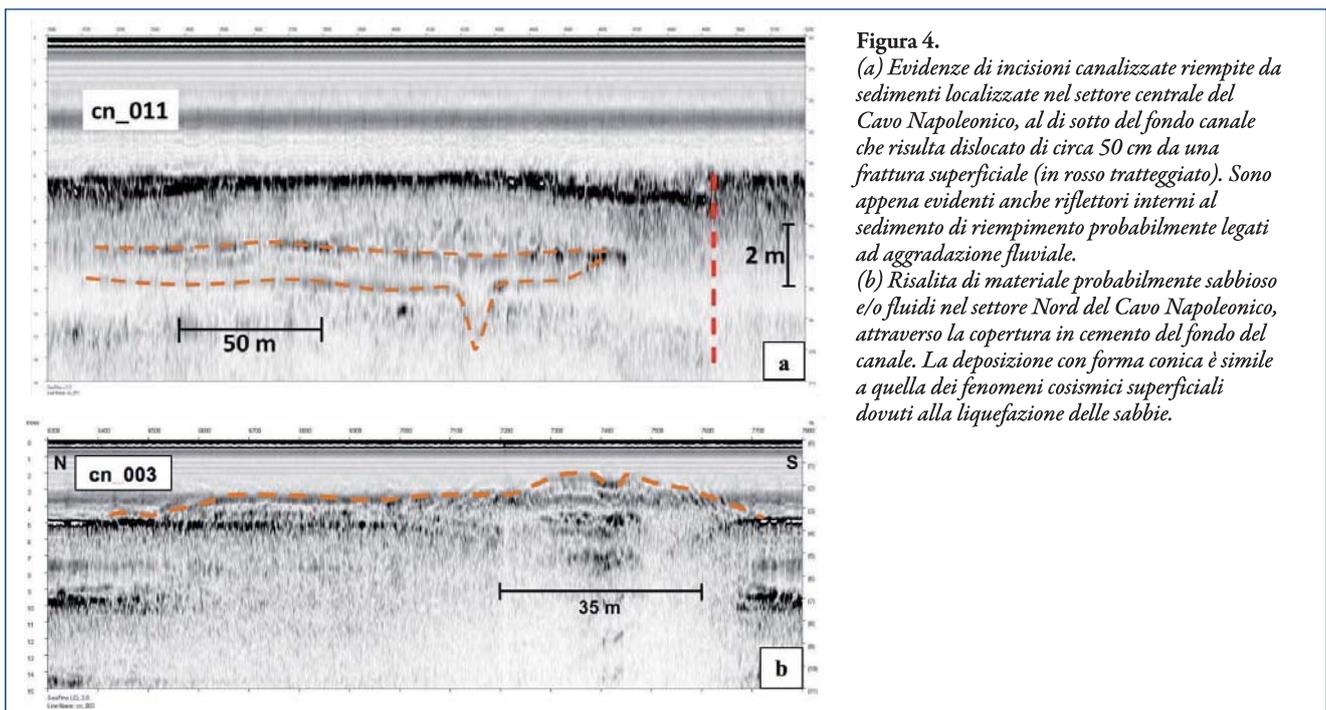
necessario raccogliere dati a scale spaziali molto diverse ed analizzarli con approcci multidisciplinari che comprendono la geomorfologia (e.g. carte storiche, geomorfologiche e dati di elevazione del terreno), la geofisica (e.g. profili sismici a riflessione), la stratigrafia (dati della Regione Emilia-Romagna e del Servizio Geologico d'Italia), la sismologia (i parametri descrittivi del sisma come magnitudo, epi-/ipocentri, sequenze di sismi pre-/post-evento, scuotimenti, ecc.) e l'analisi dei fenomeni cosismici superficiali (report pubblicati e studi di microzonazione sismica redatti dalla Regione Emilia-Romagna, con indicazione delle aree suscettibili di liquefazione; i dati e le immagini satellitari pubblicati dall'IREA-CNR e le foto aeree dei fenomeni cosismici superficiali rese disponibili dalla società CGR di Parma).

In aggiunta ai dati pregressi e per meglio integrarli, sono stati acquisiti nuovi dati sismici a riflessione ad altissima risoluzione lungo il corso del Cavo Napoleonico e del Fiume Po, sfruttando e adattando le metodologie comunemente usate per acquisizioni geofisiche in mare. La stratigrafia al di sotto del canale artificiale è stata investigata tramite due tipi di *Sub-Bottom Profiler Chirp Sonar*, uno disponibile in commercio e uno basato su tecnologia *open-source* ancorato ad un veicolo autonomo denominato *SWAP (Shallow Water Prospector)*, ideato per le prospezioni geofisiche in zone con acque basse o bassissime e/o difficilmente accessibili, sviluppato in collaborazione con il Consorzio Proambiente dei Tecnopoli dell'Emilia-Romagna⁽¹⁷⁾. Il *Side Scan Sonar* ha registrato immagini ad alta risoluzione del fondo canale per investigare possibili fenomeni cosismici nascosti dall'acqua. Tramite ecoscandaglio è stato inoltre

effettuato un rilevamento preciso del fondale. Questi nuovi dati sono stati acquisiti in via sperimentale per mettere a punto una metodologia di indagine in via d'acqua che permettesse l'investigazione della parte superficiale della successione sedimentaria nelle aree continentali in maniera rapida, economica e con una risoluzione maggiore di quanto la geofisica convenzionale a terra possa normalmente permettere. Difatti, l'utilizzo dell'acqua come mezzo di trasmissione degli impulsi assicura una riduzione dei disturbi nella registrazione del dato e una più rapida esecuzione del rilievo che avviene in simultanea allo spostamento dell'imbarcazione. Il Cavo Napoleonico è stato scelto come area test per l'acquisizione dati, sia per la strumentazione che richiede una via d'acqua per il suo utilizzo, sia poiché esso taglia ortogonalmente la zona epicentrale del 20 maggio, fornendo così una visione ottimale delle strutture profonde.

3.1. DISCUSSIONE E RISULTATI

L'analisi dei profili sismici superficiali ha evidenziato contrasti di impedenza che mostrano riflettori inclinati a basso angolo, estesi lateralmente per alcune decine di metri unitamente a superfici concave verso l'alto con incisioni a "V", poste circa 2-3 m al di sotto del fondale, estese circa 200 m e riempite da sedimenti. Tali superfici concave sono state interpretate come paleovalci sepolti⁽¹⁸⁾ (Fig. 4a). Le immagini del fondo canale ottenute tramite *Side Scan Sonar* hanno evidenziato rigonfiamenti e depressioni in corrispondenza dell'intersezione del Cavo



Napoleonico con i paleoalvei, comparabili con gli effetti cosismici di superficie segnalati lungo il vicino paleoalveo del Reno. Si ipotizza che tali elementi siano legati anch'essi a risalite di sabbia e/o fluidi (19). Nel settore settentrionale del Cavo il rilievo tramite *sub-bottom profiler* ha mostrato un esteso accumulo di sedimenti, spesso circa 0,5 m, dalla forma conica con il picco in corrispondenza di quello che sembra un percorso di risalita di sabbia e/o fluidi dalla successione sottostante. Nel corso dei rilievi successivi un'immagine più chiara ha mostrato delle fratture che interessano le lastre di cemento sul fondo del Cavo attraverso cui sarebbero risaliti i fluidi (Fig. 4b).

