

Criteria e procedure per la compilazione di un inventario speditivo delle sorgenti potenziali di terremoti distruttivi finalizzato alla compilazione di una nuova mappa delle zone sismogenetiche per l'area italiana

C. Meletti¹, M. Stucchi², F. Galadini³, I. Leschiutta⁴, P. Scandone¹

1 - Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa (e-mail: sismo@dst.unipi.it)

2 - CNR, Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, Milano

3 - CNR, Istituto di Ricerca sulla Tettonica Recente, Roma

4 - ING/GNDT c/o CNR, Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, Milano

1 Introduzione

L'obiettivo principale del Progetto 5.1.1 "Mappa delle zone sismogenetiche e probabilità degli eventi associati" del GNDT, PE98 (<http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/P511/home.html>), era di disegnare una nuova mappa delle zone sismogenetiche, che raccogliesse gli avanzamenti concettuali e conoscitivi resi disponibili negli ultimi anni: inventari di strutture attive, rivalutazione della distribuzione spazio-temporale della sismicità a partire dal nuovo catalogo CPTI (GdL CPTI, 1999), ecc.

Rispetto al 1996, fase di chiusura della mappa ZS4 (Meletti et al., 2000), si dispone oggi di un numero notevole di informazioni dirette sulle strutture attive, dedotte da indagini geologiche di superficie. Tali informazioni sono state compilate in modo omogeneo nell'ambito del Progetto 5.1.2 "Inventario delle faglie attive e dei terremoti ad esse associabili" (sito Web: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/P512/home.html>) e rese disponibili nel lavoro di Galadini et al. (2000, questo volume).

Ci si è quindi posti l'obiettivo di compilare un primo, sia pure molto preliminare, inventario delle sorgenti di terremoti distruttivi, da usare come uno degli elementi di background della nuova mappa delle zone sismogenetiche.

Questo obiettivo è simile a quello del progetto "Database of potential sources..." (Valensise e Pantosti, 2000), al cui impianto concettuale questo lavoro si ispira, con la differenza sostanziale che in questo caso si tratta di un inventario speditivo, strettamente finalizzato a fornire le basi per la conclusione del progetto 5.1.1. L'approccio parte dall'assunzione che i terremoti siano prodotti da sorgenti sismiche rappresentate da segmenti di faglia e che le rispettive magnitudo siano in qualche modo legate alle dimensioni della rottura della sorgente stessa.

Gli elementi cartografati nel corso del progetto 5.1.2 rappresentano l'espressione superficiale di strutture sismogenetiche responsabili di molti terremoti distruttivi. Tuttavia è noto che terremoti distruttivi possono essere generati anche da faglie la cui rottura cosismica non raggiunge la superficie (si vedano, ad es., le ipotesi di rottura dei terremoti del 1908 e del 1976 riportate rispettivamente in Valensise e Pantosti, 1992 e Aoudia e Suhadolc, 2000, questo volume). Ciò è tanto più vero nel caso di eventi il cui livello energetico è insufficiente alla propagazione della rottura fino alla superficie. A questo proposito, si può dire che in Italia non vengono generalmente osservati chiari eventi di fagliazione di superficie per terremoti con $M < 6$ (vedi ad es. Pantosti e Valensise, 1995,

nonché il dibattuto caso delle rotture di superficie formatesi con i terremoti della sequenza umbro-marchigiana del settembre-ottobre 1997: Basili et al., 1998; Cello et al., 1998; Cinti et al., 1999) a meno di casi legati a contesti geodinamici particolari (vedi ad es. Azzaro, 1999, per l'area etnea).

Strutture di questo tipo sono quindi assenti dai prodotti finali del progetto 5.1.2; per completare l'inventario occorre quindi fare ricorso a informazioni derivanti da indagini geofisiche di sottosuolo e dalle tracce dei terremoti forti avvenuti nel passato, come disponibili dagli studi storico-macrosismici.

Con questi presupposti si è proceduto alla costruzione di un "inventario speditivo" delle sorgenti sismiche in grado di produrre terremoti con $M \geq 5.5$. In questo inventario si è inteso considerare e mettere assieme: 1) informazioni di tipo geologico che consentono di identificare l'espressione superficiale di sorgenti; 2) informazioni geofisiche che forniscono indicazioni sulle sorgenti attive sepolte; 3) informazioni sismologiche che consentono di fare ipotesi sulla geometria di sorgenti responsabili di quei terremoti con $M \geq 5.5$ per i quali la sorgente non è nota altrimenti.

Questo inventario deve essere considerato come la compilazione critica dei risultati del Progetto 5.1.2 e di parte del Progetto 5.1.1, strettamente finalizzata all'obiettivo della nuova zonazione sismogenetica. In quanto tale si configura come un elemento di prima approssimazione, che va valutato nel contesto delle finalità per il quale viene prodotto. Ad esempio, è evidente che le sorgenti appartenenti al gruppo 3 (vedi più sopra) potranno risultare definite "per difetto", in quanto si dispone della sola immagine della porzione di sorgente attivatasi in occasione del/dei terremoti conosciuti.