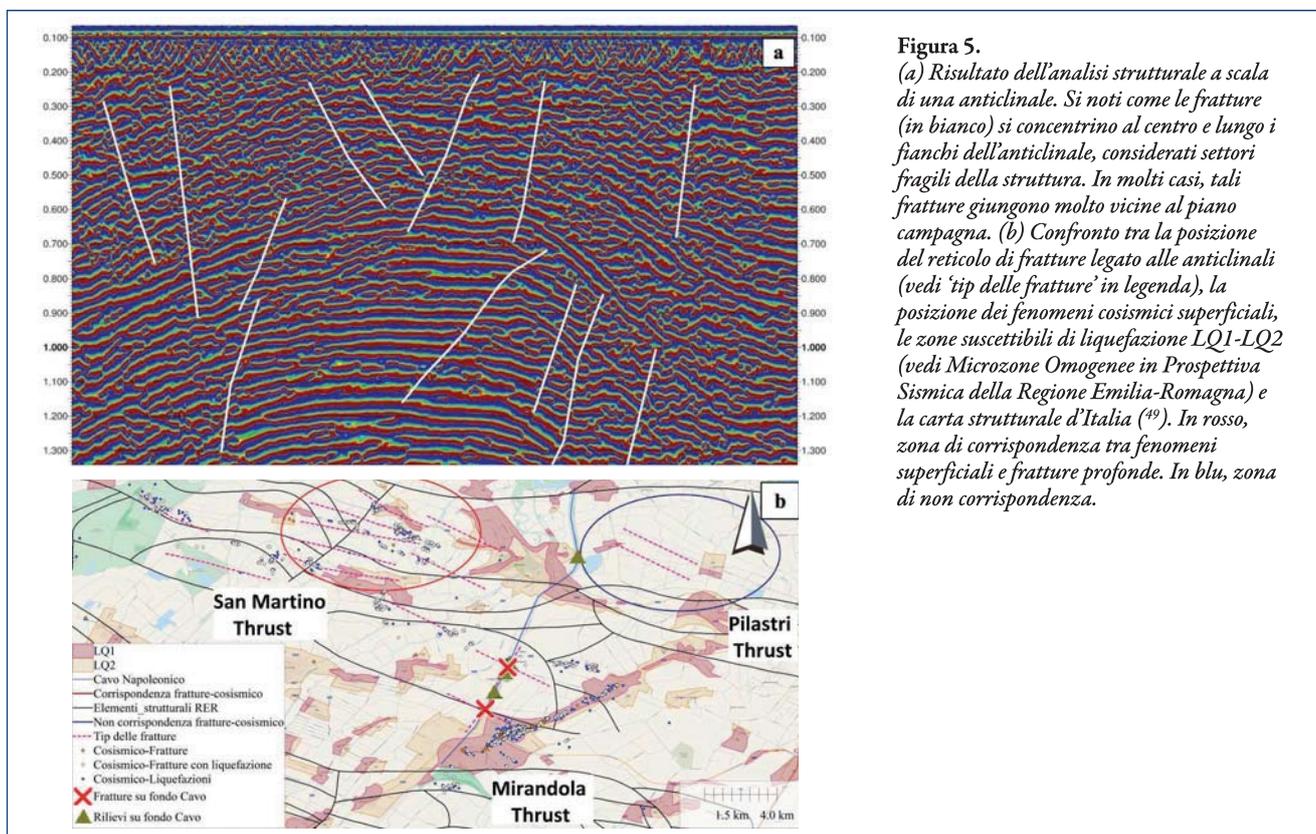
L'analisi delle carte storiche e geomorfologiche si è focalizzata sull'analisi delle diversioni del reticolo idrografico, in quanto fenomeno influenzato dall'attività tettonica profonda che deforma la superficie topografica (20,21). L'abbandono dei vecchi tracciati fluviali, la sedimentazione all'interno di alvei fissi nel tempo o la tracimazione di depositi fini durante le piene portano all'impostarsi di paleoalvei, dossi fluviali e conoidi di rotta, considerati come i depositi maggiormente suscettibili di liquefazione o di effetti locali durante un sisma. Per questo motivo risultano di particolare interesse per il presente studio.

Sono state redatte nuove carte della divagazione fluviale, dettagliate per l'area in esame, sulla base dell'integrazione di lavori precedenti (21,22,23). Queste mappe sono state confrontate con la posizione dei fenomeni cosismici

superficiali (liquefazioni e fratture) del 2012, evidenziando zone di corrispondenza tra i fenomeni cosismici e il reticolo idrografico fossile. Orientazione e dimensione dei fenomeni cosismici sono state inoltre verificate grazie a foto aeree acquisite subito dopo il sisma dalla società CGR di Parma e, dalla stessa, rese disponibili. La posizione dei dossi fluviali è stata invece analizzata con l'ausilio di un rilievo altimetrico LiDAR ad alta risoluzione (1 m) fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (<http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>).

La caratterizzazione stratigrafica della zona all'intorno del Cavo Napoleonico ha permesso la compilazione di un pannello delle correlazioni stratigrafiche compreso tra gli abitati di Casumaro (FE) e Mirabello (FE), fino a profondità di circa 100 m. Le correlazioni delineate nel pannello ricalcano quanto descritto nel modello geologico redatto dalla Regione Emilia-Romagna (24) nel vicino paleoReno, con 3 unità principali legate all'evoluzione degli ambienti sedimentari, di cui la più recente derivante dall'evoluzione del reticolo idrografico olocenico (Unità dei Canali Fluviali). All'interno di quest'ultima è stato possibile collocare le evidenze riscontrate tramite sismica superficiale al di sotto del Cavo Napoleonico.

Il sottosuolo profondo dell'area epicentrale è stato investigato tramite l'analisi di profili sismici a riflessione eseguiti a terra e nell'alveo del Fiume Po (ENI SpA). Il dataset, finora inedito, acquisito lungo il Fiume Po è stato



fondamentale per colmare la lacuna nei profili sismici a terra che mancavano della parte superficiale della successione e per operare su un dato sismico a risoluzione più elevata. Dopo un accurato lavoro di georeferenziazione ed elaborazione dei dati è stata condotta l'interpretazione strutturale e sismostratigrafica dei principali sistemi di sovrascorrimenti e discordanze stratigrafiche. I profili, sia registrati a terra che lungo il Fiume Po, mostrano una rete di fratture ad alto angolo con origine al nucleo delle anticlinali legate ai sovrascorrimenti (Fig. 5a) che si diramano attraverso la cresta e i fianchi delle pieghe raggiungendo le porzioni più superficiali del sottosuolo investigato, prossime al piano campagna. Il confronto tra la posizione delle terminazioni in superficie di tali fratture e la posizione dei paleoalvei sepolti e dei fenomeni cosismici superficiali ha evidenziato zone di netta corrispondenza tra gli elementi citati (Fig. 5b), suggerendo un controllo di tipo tettonico, oltre che litologico, sul verificarsi di tali eventi a seguito del sisma del 2012. In ultimo, avendo definito le principali discordanze stratigrafiche e disponendo di un profilo sismico che interseca la struttura profonda (denominata anticlinale di San Martino) mossasi a seguito del sisma del 20 maggio, è stato calcolato lo spessore originale dei sedimenti depositi negli ultimi 800.000 anni secondo la procedura di *backstripping* (²⁵). Dopodiché, sono stati ricavati i tassi di sollevamento e sedimentazione relativi all'anticlinale per lo stesso intervallo temporale, evidenziando come la tettonica e la sedimentazione siano tuttora attive, seppur con la tendenza ad una diminuzione.

3.2. VANTAGGI NELL'INTEGRAZIONE DI APPROCCI DIVERSI

L'obiettivo principale è stato dimostrare come l'integrazione di dati a varia scala, dalla superficie a profondità di qualche km, possa fornire vincoli importanti per la caratterizzazione geomorfologica, geologica e geofisica delle porzioni più superficiali (< 20 m) del terreno in aree a rischio sismico, dove si manifestano fenomeni cosismici primari e secondari che possono risultare particolarmente distruttivi anche nel caso di magnitudo moderate. Il confronto fra dati geomorfologici superficiali e dati geofisici profondi ha permesso di migliorare la nostra immagine del sottosuolo nelle vicinanze dell'epicentro di un terremoto che ha causato gravi danni, fornendo informazioni supplementari nella definizione delle forme di superficie, così come della successione sedimentaria. I risultati ottenuti nel corso di questo lavoro possono essere utili in due modi. Il primo, e più ovvio, è stato contribuire a fornire informazioni utili alla caratterizzazione della pericolosità sismica in aree dove le strutture sismogeniche risultano sepolte e i tassi di deformazione sono limitati. L'altro aspetto che questo lavoro ha messo in evidenza con forza, è l'importanza di integrare in-

formazioni di tipo diverso, geomorfologiche, geologiche e geofisiche, e realizzare indagini di dettaglio con maglie osservative molto fitte, data l'estrema eterogeneità del sottosuolo. Un approccio "integrato" tra varie discipline, e "multiscala", è probabilmente l'unico modo di combinare dati così diversi tra loro, e contribuire ad arricchire il patrimonio di conoscenze che possano servire a formulare stime più attendibili di pericolosità e suggerire pratiche più efficaci di prevenzione. Nel caso dell'area di studio, molte delle informazioni necessarie sono già disponibili, e si potrebbe migliorare la sinergia tra enti pubblici e privati per una migliore e più efficiente organizzazione delle indagini conoscitive sul territorio, pianificando ove necessario le eventuali integrazioni. In questo senso, lo sviluppo di metodi innovativi di indagine, a basso costo e di facile diffusione presso gli enti preposti alla gestione e al monitoraggio del territorio, potrebbe rappresentare un valido contributo sotto la supervisione di un geologo qualificato.