L'inventario contiene solo le informazioni raccolte, direttamente o dalla letteratura, alla data del giugno 2000; come tale potrà risultare lacunoso in alcuni settori del territorio italiano. Il carattere speditivo è sottolineato anche dal fatto che viene considerata soltanto l'espressione superficiale o la proiezione in superficie delle sorgenti dei terremoti, rinunciando a priori a valutazioni tri-dimensionali accurate, in quanto considerate non fondamentali per il disegno delle nuove ZS. Inoltre, allo stato attuale dei lavori non sono stati assegnati parametri di qualità alle sorgenti sismiche.

Di seguito vengono presentate le linee-guida dell'operazione, che si possono così riassumere nei criteri di:

- i) compilazione inventario dei segmenti di faglia attivi, compilato nella prospettiva del presente lavoro;
- ii) compilazione del dataset delle immagini delle sorgenti come dedotte da dati storico-macrosismici;
- iii) composizione dei due insiemi, selezione delle sorgenti più affidabili e calibrazione dei parametri di alcuni di esse in base a giudizio esperto.

I risultati completi saranno oggetto di una nota a parte.

2 I dati di base

2.1 Apporti geologici

Una gran parte dei dati geologici necessari alla compilazione di un inventario speditivo di sorgenti è stata raccolta e sintetizzata nell'ambito del Progetto 5.1.2 "Inventario delle faglie attive e dei terremoti ad esse associabili". Un resoconto dettagliato del lavoro svolto nell'ambito del progetto menzionato è riportato nella nota di Galadini et al., 2000 (questo volume). Di seguito, pertanto, verranno fornite soltanto alcune informazioni necessarie ai fini della presente nota.

In un periodo pari a circa 1 anno (secondo semestre 98 - primo semestre 99), si è provveduto alla raccolta del materiale messo a disposizione dalle varie UR afferenti al progetto. Il materiale pervenuto (reso via via disponibile sul sito web del Progetto 5.1.2) è risultato fortemente disomogeneo per quanto riguarda le scelte dell'intervallo temporale su cui si basa la definizione di attività di una determinata struttura e per il dettaglio cartografico. Si è ritenuto pertanto necessario uniformare il materiale disponibile mediante la definizione della legenda. Il prodotto finale (un inventario delle faglie attive nell'Italia peninsulare, elementi geologici di superficie) è stato riassunto in carte a piccola scala in cui sono rappresentate con i diversi colori le espressioni superficiali di faglie e in tabelle in cui sono riportati dati sulla cinematica delle strutture (Galadini et al., 2000, questo volume). Il disomogeneo livello delle conoscenze per i diversi settori comporta che i dati rappresentati abbiano diverso grado di attendibilità. Non si è tuttavia proceduto ad attribuire "parametri di qualità" alle faglie rappresentate.

Le informazioni sulle faglie riportate nelle carte a piccola scala sono tipicamente bidimensionali: è in pratica soltanto rappresentato l'andamento delle strutture sulla superficie. Dati sull'andamento in profondità delle faglie cartografate sono tuttavia disponibili per l'Italia centrale e sono stati raccolti nel volume del GNDT edito da Barchi et al. (2000), nel quale per ciascuna faglia sono riassunti i principali parametri sotto la voce "Caratterizzazione della 'box sismogenetica'". Per questo settore dell'Appennino e sulla base di questi dati è stata tentata una stima dell'hazard con metodi "innovativi" (Peruzza, 2000).

Per l'Italia settentrionale è attualmente disponibile un prototipo di inventario di faglie attive (elementi di superficie). Questo documento preliminare, proprio perché ancora in discussione, non è stato considerato sufficientemente stabile nella prospettiva di contribuire all'attuale release dell'"inventario delle sorgenti".

Nell'inventario del progetto 5.1.2 sono state riportate faglie e sistemi di faglie. Questi ultimi sono costituiti da più segmenti di faglia (di seguito faglie) senza continuità fisica in superficie (possibile in profondità), spesso disposti con geometria en-echelon al bordo di bacini intermontani. Dati geologici-geomorfologici (es. entità dei rigetti compatibili con l'attivazione di strutture sensibilmente più lunghe della singola faglia) evidenziano che in alcuni casi tutte le singole faglie di un sistema possono attivarsi in caso di terremoti con magnitudo elevata (generalmente $M > 6.5$). Viceversa, nel caso in cui si verifichi la rottura di un singolo segmento, si possono avere terremoti di magnitudo moderata ($5 \leq M < 6$).

I dati sull'espressione superficiale di faglie attive disponibili per l'Italia peninsulare sono stati successivamente integrati con le informazioni contenute nella mappa delle strutture di sottosuolo probabilmente attive, compilata appositamente per questa ricerca

dall'UR Pisa (Fig. 1), basata sia sui dati disponibili in letteratura sia - soprattutto - sulle evidenze che emergono dalla prospezione per ricerca di idrocarburi (ancora in gran parte riservati), nonché dagli studi di dettaglio condotti per la caratterizzazione dei siti nucleari. Dati derivanti dalla prospezione geofisica hanno pure consentito di caratterizzare l'attività recente della cosiddetta Scarpata Ibleo-Maltese (Hirn et al., 1997) e della faglia dello Stretto di Messina (Finetti e Del Ben, 1995).