4. L'USO DELLE MISURE DI MICROTREMORE PER INVESTIGARE LE STRUTTURE TETTONICHE SEPOLTE

L'attività tettonica recente in un settore di pianura può essere documentata mediante esplorazioni sismiche, come quelle utilizzate per la ricerca di idrocarburi, o indagini morfologiche; entrambi i metodi di indagine hanno però forti limiti. Le prime, infatti, sono molto costose, non sempre disponibili e, soprattutto, sono spesso prive di informazioni sugli strati più superficiali perché calibrate per *target* più profondi. Le seconde, invece, hanno generalmente un largo margine di incertezza per le entità estremamente ridotte delle anomalie topografiche, in quanto rappresentative soltanto degli ultimi terremoti morfogenici (²⁶). In alternativa ai due suddetti approcci, ma anche in modo complementare ad essi, ci si è concentrati sul sottosuolo superficiale (ca. 100-200 m) che rappresenta un *target* di indagine cruciale per riconoscere l'attività recente di faglie sepolte (²⁷). Per fare ciò è stata utilizzata una tecnica di indagine a basso costo, come le misure di rumore sismico a stazione singola, oggi largamente usata dai geologi nella pratica professionale, applicandola al settore di Pianura Padana in corrispondenza dell'anticlinale di Mirandola (²⁸). Per le finalità del lavoro, quindi, sono state effettuate circa 150 misure tra il 2011 ed il 2015, caratterizzate da una distanza variabile tra 100 m e 1 km (Fig. 6), al fine di meglio evidenziare la geometria dell'anticlinale di Mirandola che rappresenta il caso di studio strutturale e stratigrafico del presente lavoro. Le misure sono state eseguite con un tromografo digitale (Tromino®) che registra il rumore di fondo allo scopo di ricavare le frequenze di risonanza dei terreni, avendo cura che fossero rispettate le condizioni proposte nelle linee guida SESAME per ottenere misurazioni

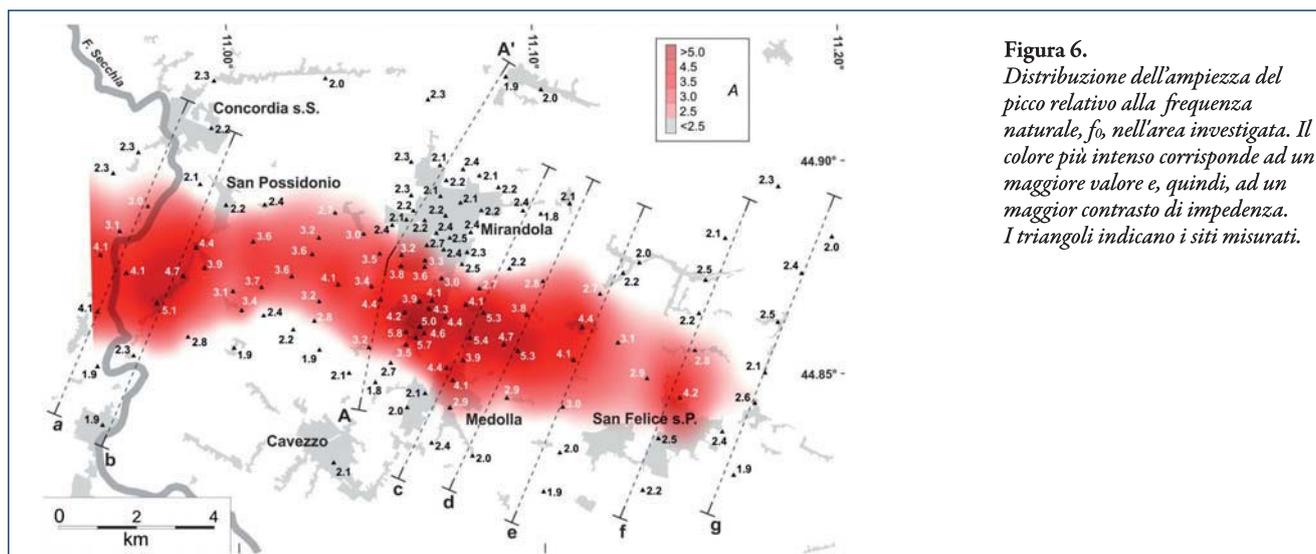


Figura 6.
Distribuzione dell'ampiezza del picco relativo alla frequenza naturale, f_0 , nell'area investigata. Il colore più intenso corrisponde ad un maggiore valore e, quindi, ad un maggior contrasto di impedenza. I triangoli indicano i siti misurati.

e risultati attendibili (⁵¹). Il lavoro sul campo è stato realizzato con tre differenti strumenti e diverse prove sono state eseguite ripetendo le misurazioni su uno stesso sito in momenti distinti per la verifica della ripetibilità dei risultati. Tutte le misure sono state elaborate utilizzando i medesimi criteri.

4.1. PRINCIPALI RISULTATI

Nei bacini di avanfossa fortemente subsidenti, come la Pianura Padana a partire dal Pleistocene medio, in corrispondenza delle culminazioni strutturali delle anticlinali per propagazione di faglia (*fault-propagation folds*), lo spessore dei depositi quaternari continentali è generalmente ridotto. Inoltre, questi depositi sono frequentemente costituiti da successioni sedimentarie condensate o addirittura con lacune stratigrafiche e, in questa regione, si sovrappongono direttamente alle unità marine plioceniche (²). Di conseguenza, si verifica un contrasto di impedenza elevato a causa del brusco aumento, sia della velocità delle onde sismiche, sia della densità del materiale. Tali condizioni meccaniche sono particolarmente adatte ad essere rilevate attraverso le analisi HVSR. In particolare, quando la variazione litologica è brusca e stratigraficamente ridotta a pochi metri, o anche meno, la curva HVSR presenta un elevato e marcato picco di amplificazione. Come comunemente accettato in letteratura, la frequenza del picco di amplificazione è in prima approssimazione proporzionale alla velocità delle onde di taglio del sovrastante corpo sedimentario e all'inverso della profondità della discontinuità secondo la formula (la cosiddetta equazione di risonanza)

$$f_0 = \frac{v_s}{4 \cdot h} \quad [1]$$

In alcuni settori delle anticlinali sepolte, uno strato relativamente sottile di depositi marini del Pliocene superiore-Pleistocene inferiore (anche solo 20-30 m) potrebbe essere interposto tra la sovrastante successione sedimentaria continentale 'condensata' e le unità litologiche sottostanti. In questo contesto geologico, il contrasto di impedenza è in qualche modo distribuito o, eventualmente, suddiviso tra più di una superficie. In questo caso, l'analisi HVSR mostra due (o più) picchi ravvicinati o uno relativamente largo (²⁹). In linea di principio, più alto è il picco, maggiore è il contrasto di impedenza tra i due strati, mentre più è stretto il picco (cioè caratterizzato da una piccola gamma di frequenze), più è netta la variazione litologica nella colonna stratigrafica.

Per ogni sito sono state considerate l'ampiezza del valore di picco della curva HVSR, A , e la frequenza corrispondente, f_0 (comunemente indicata come frequenza naturale). La distribuzione di entrambi i parametri è stata oggetto di una ulteriore elaborazione che ha portato alla realizzazione di una mappa su cui è rappresentata una griglia con colori sfumati, utilizzando il metodo di interpolazione *kriging*. I risultati della campagna geofisica e la loro interpolazione documentano chiaramente la presenza di zone caratterizzate da fenomeni di risonanza, localmente molto importanti, e permettono di mapparne la distribuzione. In particolare, la Figura 6 evidenzia la presenza di una fascia ristretta (2.5-3.5 km di larghezza), con andamento ESE-ONO, caratterizzata da valori di A maggiori di 2.5 e fino a 5.8, lungo la quale si verificano, nel settore più centrale, massimi locali in senso est-ovest. Un andamento simile può essere osservato anche interpolando il valore f_0 con la stessa procedura descritta sopra. In questo caso, il valore discriminante selezionato è 1 Hz.