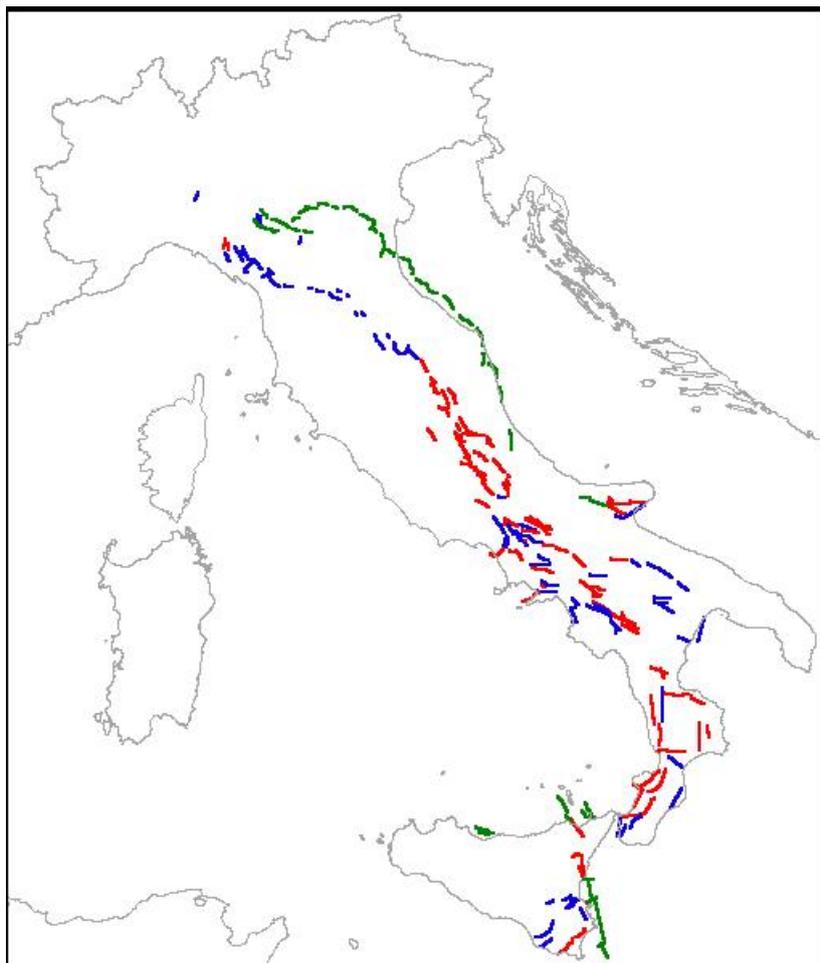


Fig. 1 – Strutture di sottosuolo attive utilizzate per costruire l'inventario delle sorgenti: in rosso le faglie attive, in blu le faglie caratterizzate da attività quaternaria, in verde le strutture sepolte potenzialmente attive.

L'insieme delle strutture attive così ottenute è stato sottoposto ad un primo filtraggio cosiddetto di "buon senso" (*expert judgement*). In particolare: i) sono state effettuate scelte nel caso di soluzioni in cui c'era discordanza tra ricercatori (discordanza sull'individuazione delle strutture e discordanza sulla presunta attività delle strutture; sono le

faglie gialle nella carta del progetto 5.1.2); ii) sono state tolte le faglie considerate "poco credibili", cioè quelle strutture che, seppur indicate come sicuramente attive dall'autore proponente, sono parse, in sede di compilazione dell'inventario delle sorgenti, in contrasto con il quadro cinematico generale o locale; iii) sono state mantenute, evidenziandole opportunamente, alcune faglie antitetiche di faglie master pure riconosciute e cartografate, in quanto ritenute comunque capaci di produrre terremoti significativamente forti, cioè con $M \geq 5.5$, seppur di livello energetico più basso di quelli generabili dalla loro master.

A titolo di esempio si può citare l'area del Pollino per la quale sono disponibili differenti ipotesi di faglia attiva (sostenute da indagini di tipo paleosismologico: Cinti et al., 1997; Michetti et al., 1997) che appaiono non compatibili tra loro; in questo caso si è scelta l'ipotesi della faglia orientata NO-SE in base alla compatibilità con il contesto cinematico generale dell'area. Nel caso invece della faglia del Mercure (Basilicata; faglia n. 96 in Galadini et al., 2000, questo volume), in cui non vi era accordo tra i ricercatori sulla cronologia dell'attività, si è ritenuto che i dati a sostegno della attività recente non potessero essere considerati esaustivi e pertanto tale struttura è stata tolta dall'inventario.

La carta delle faglie attive così elaborata è rappresentata in Figura 1 e contiene 64 faglie sicuramente attive, 60 faglie caratterizzate da attività quaternaria (seguendo la legenda adottata dal progetto 5.1.1) e 48 faglie sepolte determinate con indagine geofisica e caratterizzate pure da presumibile attività quaternaria, per complessivi 125 sistemi.