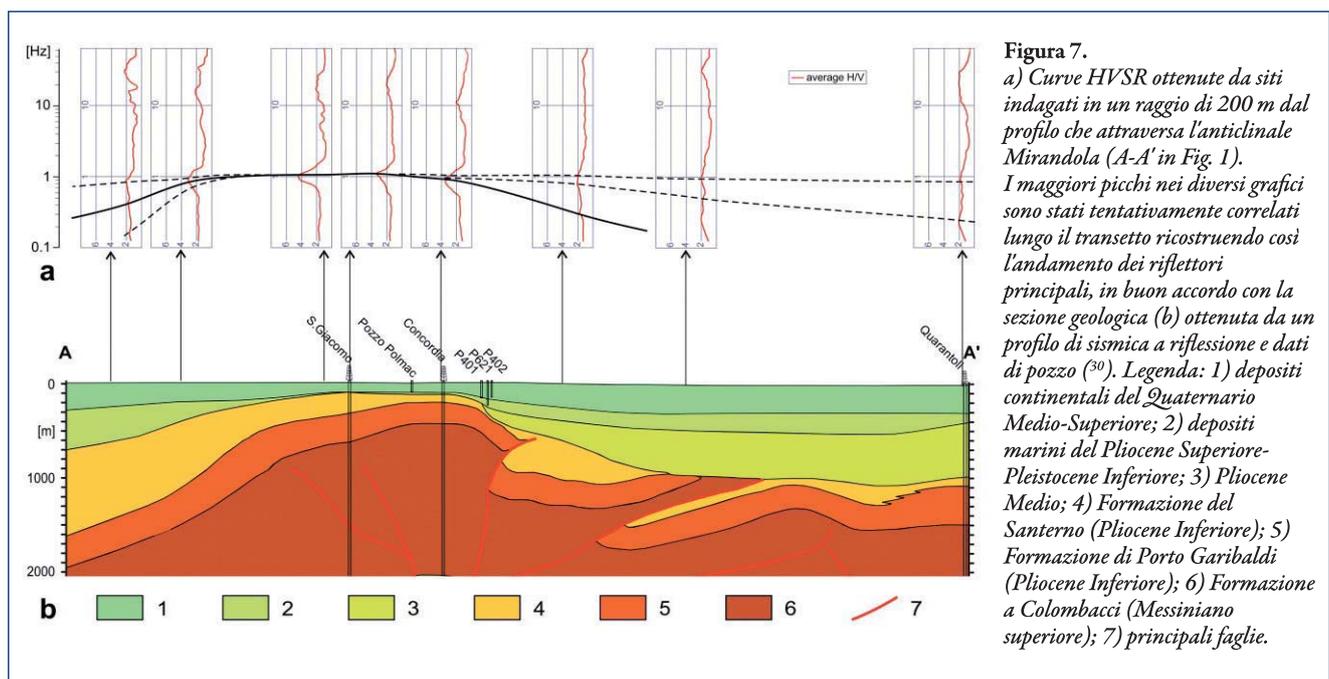
La rappresentazione in mappa (Fig. 6) evidenzia la presenza di un'area allungata ESE-ONO, caratterizzata da un notevole contrasto di impedenza associato alla variazione nella suc-

cessione stratigrafica sviluppata durante il Pliocene-Quaternario in corrispondenza dell'anticlinale Mirandola. Assumendo, in prima approssimazione, che la velocità delle onde sismiche nelle unità sedimentarie superficiali (nei primi 100-150 m) sia lateralmente uniforme (o uniformemente variabile in profondità), la distribuzione delle frequenze naturali che è stata mappata è certamente dovuta ad una marcata variabilità (gradienti verso nord e verso sud e una progressiva diminuzione in direzione ESE) della profondità della superficie che dà origine alla risonanza (ossia caratterizzata da un significativo contrasto di impedenza). Una sezione geologica trasversale basata su profili di sismica a riflessione⁽³⁰⁾ e realizzata per indagare possibili serbatoi geotermici nella zona di Mirandola è rappresentata come riferimento in Figura 7.

Sulla parte superiore del profilo sono anche riportate le curve HVSR ottenute da siti di misura posti ad una distanza massima di circa 200 m dalla traccia della sezione geologica (A-A' in Figura 6). Sono stati quindi lateralmente correlati i picchi maggiori e alcuni secondari al fine di ottenere una sezione pseudo-2D che rappresenta le principali superfici caratterizzate da un apprezzabile contrasto di impedenza. Come si può chiaramente osservare, c'è una buona concordanza tra la ricostruzione della geometria del sottosuolo dei corpi sedimentari pliocenici e quaternari e la posizione (cioè frequenza) e la forma dei picchi nelle diverse curve HVSR (Fig. 7a). In particolare, in corrispondenza della parte superiore dell'anticlinale di Mirandola, le curve HVSR mostrano un picco marcato, localmente alto fino al valore di 5.8, progressivamente decrescente in ampiezza sia verso nord che verso sud, ossia spostandosi

verso le due sinclinali contigue. Da un punto di vista meccanico, e quindi sismologico, queste variazioni di HVSR (Fig. 7a) potrebbero essere dovute ad un contrasto di impedenza variabile lateralmente e correlato ad un aumento di rigidità del corpo sedimentario al di sotto della interfaccia più superficiale in corrispondenza dell'anticlinale. Questo potrebbe essere una conseguenza i) della compattezza differenziale, ii) del contatto diretto con i livelli più antichi (cioè più compatti e più densi) a seguito della parziale erosione della parte superiore della successione sottostante e/o iii) di una sovrastante serie sedimentaria condensata. Seguendo lo stesso approccio, abbiamo anche cercato di correlare altri picchi secondari (Fig. 7a), che sottolineano la geometria a becco di flauto (*pinch-out*) dei corpi sedimentari che si depositano all'interno delle sinclinali sia a nord che a sud dell'anticlinale di Mirandola. È importante notare che in questo studio il quadro complessivo dell'anticlinale sepolta di Mirandola è stato ottenuto solo sulla base del gran numero di misurazioni a stazione singola che hanno permesso di correlare lateralmente la frequenza di picco e l'ampiezza delle curve HVSR e di attribuire un significato stratigrafico alle interfacce corrispondenti ai picchi osservati (Fig. 7).

Al fine di meglio definire e validare il modello di sottosuolo qui proposto, sono state effettuate misure HVSR anche in corrispondenza di due carotaggi realizzati dalla Regione Emilia-Romagna fino a una profondità di 101 e 127 m, rispettivamente⁽³¹⁾. In questi due siti è stata ricostruita la successione stratigrafica di dettaglio raggiungendo il Pliocene superiore, l'interfaccia sismica definita localmente come *pseudo-bedrock* (cioè $V_S \geq 600$ m/s), a



circa 95 e 116 m, rispettivamente. Inoltre, in entrambi i siti è stato realizzato un secondo pozzo per poter svolgere un'indagine *cross-hole* allo scopo di misurare la distribuzione di velocità delle onde di taglio in profondità. Basandosi su un approccio di inversione semplificata ⁽³²⁾, è stato possibile riprodurre le curve HVSr misurate e, in particolare, i più evidenti e significativi picchi in corrispondenza dell'interfaccia che separa i depositi continentali del Quaternario Medio da quelli marini del Quaternario Inferiore e del Pliocene Superiore.

Inoltre, sulla base dell'inversione delle curve H/V là dove sono disponibili dati geotecnici o geofisici indipendenti ⁽³²⁾, è stato anche possibile stimare, per siti selezionati, la velocità delle onde di taglio nei primi 30 m (V_{S30}) e fino al *bedrock* (V_{SH} , dove H rappresenta una profondità compresa tra 75 e circa 150 m in corrispondenza della anticlinale). Entrambi i parametri sismici sono particolarmente importanti per la valutazione del fattore di amplificazione stratigrafica seguendo le cosiddette procedure semplificate (abachi) di uso comune, per esempio, negli studi di microzonazione sismica italiani ⁽³³⁾.

Seguendo l'equazione di risonanza [1], una buona stima della velocità delle onde di taglio dei depositi sovrastanti la discontinuità litologica potrebbe consentire di definire la profondità. I valori stimati della V_{S30} e soprattutto della V_{SH} variano da 190 a 220 m/s e da 290 a 320 m/s, rispettivamente, nei due siti misurati di Medolla e Mirandola. Di conseguenza, è possibile dedurre che la profondità della discontinuità evidenziata dal valore della frequenza naturale, è compresa fra 75-90 m, sulla cresta della anticlinale di Mirandola (per esempio vicino San Giacomo Roncole; Figg. 6 e 7), e più di 150 m sia a nord che a sud lungo i due fianchi della piega e verso la periclinale orientale.

Secondo i profili calibrati della velocità media e seguendo lo stesso approccio descritto in precedenza e utilizzato per correlare lateralmente le misure 1D HVSr (Fig. 7), sono stati elaborati diversi transetti orientati NNE-SSW. Tali correlazioni rendono possibile osservare un andamento sostanzialmente uniforme, marcato da alcune superfici principali (cioè caratterizzate da un evidente contrasto di impedenza) convergenti da nord e sud verso la culminazione della anticlinale.