2.2 Apporti sismologici

Ai fini del presente lavoro è stato adottato come riferimento il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Gruppo di Lavoro CPTI, 1999). Per ciascun evento sono stati considerati i dati di intensità utilizzati per la determinazione dei parametri di CPTI, provenienti da DOM (Monachesi e Stucchi, 1997) o CFTI (Boschi et al., 1995, 1997).

I terremoti che nel catalogo CPTI hanno $M \geq 5.5$ per almeno una delle 4 magnitudo adottate (vale a dire Me, Mm, Ms, Ma) sono 201. In particolare, 13 di questi sono avvenuti prima del 1000 e i rispettivi studi hanno pochi dati di intensità (spesso uno solo). Altri 15 eventi, pur avvenuti dopo il 1000, non dispongono di dati di intensità o ne dispongono in misura minima (meno di 5 punti di intensità).

Per i restanti 173 eventi, date le finalità di questo lavoro si è deciso di applicare il metodo di Gasperini et al. (1999), già utilizzato in fase di costruzione del catalogo CPTI per la determinazione dei parametri di sorgente. Questo metodo (algoritmo Boxer) consente di determinare, a partire dai dati di intensità, alcuni parametri dell'evento, quali le coordinate epicentrali, la magnitudo, la lunghezza e l'azimut della rottura: si ricava in sostanza l'immagine della sorgente, vale a dire la proiezione in superficie della sorgente stessa.

Il trattamento dei dati prodotti da questo tipo di elaborazione è avvenuto prevalentemente attraverso l'uso del Gis che ha consentito, tra l'altro, di visualizzare e confrontare in mappa le box prodotte con i rispettivi dati di intensità e individuare eventuali evidenti discordanze che richiedessero un esame attento per interpretare oppure per rigettare il risultato dell'algoritmo Boxer. E' il caso, per esempio, di alcuni eventi con

epicentro in mare la cui box ricadeva in terra perché determinata dalla distribuzione delle località colpite.

Per alcuni terremoti, ipotesi di sorgente sono state fornite dall'UR di Trieste (Sirovich et al., 2000, in questo volume; Sirovich et al., 1999; Sirovich, 1996 per la descrizione metodologica) Per ognuno di essi il codice di calcolo ha fornito le coordinate epicentrali, la profondità, la giacitura del piano di faglia, il movimento lungo questa (in termini di strike, dip e rake) e la lunghezza della rottura che può essere non simmetrica rispetto all'ipocentro, cioè rispetto al punto di enucleazione della rottura stessa.

Le sorgenti individuate con l'applicazione di questo metodo sono state confrontate con le uscite analoghe realizzate con il metodo Boxer (Gasperini et al., 1999). Per molti eventi le due soluzioni non presentavano sostanziali differenze e si è scelto di adottare la sorgente del codice Boxer per mantenere una maggiore uniformità con il resto dei dati; in pochi casi invece le sorgenti proposte dai due metodi differivano ed è stata allora selezionata la soluzione proposta che meglio si accordasse con le condizioni al contorno (prevalentemente il contesto geologico-strutturale dell'area). Nel caso del terremoto del 1799 di Camerino, per esempio, si è ritenuto che la faglia proposta da Sirovich et al. (1999) fosse più coerente con lo stile tettonico dell'area.

3 Costruzione dell'inventario delle sorgenti

3.1 Associazione terremoti-faglie

Volendo costruire un inventario di sorgenti e nella consapevolezza che mai l'indagine di tipo geologico potrà essere completamente esauriente al riguardo, si è partiti dal presupposto che comunque il prodotto che si andava realizzando sarebbe stato costituito da oggetti di tipo diverso, vale a dire: strutture sicuramente attive con terremoto/i associati, strutture attive ma senza possibilità di associarvi eventi del catalogo storico e, per tutti gli eventi non associabili a strutture note, l'immagine della sorgente derivata dai dati di intensità.

Nel paragrafo "Apporti geologici" sono state descritte e definite le faglie attive. Si è pertanto proceduto dapprima alla associazione dei terremoti con $M \geq 5.5$ (da CPTI) a queste faglie. Solo in pochi casi si è potuto ricorrere a informazioni derivante da indagini di tipo paleosismologico per lo scarso numero di eventi del catalogo storico rinvenuti nel corso di quelle ricerche. Di conseguenza, per la maggior parte dei terremoti si è dovuti partire dai dati disponibili sulla distribuzione del danno.

L'operazione effettuata non è mai stata formalizzata in precedenza, in ambito GNDT; pertanto, sono stati dapprima messi a punto i criteri di lavoro. In particolare, per ogni evento selezionato sono stati considerati i relativi dati di intensità e, specificatamente, quelli relativi al massimo danneggiamento. Laddove erano disponibili soluzioni di meccanismi focali, si sono considerate queste indicazioni sulla possibile cinematica alla rottura in relazione alle faglie presenti nell'area circostante l'epicentro e alla loro cinematica.

Tra gli elementi presi in esame per poter procedere ad una più attendibile associazione faglia-terremoto, sono state analizzate per ogni struttura le probabili zone di

massimo rilascio di energia rispetto alla sua geometria profonda, considerando la supposta inclinazione della struttura (qualora disponibili queste informazioni da dati di geologia di superficie) e la possibile profondità dello strato sismogenetico; questo tipo di osservazione è stato tradotto in termini di distanza dell'area di massimo danneggiamento atteso dall'emergenza in superficie della faglia.

In altri termini, nei casi in cui l'area di massimo danneggiamento coincideva o era prossima all'emergenza della faglia (ovviamente considerando anche l'eventuale incertezza del dato macrosismico), si è spesso ritenuto opportuno non procedere all'associazione; in termini più strettamente geologici, essendo faglie normali la stragrande maggioranza delle strutture attive individuate, significa che non si è proceduto all'associazione qualora il massimo danneggiamento risultasse nel letto della faglia.

Per tutti gli eventi per i quali non è stata possibile l'associazione a strutture attive note, la sorgente è stata rappresentata attraverso la sua immagine così come determinata dall'algoritmo Boxer.

L'associazione sorgenti-terremoti è stata formalizzata in una prima tabella nella quale, accanto ad ogni struttura attiva individuata dal Progetto 5.1.2, sono stati riportati i parametri del terremoto/i che le sono stati associati.

Ne sono risultati tre classi di sorgenti:

- a) faglie e sistemi di faglie con terremoto/i associato/i: comprende faglie "rosse" e "blu" (vedi Galadini et al., 2000, questo volume) provenienti dalla carta del Progetto 5.1.2 e strutture di sottosuolo attive (Fig. 2). Tra queste strutture ci sono anche faglie considerate antitetiche di faglie master; è questo soprattutto il caso della Calabria (Valle del Crati e del Mesima) in cui si è ritenuto corretto mantenere nell'inventario delle sorgenti anche le strutture antitetiche perché ritenute in grado di generare eventi con magnitudo maggiore o uguale alla soglia prefissata.
- b) faglie e sistemi di faglie senza alcun terremoto associato: comprende solo le faglie "rosse" della carta del Progetto 5.1.2 per le quali non sono stati individuati terremoti del catalogo storico da associarvi (Fig. 3). In questa classe sono state comprese anche quelle strutture per le quali si hanno evidenze di paleoterremoti, ma non di terremoti storici compresi nel catalogo CPTI. Sono state invece rimosse dall'inventario tutte quelle faglie della carta di Figura 1 (ivi riportate con i colori blu e verde), che viceversa non sono state associate ad alcun terremoto storico;
- c) box (ricavate con l'algoritmo Boxer) quale immagine della sorgente per tutti quei terremoti che non sono stati associati ad alcuna faglia o sistema di faglie e i cui dati di intensità hanno consentito questa determinazione (Fig. 4). Per l'evento del 1799 la sorgente è determinata da Sirovich et al. (1999). Di altri eventi privi di dati di intensità o con dati di intensità scarsi si è deciso di rappresentare la sorgente attraverso dei cerchi (Fig. 5) il cui diametro corrispondesse alla

lunghezza della rottura determinata in base alla magnitudo utilizzando le relazioni di Wells e Coppersmith (1994).

In termini numerici l'inventario delle sorgenti e i rispettivi terremoti associati sono sintetizzati in Tabella 1.

Tipo di sorgente		Numero sorgenti	Eventi associati
Faglie con terremoto associato	Faglie o sistemi di faglia	38	65
	Strutture sepolte attive	17	20
Faglie senza terremoto associato	Faglie o sistemi di faglia	22	0
	Faglie con soli paleoterremoti	5	0
Sorgenti da dati sismologici	Box sismogenetiche	88	88
	Sorgenti da inversione Sirovich et al. (1999)	1	1
	Sorgenti non definite	27	27
Totale		198	201

Tab. 1 – Numero di sorgenti definite nell'inventario, raggruppate per tipologia e relativo numero di eventi del catalogo CPTI ad esse associato.

Il fatto che dal punto di vista numerico sorgenti e eventi siano quasi identici deve essere considerata solamente una coincidenza.

La Figura 6 riporta gli eventi del set di riferimento rappresentati con un simbolo grafico differente a seconda che la relativa sorgente sia rappresentata da strutture note (eventi associati) o da sorgenti determinate sulla base dei dati di intensità (eventi non associati). Si può notare come su 201 eventi presi in considerazione, per 116 (circa il 57%, si veda la Tabella 1) non si ha associazione con faglie note.

Oltre ai ben ovvi casi di eventi con epicentro in mare o al di fuori del territorio nazionale (questi ultimi per dati di intensità scarni), agli eventi che ricadono in Italia settentrionale (per i motivi che sono già stati esposti), le mancate associazioni riguardano molti eventi nelle classi più basse di magnitudo; ma in qualche caso anche eventi della classe maggiore.