4.2. UTILIZZO DEI RISULTATI

L'amplificazione sismica è influenzata dalla rigidità del suolo e soprattutto dal contrasto di impedenza tra unità sismiche superficiali. Di conseguenza, le mappe di frequenza naturale sono della massima importanza perché permettono di riconoscere le aree caratterizzate da un elevato contrasto di impedenza in cui si prevede una maggiore amplificazione del moto del suolo in caso di scuotimento sismico. Se la frequenza di amplificazione di

un terreno di fondazione è prossima a quella propria dell'edificio, può verificarsi un effetto detto di doppia risonanza, per cui il rischio per la costruzione di subire danni strutturali aumenta notevolmente ⁽³⁴⁾. A questo proposito, le mappe di frequenza naturale e di amplificazione possono risultare importanti nella pianificazione urbanistica per definire le altezze degli edifici (ad esempio il numero di piani), consentendo così agli ingegneri di migliorare il comportamento antisismico di nuove costruzioni. L'amplificazione sismica infatti è considerata la prima causa di danni e di collasso durante un terremoto. Con la presente ricerca è stata studiata e ricostruita la distribuzione dell'amplificazione naturale dovuta alla presenza di un contrasto di impedenza nel sottosuolo, sia in termini di frequenza che di ampiezza del rapporto H/V (Fig. 6). Ci si è concentrati sulla zona di Mirandola e dintorni per diversi motivi: in primo luogo, perché si tratta di un distretto industriale e, quindi, di particolare interesse economico e sociale per l'Italia; inoltre uno studio di microzonazione sismica di secondo livello era già stato commissionato dal Comune di Mirandola ed eseguito prima del terremoto dell'Emilia del 2012 ⁽³⁵⁾. In secondo luogo, il sottosuolo della zona è caratterizzato da un'anticlinale per propagazione di faglia, in cui sia la faglia inversa che la piega associata risultano completamente sepolte dai depositi continentali del Pleistocene Medio-Superiore e olocenici ⁽³⁶⁾. I movimenti verticali differenziali indotti dalla struttura tettonica cieca e in particolare quelli positivi (cioè sollevamento in corrispondenza della cresta della piega) non sono infatti in grado di tenere il passo della subsidenza a scala regionale e degli elevati tassi di sedimentazione della Pianura Padana. Pertanto, si è voluta testare l'applicazione sistematica di una tecnica geofisica a basso costo, al fine di raccogliere informazioni utili sulla stratigrafia locale, relativamente poco profonda, nonché sulle sue caratteristiche sismiche. A questo proposito, i risultati ottenuti documentano chiaramente e indipendentemente la presenza di una superficie piegata nel primo sottosuolo dell'area di Mirandola; la cresta è orientata ESE-WNW con il culmine verso ovest e un andamento periclinale verso est in perfetto accordo con la struttura tettonica ricostruita sulla base di profili sismici a riflessione ben più costosi. Pertanto, i risultati di questo approccio metodologico sono molto incoraggianti e potrebbero essere facilmente applicati ad altre regioni morfologicamente simili interessate da pieghe e faglie cieche. La Figura 8 mostra infine con chiarezza come le evidenze risultanti dalla presente ricerca relative alla localizzazione, orientazione e andamento dell'anticlinale, ben si accordino con quanto osservato in occasione della scossa del 29 maggio 2012. È possibile quindi concludere che gli effetti sui depositi superficiali osservati nella zona di Mirandola attraverso le misure di microtremore siano stati originati dalla stessa sorgente che ha prodotto il terremoto del 29 maggio.

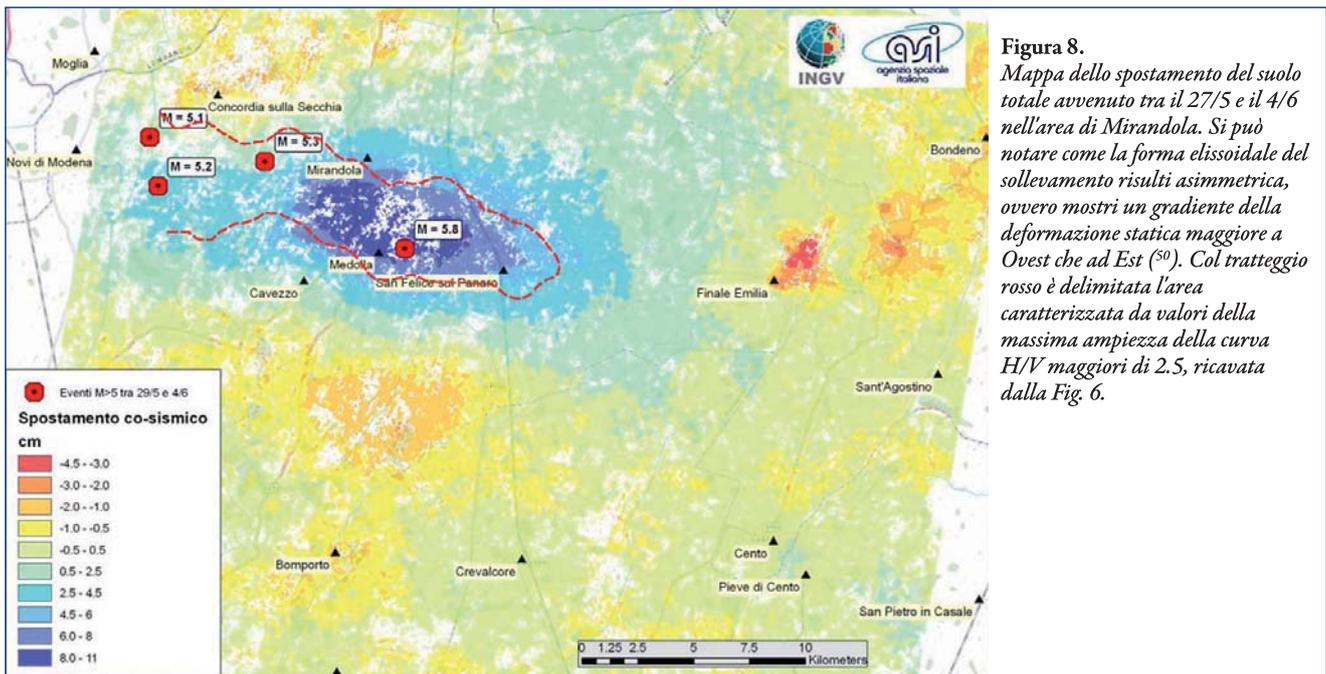


Figura 8. *Mappa dello spostamento del suolo totale avvenuto tra il 27/5 e il 4/6 nell'area di Mirandola. Si può notare come la forma ellissoidale del sollevamento risulti asimmetrica, ovvero mostri un gradiente della deformazione statica maggiore a Ovest che ad Est⁽³⁰⁾. Col tratteggio rosso è delimitata l'area caratterizzata da valori della massima ampiezza della curva H/V maggiori di 2.5, ricavata dalla Fig. 6.*

5. LE SCIENZE DELLE TERRA: IL SAPERE SCIENTIFICO PER UNA CULTURA SISMICA DIFFUSA

Il sisma emiliano ha sgretolato 'certezze' e riferimenti sociali che, nell'architettura religiosa e monumentale ritrova precisi iconemi, in quanto riferimenti identitari comuni di una ricchezza collettiva⁽³⁷⁾. Se da un lato la storia economica, sociale e politica ha radicato in queste terre una tradizione di associazionismo e cooperativismo contribuendo sicuramente a generare in Emilia una risposta resiliente diffusa, sia durante l'emergenza che durante la successiva fase post emergenziale, dall'altro, l'evento sismico "inatteso" ha rimesso in discussione il rapporto tra popolazione, rischi e territorio. La mancanza di una cultura sismica discende da una concomitanza di fattori che meriterebbero una più estesa trattazione. Il primo spunto di riflessione per la ricerca nasce proprio da questa dicotomia⁽³⁸⁾.

5.1. IL RUOLO DELLE CONOSCENZE SCIENTIFICHE PER LA CONSAPEVOLEZZA DEI RISCHI

La mancanza di una reale ed effettiva consapevolezza del potenziale sismico di questo territorio, è dovuta certamente in parte ad un vissuto esperienziale dove la pericolosità ambientale è storicamente associata al rischio idrogeologico. La sottovalutazione della pericolosità sismica soprattutto in riferimento all'ambiente di pianura, se incontra ragioni culturali, legate spesso alla tradizione popolare

e non a una reale competenza scientifica, è però nel contesto emiliano indiscutibilmente associata ad un "vuoto informativo"⁽³⁹⁾. È necessario, dunque, che la cultura scientifica si estenda al di fuori dei propri confini disciplinari e accademici, per adottare strategie comunicative atte a declinare i propri contenuti e il proprio sapere scientifico in linguaggi e approcci volti al dialogo con la società civile e al trasferimento di conoscenze utili a una maggiore comprensione del territorio e della pericolosità ad esso associata. L'occorrenza di un forte terremoto genera sensibilizzazione sociale al tema del rischio, che si esprime anche in forma di richiesta di informazione e di conoscenza. In Miletì e Darlington⁽⁴⁰⁾ ritroviamo esplicitata la relazione tra mancanza di conoscenza e senso di precarietà e insicurezza. L'informazione, in tutti i suoi aspetti, influisce in modo rilevante sulla capacità delle singole persone e delle comunità coinvolte nell'affrontare la situazione di emergenza. Pericolosità e rischio sono termini che rimandano a significati di incertezza e paura condivise a livello comunitario. Le conoscenze relative alle scienze della terra possono avere un ruolo cardine nei processi di produzione di conoscenza e consapevolezza del rischio. Nella complessa dimensione della pericolosità sismica, per la quale, a differenza di altri pericoli, i fattori scatenanti e predisponenti sono spesso entità, forze astratte (es. magnitudo) o non visivamente osservabili, le scienze della terra devono farsi carico di divulgare direttamente il loro sapere, poiché la responsabilità di definire concetti quali pericolosità, esposizione e vulnerabilità non può essere delegata ai media. In questa direzione, negli ultimi anni ha preso spazio un nuovo approccio interdisciplinare, la Geoetica, che ha

l'obiettivo di porre in stretta relazione il sapere geologico e una necessaria presa di coscienza circa la responsabilità che le scienze della terra devono avere nello sviluppo della relazione uomo-ambiente, approfondendo le implicazioni sociologiche, culturali, etiche delle geoscienze ⁽⁴¹⁾.