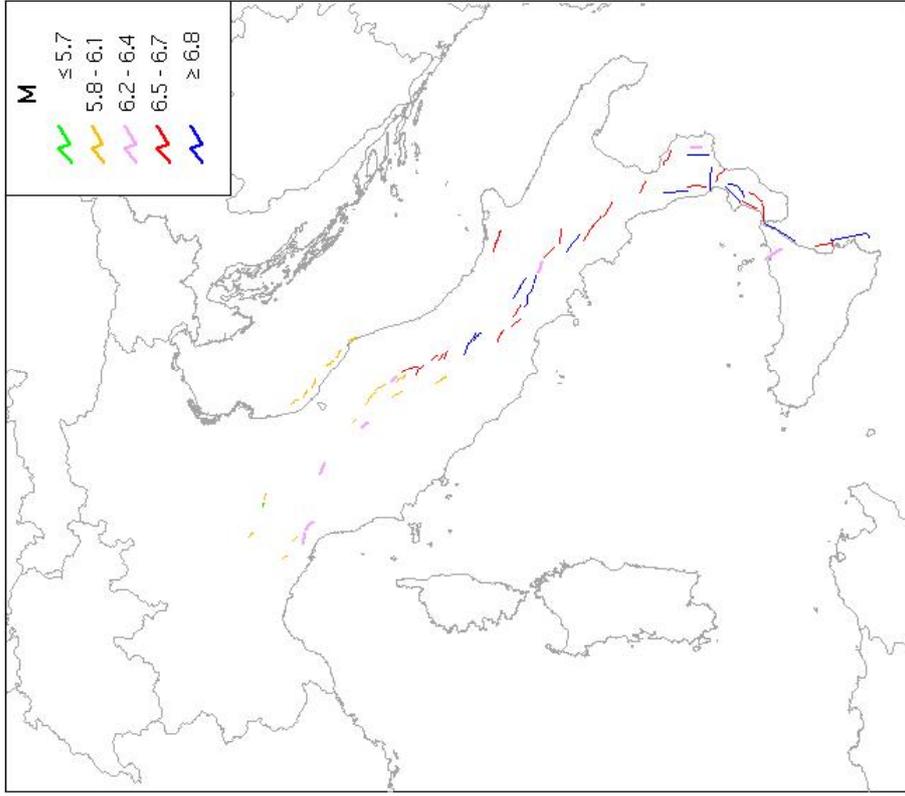


Fig. 2 - Carta delle sorgenti determinate con indagini di carattere geologico alle quali è stato associato almeno un evento del catalogo CPTI.

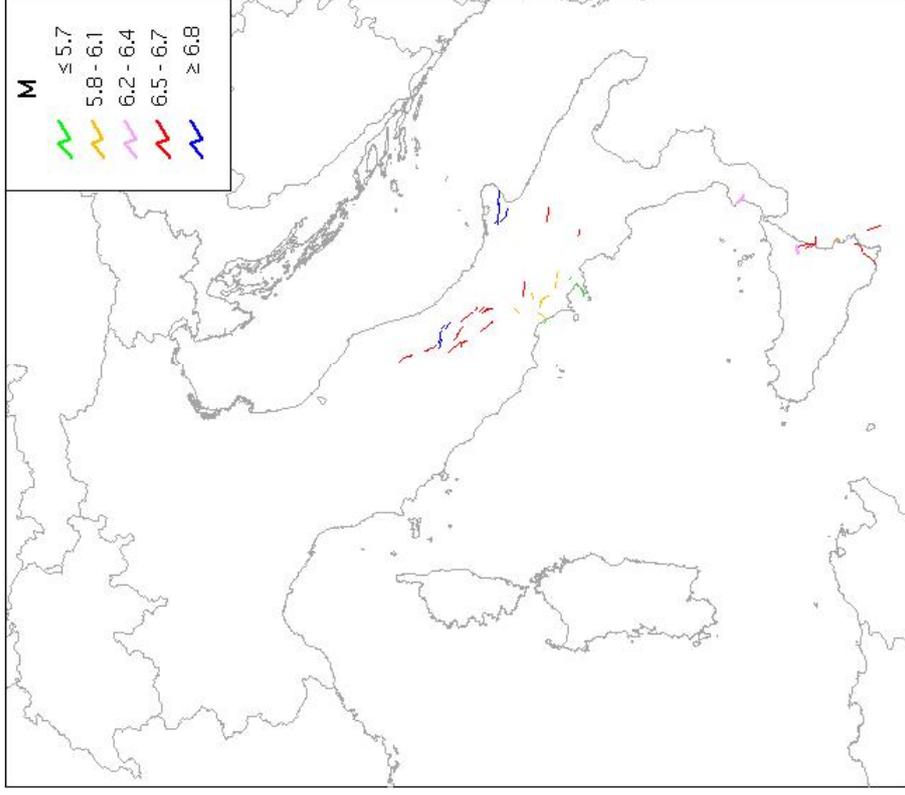


Fig. 3 - Carta delle sorgenti determinate con indagini di carattere geologico alle quali non è stato associato alcun evento del catalogo CPTI.

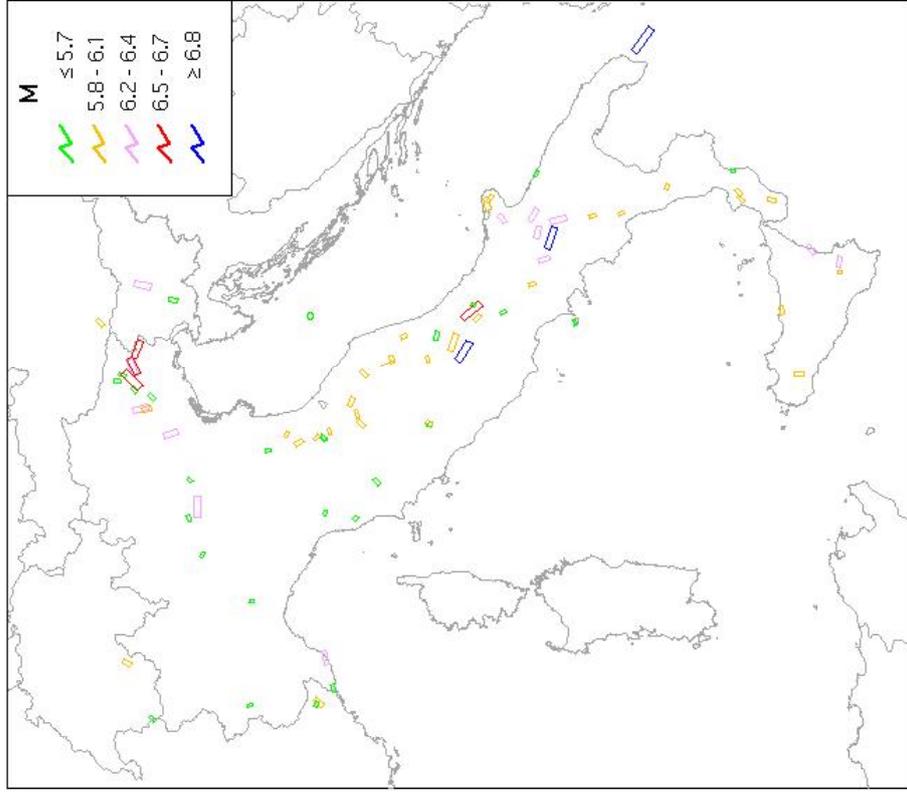


Fig. 4 - Carta delle sorgenti determinate a partire dai dati di intensità non essendo disponibili evidenze di tipo geologico.

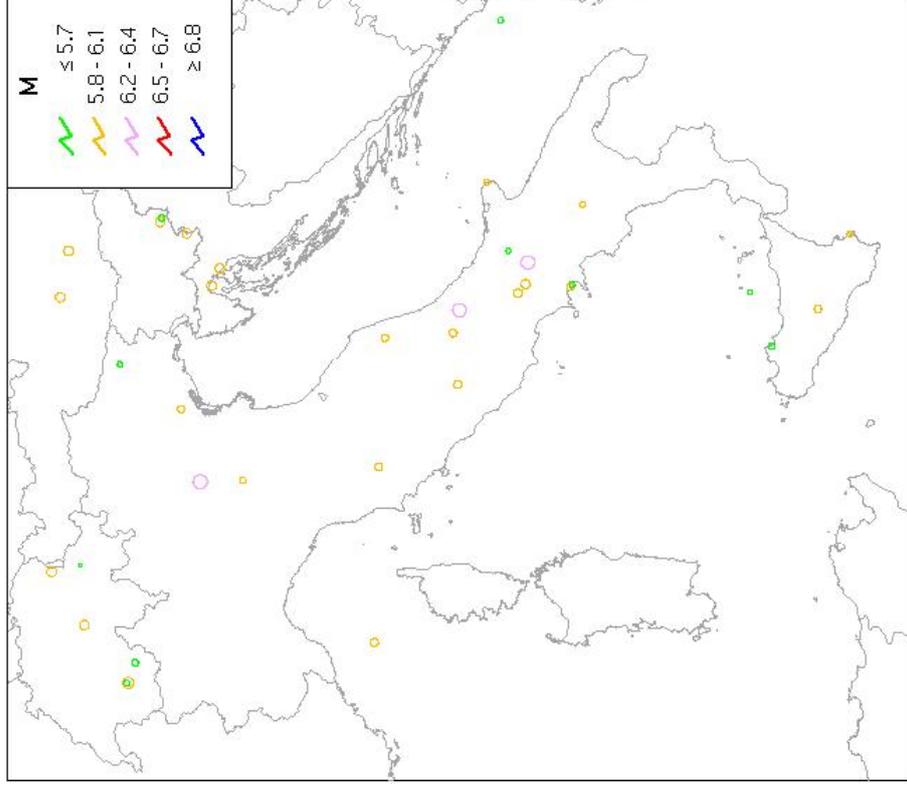


Fig. 5 - Carta delle sorgenti ipotetiche per gli eventi con scarsi o assenti dati di intensità.