Se per primi gli studi geografici hanno indirizzato la ricerca sulla percezione dei rischi naturali, dedicandosi all'approfondimento degli elementi di natura descrittiva e all'analisi del comportamento sociale al verificarsi di fenomeni naturali pericolosi ⁽⁴²⁾ è però nella specificità degli studi geologici che si racchiude un sapere, ben definito ed approfondito, sulle dinamiche e sulle variabili di natura endogena proprie della pericolosità ambientale. Alexander ⁽⁴³⁾ sintetizza inoltre quali strategie le scienze della terra possano porre in essere per rivelare contenuti e metodi alla pluralità dei portatori di interessi (*stakeholders*) sul territorio. Circoscrivere e mappare le aree suscettibili agli eventi pericolosi; rendere più chiare le correlazioni tra pericoli e processi geofisici che li inducono; esplicitare valori di entità e frequenza in seno alla nozione di pericolosità, sono tutte azioni rilevanti nei processi di costruzione delle conoscenze e della percezione del rischio tra la popolazione ⁽⁴³⁾.

Il passaggio tra cultura scientifica e cultura diffusa può essere facilitato solo attraverso l'individuazione di idonei strumenti di comunicazione. Il trasferimento di conoscenze viene indicato da questo studio come passaggio obbligatorio al fine di orientare su base scientifica la percezione alla pericolosità territoriale poiché la percezione soggettiva è allo stesso tempo una visione fortemente influenzata da fattori contestuali ⁽⁴⁴⁾. A questo scopo, solo un approccio trasversale e interdisciplinare consente di creare un paradigma metodologico utile ad analizzare *in primis* la percezione dei rischi nella sua complessità, le forme e le risposte attraverso le quali si manifesta, per poi intervenire scegliendo efficaci strumenti informativi appropriati al contesto. Alexander ⁽⁴³⁾ esplicita in modo significativo questo concetto con l'espressione "democratizzazione del disastro", riferendosi alla necessità di inclusione della popolazione nelle azioni di prevenzione e mitigazione di rischi naturali.

Con questo intento lo studio, ha preteso di definire e sperimentare approcci volti alla costruzione di una maggior consapevolezza sismica, individuando nelle banche dati, negli inventari e nella rappresentazione cartografica importanti strumenti di comunicazione scientifica.

5.2. STRUMENTI DI DIVULGAZIONE E PERCEZIONE DEL RISCHIO

Il ruolo che le banche dati rivestono nello studio del territorio e dei rischi ha assunto nel tempo una crescente importanza. L'accesso a dati già codificati e organizzati facilita la ricerca scientifica, lo sviluppo di metodologie e

nuove progettualità. Considerando gli studi sui rischi, la disponibilità di cataloghi riferiti agli eventi storici ^(45,46) e la fruibilità di dati georeferenziati sono una fonte di informazione preziosa per conoscere la pericolosità territoriale e per sviluppare scenari e modelli predittivi utili alla definizione della suscettibilità ad un particolare fenomeno o evento pericoloso. La divulgazione dei *database* anche al di fuori dell'ambiente tecnico-scientifico amplifica il loro potenziale informativo, in modo particolare quando le modalità di accesso pubblico consentono facilmente la loro consultazione *online*. L'importanza dei cataloghi e degli inventari riferiti ai terremoti storici e ai fenomeni ambientali associati costituisce una documentazione preziosa soprattutto in un paese sismico come l'Italia, caratterizzato da alta densità abitativa e da una particolare rilevanza storico-artistica, innegabilmente vulnerabile. Particolare importanza assumono in questo contesto anche le testimonianze relative agli effetti associati ai terremoti storici. Il catalogo dei Forti terremoti in Italia e nell'area mediterranea riporta descrizioni degli effetti sull'ambiente indotti dai terremoti storici ⁽⁴⁵⁾. Le più rilevanti per il territorio colpito dall'evento del 2012 e le aree limitrofe riguardano soprattutto i terremoti costieri di Cesenatico del 1875 e Rimini 1916 per i quali si descrivono spaccature del terreno e risalite d'acqua. Per quanto riguarda i terremoti di Ferrara del 1570 e di Argenta del 1624 le fonti riportano fenomeni di liquefazione del tutto analoghi a quelli indotti dal sisma del 2012.

Con questa tesi di dottorato si è voluto in modo specifico descrivere le fasi di realizzazione che precedono la divulgazione *online* dell'inventario riferito agli effetti geologici di superficie indotti dal sisma del 2012 che ricadono in un'area di circa 1.200 km² coinvolgendo 16 comuni emiliani. La ricognizione sistematica di tali effetti, ha attivato diversi enti e istituti che tempestivamente si sono dedicati al censimento *in situ* dei fenomeni geologici superficiali. Tra questi la Regione Emilia Romagna e il Dipartimento di Protezione Civile hanno istituito un gruppo di lavoro interdisciplinare coinvolgendo ingegneri, geologi, geotecnici ⁽⁴⁷⁾. Durante le operazioni di rilevamento, la popolazione, attraverso segnalazioni e dettagliate descrizioni delle manifestazioni, ha collaborato in modo significativo con la comunità scientifica. Tuttavia, questo non ha impedito che si divulgassero interpretazioni erronee, generando *rumors* diffusi sull'origine di questi fenomeni. Anche sulla base di tali considerazioni, con lo scopo di migliorare l'efficacia informativa sul fenomeno e creare un univoco ed esaustivo riferimento sugli effetti indotti dal sisma del 2012, le diverse banche dati sui fenomeni di liquefazione sono state integrate e omogenizzate in un unico inventario consultabile *online*. Lo schema riportato in Figura 9 semplifica le procedure e la metodologia applicate in ambiente GIS (ArcGis 10.1) per la realizzazione dell'inventario.

Per la costruzione del *database* sono stati integrati gli effetti rilevati direttamente dall'osservazione delle ortofoto Aea (Ortophoto Aea: WorldView2 30/05/2012 Post-sisma image, Regione Emilia Romagna) e i *database* forniti dai seguenti enti e istituti di ricerca: Università di Ferrara, INGV (Gruppo Emergeo), ISPRA (avvalendosi della collaborazione delle Università di Modena e Reggio Emilia, Insubria Padova, Milano). Gli effetti georeferenziati sono rappresentati da uno *shapefile* di punti in forma vettoriale. Gli effetti sono stati attribuiti a quattro differenti categorie sulla base delle descrizioni associate agli stessi:

- liquefazioni,
- fessurazioni del terreno,
- fessurazioni con liquefazione,
- fenomeni altri (questi identificano cambi di livello dell'acqua nei pozzi, di temperatura, cedimenti o sollevamenti del terreno, etc.).

La catalogazione dei 1910 effetti geologici superficiali, è corredata da 200 schede descrittive accompagnate da estratti cartografici riferiti alla geomorfologia, geologia, microzonazione sismica di pianura, nonché da immagini fotografiche illustranti in dettaglio i fenomeni inventariati.

Sulla base dei dati raccolti in tale inventario è stato inoltre possibile realizzare una cartografia di suscettibilità alla liquefazione a scala 1:250.000 utilizzando per questo scopo un approccio geostatistico, sperimentando modelli probabilistici bi-variati e multi-variati. Il criterio dell'analisi multifattoriale ha dato risultati significativi, validando correlazioni positive (basate sul rapporto causa-effetto) tra la distribuzione spaziale dei fenomeni di sito, nelle loro diverse tipologie e intensità, e i fattori predisponenti che li hanno indotti.

Con l'obiettivo di porre in relazione il ruolo delle conoscenze scientifiche pregresse è stata condotta un'indagine volta all'analisi della percezione della pericolosità sismica e del livello di conoscenza del rischio sismico tra la popolazione emiliana dopo l'esperienza del terremoto del 2012. Allo scopo di evidenziare, dunque, una relazione tra produzione scientifica *stricto sensu* e l'impatto che gli eventi di pericolosità producono sulla popolazione, è stata realizzata una analisi qualitativa e quantitativa attraverso la divulgazione *online* di un questionario su un campione statistico di oltre 400 persone che ha coinvolto 260 alunni delle scuole medie inferiori e superiori nella Provincia di Modena e 153 persone attraverso il sito web del comune di residenza sul quale è stato pubblicato.

Il quesito è stato strutturato in quattro parti: a) dati anagrafici, b) terremoto emiliano c) effetti sismoindotti, d) cartografia. Le risposte date al questionario hanno permesso di evidenziare una generalizzata sottovalutazione del rischio sismico da parte della popolazione nell'area di studio, fondata soprattutto su di una erronea e limitata conoscenza della pericolosità sismica. Il quesito era volto ad indagare la percezione sismica con riferimento alla pericolosità, vulnerabilità, senso di fiducia nelle istituzioni e nella comunità, nonché l'utilità delle campagne informative o dei mezzi di informazione ed infine della cartografia come possibile strumento per la comprensione del rischio sismico.

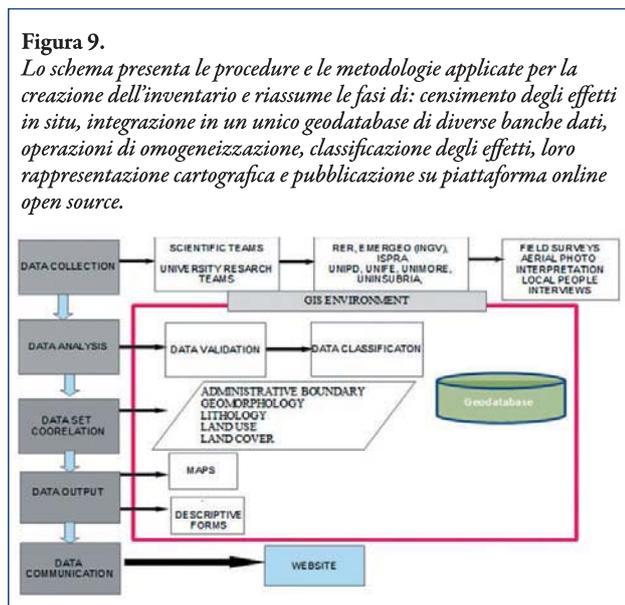
Al fine di approfondire il processo di acquisizione delle informazioni da parte della popolazione, ovvero di conoscere le fonti attraverso le quali è stimolata e costruita una coscienza attiva relativa ai rischi ambientali, è stato ritenuto necessario capire quali fossero i principali canali di informazione utilizzati dalla popolazione analizzata.

Due approfondimenti significativi sono stati dunque condotti, uno relativo all'analisi diacronica dei contenuti dei libri scolastici di geografia e di scienze della terra nella trattazione dei terremoti, e l'altro al linguaggio informativo utilizzato dai principali quotidiani locali durante il periodo dell'emergenza.

Al centro della riflessione è stata inoltre introdotta la rappresentazione cartografica quale strumento privilegiato di comunicazione, denotazione e connotazione comunicativa e come un possibile ed efficace strumento di divulgazione scientifica, utile alla conoscenza condivisa dei rischi naturali.

Con metodologie e finalità diverse, si sono approfonditi due diversi approcci cartografici, ritenendo che un linguaggio visuale e sintetico possa facilitare la lettura della complessità territoriale.

Il laboratorio di *cartografia collaborativa* svolto presso le scuole medie inferiori di Mirandola, esemplifica una possibilità educativa sperimentale e alternativa per l'insegnamento-apprendimento dei rischi naturali attraverso l'informazione cartografica.



5.3. PROPOSTE DI UTILIZZO DEI RISULTATI

Facilitare l'accesso a conoscenze scientifiche nell'ambito dei rischi naturali e territoriali è fondamentale per la promozione di risposte sociali resilienti. Appare evidente come il successo di strategie finalizzate alla prevenzione, mitigazione, e gestione dei rischi sia fortemente correlato alle caratteristiche sociali e culturali dei contesti locali. Di fatto la percezione dei rischi appare fortemente condizionata dall'informazione e dal grado di conoscenze possedute a livello individuale e comunitario. La conoscenza territoriale e la capacità di lettura del paesaggio si traducono dunque in consapevolezza e in possibilità di intervento nei processi di costruzione partecipata dei territori.

L'occorrenza di un forte terremoto genera una sensibilizzazione sociale al tema del rischio, che si esprime anche in forma di richiesta di informazione e di conoscenza. L'informazione, in tutti i suoi aspetti influisce in modo rilevante sulla capacità delle singole persone e delle comunità coinvolte nell'affrontare la situazione di emergenza. Pericolosità e rischio sono termini che rimandano a significati di incertezza e paura condivise a livello comunitario. La presente ricerca ha consentito di dimostrare che esiste una netta relazione tra scienze geologiche, strumenti di divulgazione e costruzione della percezione del rischio tra la popolazione. La corretta informazione coadiuvata da un valido strumento di divulgazione, come ad esempio quello cartografico, può dunque portare ad un miglioramento anche nella gestione del rischio, sia nella fase di prevenzione, sia in quella post-evento. I disastri tendono ad avere ripercussioni di dimensioni sempre maggiori e le conseguenze si traducono in crescenti costi diretti e indiretti per le comunità coinvolte, gravando sulle stesse nel medio e lungo termine. Il messaggio scientifico, quando esteso alla società civile, deve essere chiaro e univoco in quanto ha delle importanti ripercussioni sulle decisioni di *geogovernance* locale.

In questo senso, strumenti quali la diffusione di dati *online* e le rappresentazioni cartografiche possono incidere

in modo costruttivo sulle dinamiche di prevenzione e mitigazione del rischio. La consapevolezza dei rischi e della pericolosità parte dalla condivisione del sapere che, nell'ambito dei rischi, è sapere scientifico. Deve dunque essere incentivato, nell'approccio scientifico, uno sguardo olistico, che superi i confini disciplinari, capace di cogliere e insegnare l'eterogenea dimensione del rischio. Questo rappresenta il presupposto di inclusività necessario alla formazione di una cittadinanza responsabile e attiva, dotata di conoscenza e consapevolezza dei rischi.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE DEL PROGETTO EGEST

Vista l'esperienza estremamente positiva di Spinner 2013 ed in particolare sulla base dei risultati ottenuti nell'ambito del Progetto EGEST, ci si augura che in futuro le Scienze della Terra siano 'stabilmente' considerate, nell'ambito dei progetti regionali e a prescindere dall'emergenza sismica, come un settore strategico per lo sviluppo economico, proprio per il contributo che queste discipline possono dare alla conoscenza del territorio e alla mitigazione dei rischi naturali. Lo sviluppo e la ricostruzione dei territori emiliani e dei loro tessuti produttivi in seguito allo sciame sismico -ma lo stesso potrebbe dirsi in occasione di altri eventi estremi naturali- non può infatti prescindere dall'analisi di dettaglio di quanto accaduto e dalla comprensione delle cause che hanno portato alla perdita di vite e di infrastrutture. Ciò se si vuole evitare che nel futuro tali effetti possano ripetersi.

Con l'occasione il coordinatore del dottorato vuole ringraziare, a nome di tutto il Collegio dei Docenti, la Regione Emilia-Romagna che, tramite Spinner 2013, ha voluto finanziare i dottorati di ricerca che hanno permesso la realizzazione delle quattro tesi i cui risultati principali sono stati qui sinteticamente riportati. Il Collegio tutto è convinto che gli obiettivi formativi alla base del Progetto EGEST siano stati pienamente raggiunti.

BIBLIOGRAFIA

- DISS WORKING GROUP (2015): Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2015 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - All rights reserved, doi: 10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0
- Pieri M. e Groppi G. (1981): Subsurface geological structure of the Po Plain, Italy. CNR, Prog. Final. Geodin., pubbl. N° 414, Roma, 13 pp.
- Caputo R., Pellegrinelli A., Bignami C., Bondesan A., Mantovani A., Stramondo S. e Russo P. (2015): High-precision levelling, DInSAR and geomorphological effects in the Emilia 2012 epicentral area. *Geomorph.*, 235, 106-117.
- RER & ENI-AGIP (1998). Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna. A cura di G. Di Dio. S.EL.CA. (Firenze).
- Molinari F., Boldrini G., Severi P., Duroni G., Rapti-Caputo D. e Martinelli G. (2007): *Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara. Regione Emilia-Romagna* (DB MAP Eds.). Firenze, 61 pp.
- Mantovani A. (2016): Recent tectonic activity of the central sector of the Ferrara Arc emphasized by a multidisciplinary approach. Ph.D. thesis, Università di Ferrara, 240 pp.
- Nakamura Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI*, 30, 25-33.
- Aki K. (1957): Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earth. Res Inst.*, 35, 415-456.
- Albarelo D. e Lunedei E. (2011): Structure of ambient vibration wavefield in the frequency range of engineering interest ([0.5, 20] Hz): insights from numerical modelling. *Near Surface Geophysics*, 9(6), 543-599.
- Abu-Zeid N., Bignardi S., Caputo R., Mantovani A., Tarabusi G. e Santarato G. (2013). Acquisition of vs profiles across the Casaglia anticline (Ferrara Arc). DPC-INGV-S1 Project, Final Report, pp. 42-46.

- 11) Abu-Zeid N., Bignardi S., Caputo R., Mantovani A., Tarabusi G. e Santarato G. (2014). Shear-wave velocity profiles across the Ferrara Arc: a contribution for assessing the recent activity of blind tectonic structures. 33° GNGTS, Bologna 25-27 novembre 2014, *Atti*, 1, 117-122.
- 12) Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokia K. e Yasuda S. (1978): A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. 2nd Int. Conf. on Microzonation, San Francisco, *Proceedings*, 885-896.
- 13) Tonkin and Taylor (2013): *Canterbury Earthquakes 2010 and 2011. Land report as at 29 February 2012*. 108 pp., Earthquake Commission (<http://www.tonkin.co.nz/canterbury-land-information/docs/downloads2592013/T&T-Stage-3-Report.pdf>, last visited May 9, 2014).
- 14) Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G. e Paolucci R. (2011): Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bull. Earthq. Eng.*, 9, 1899-1930.
- 15) Papathanassiou G., Mantovani A., Tarabusi G., Rapti D. e Caputo R. (2015): Assessment of liquefaction potential for two liquefaction prone areas considering the May 20, 2012 Emilia (Italy) earthquake - *Engineering Geology*, 189. doi: 10.1016/j.enggeo.2015.02.002
- 16) Priore F. (2016): Studio integrato geomorfologico-geofisico dell'area epicentrale del terremoto del 20 Maggio (Mw 5.9) in Emilia-Romagna. Ph.D. thesis, Università di Parma, 150 pp.
- 17) Gasperini L., Del Bianco F., Stanghellini G. e Priore F. (2014): Acquisition of geophysical data in shallow-water environments using autonomous vehicles: state of the art, perspectives and case histories. 33° GNGTS, Bologna 25-27 novembre 2014, *Atti*, 3, 74-80.
- 18) Priore F., Dal Passo E., Del Bianco F., Gallerani A., Stanghellini G. e Gasperini L. (2013): Technical report on the seismostratigraphic survey of the Cavo Napoleonico, across the epicenter of the 2012 Emilia earthquake. Rapporto tecnico N.105, Bologna, Giugno 2013.
- 19) Pizzi A. e Scisciani V. (2012): Analysis of the pattern distribution and origin of the liquefaction features induced by the May 2012 Emilia earthquakes. 31° GNGTS, Potenza 20-22 novembre 2012, *Atti*, 87-93.
- 20) Holbrook J. e Schumm S.A. (1999): Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*, 305, 287-306.
- 21) Burrato P., Ciucci F. e Valensise G. (2003): An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting. *Ann. Geophys.*, 46(5), 865-882.
- 22) Bondesan M., Ferri R. e Graziani S. (1992): Aspetti geomorfologici e problemi paleogeografici della zona fra Bondeno, Finale Emilia e Mirabello nel quadro degli antichi domini idrografici del Secchia, del Panaro e del Reno. In Gelichi S. (Ed.), *Un mito e un territorio: Ansalaregina e l'Alto Ferrarese nel Medioevo*, All'Insegna del Giglio, Firenze, 13-44.
- 23) Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R. e Valensise G. (2012): Is blind faulting truly invisible? Tectonic-controlled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy). *Ann. Geophys.*, 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.
- 24) Calabrese L., Martelli L. e Severi P. (2012): Stratigrafia dell'area interessata dai fenomeni di liquefazione durante il terremoto dell'Emilia (maggio 2012). 31° GNGTS, Potenza 20-22 novembre 2012 *Atti*, 2, 119-126.
- 25) Sclater J.G. e Christie P. (1980): Continental stretching: An explanation of the post mid cretaceous subsidence of the central North Sea basin. *J. Geophys. Res.*, 85(B7), 3711-3739.
- 26) Caputo R. (2005): Ground effects of large morphogenic earthquakes. *J. Geodyn.*, 40(2-3), 113-118.
- 27) Tarabusi G. (2016): L'uso delle misure di microtremore per investigare strutture tettoniche sepolte: il caso di studio dell'anticlinale di Mirandola. Ph.D. thesis, Università di Ferrara, 139 pp.
- 28) Tarabusi G. e Caputo R. (2016): The use of HVSR measurements for investigating buried tectonic structures: the Mirandola anticline, Northern Italy, as a case study. *Int. J. Earth Sc.*, 1-13, doi: 10.1007/s00531-016-1322-3.
- 29) Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005): Passive seismic stratigraphy: a new efficient, fast and economic technique. *J. Geotech. Environ. Geol.*, 3, 51-77.
- 30) Martelli L. e Molinari F.C. (2008): Studio geologico finalizzato alla ricerca di potenziali serbatoi geotermici nel sottosuolo del comune di Mirandola, Regione Emilia Romagna. Internal Report, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Bologna, pp. 26.
- 31) Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vanucchi G., Madiati C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C. e Ricci L. (2013): *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura emiliana del 2012 (ORD. 70/2012)*. 32° GNGTS, Trieste 19-21 novembre 2013, *Atti*, 2428-434.
- 32) Castellaro S. e Mulargia F. (2009): Vs30 estimates using constrained H/V measurements. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 761-773, doi: 10.1785/0120080179.
- 33) Gruppo di lavoro MS (2008): ICMS, Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. and Dvd, http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833.
- 34) Castellaro S., Padròn L.A. e Mulargia F. (2014): The different response of apparently identical structures: a far-field lesson from the Mirandola 20th May 2012 earthquake. *Bull. Earthq. Eng.*, 12(5), 2481-2493, doi: 10.1007/s10518-013-9505-9.
- 35) Tarabusi G. (2012): *Microzonazione sismica del comune di Mirandola. Quadro conoscitivo del PSC di Mirandola*. <http://www.comune.mirandola.mo.it/la-citta-e-il-territorio/piano-strutturale-comunale-psc>, Studio di Geologia Tarabusi, QB_C_REL1, 26/01/2012, Bologna, pp. 57
- 36) Bonini L., Toscani G. e Seno S. (2014): Three-dimensional segmentation and different rupture behavior during the 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy). *Tectonophysics*, 630, 33-42, doi: 10.1016/j.tecto.2014.05.006.
- 37) Turri E. (1998): Il paesaggio come teatro. Dal territorio vissuto al territorio rappresentato. Marsilio ed. Venezia, pp. 239.
- 38) Lanfredi C.S. (2017): Integrated study of coseismic surface effects of the 2012 Emilia earthquake: catalogue, susceptibility assessment and analysis of seismic risk awareness. Ph.D. thesis, Università di Modena e Reggio Emilia, 182 pp.
- 39) Guidoboni E. e Valensise G. (2014): L'Italia dei disastri. Dati e riflessioni sull'impatto degli eventi naturali 1861-2013. Bononia University Press, pp. 430, Bologna.
- 40) Mileti D.S. and Darlington J.D. (1995): Societal Response to Revised Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Area, *Int. J. Mass Emerg. and Disasters*, 13(2), pp. 119-
- 41) Peppoloni S. e Di Capua G. (2012): Geoethics and geological culture. Reflections from the Geoitalia Conference 2011. *Ann. Geophysics*, 55(3), ISSN 2037-416X
- 42) Saitta P. e Gatto E. (2009): Territorio e percezione del rischio: un approccio interdisciplinare. *Boll. Soc. Geogr. It.*, 13(2), 381-401.1
- 43) Alexander D. (2007): Making research on geological hazards relevant to stakeholders' needs. *Quat. Int.*, 171-172, 186-192. doi: 10.1016/j.quaint.2007.01.006
- 44) Sjöberg J. (2000): Factors in risk perception. *Risk Analysis*, 20, 1-11.
- 45) Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. and Valensise G. (2007). *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA; available online: <http://storing.ingv.it/cfti4med/>
- 46) Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (2011): *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>.
- 47) Regione Emilia-Romagna (2012). *Primo rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a S. Carlo, frazione di S. Agostino* (Provincia di Ferrara), a cura del Gruppo di lavoro per la valutazione degli effetti di liquefazione a seguito dei terremoti del 20 e 29 maggio 2012. http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-dilavoro/rapporto_sancarlo.pdf.
- 48) Martelli e Romani (2013) - Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012 (Ordinanza del commissario delegato - Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.
- 49) Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R. e Scandone P. (1992): *Structural Model of Italy, scale 1:500.000*. 114(3). Prog. Fin. Geodinamica, Quad. 'La Ricerca Scientifica', CNR, Roma.
- 50) Atzori S., Merryman Boncori J.P., Pezzo G., Tolomei C. e Salvi S. (2012): Secondo report analisi dati SAR e modellazione della sorgente del terremoto dell'Emilia, http://terremoti.ingv.it/images/ultimi-eventi/2012/report_sar_ingv_emilia_2.pdf.
- 51) Bard P.-Y. et alii (2005): Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>