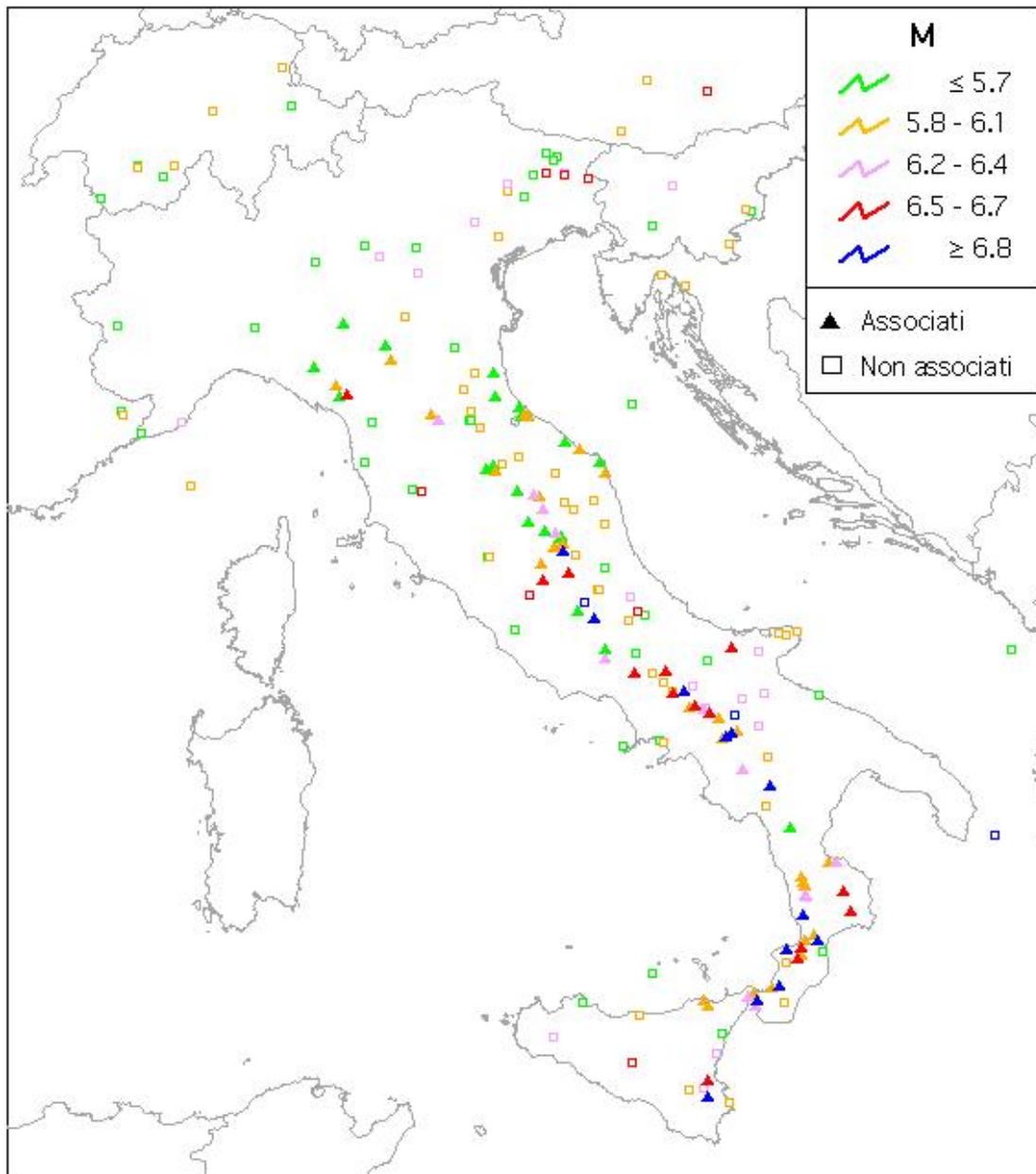


Fig. 6 – Mappa degli eventi del catalogo CPTI con $M \geq 5.5$. Il diverso simbolo indica gli eventi che sono stati associati o meno ad una sorgente individuata con l'indagine geologica. Il colore indica la classe di magnitudo

Nella classe con magnitudo maggiore o uguale a 6.8 sono 3 gli eventi non associati, vale a dire quelli del: 1743, Canale di Otranto; 1349, Italia centrale; 1930, Irpinia. Nel primo caso la ragione è ovvia: si tratta di una sorgente in mare, individuabile solo da prospezione geofisica; nel secondo caso il terremoto è molto complesso e le informazioni non consentono di vincolarlo ad una struttura ben definita; nel caso del 1930 l'evento è ben definito dai suoi dati di intensità e proprio questo è il motivo per cui si ritiene che non possa

essere associato ad una delle faglie dell'inventario del Progetto 5.1.2, in quanto sembra differire - per caratteristiche, area di massimo di danneggiamento e suo allungamento secondo una direzione preferenziale - da tutti gli altri terremoti dell'Appennino meridionale.

Va anche detto che il procedimento di associazione tra faglie e terremoti, proprio perché non facilmente formalizzabile e comunque soggetto a molti interventi di "giudizio esperto", richiede sicuramente in futuro un riesame e una revisione di alcune scelte fatte in questa sede.

3.2 L'analisi delle sorgenti e la costruzione della relativa tabella

Definito il set delle sorgenti potenziali dei terremoti con $M \geq 5.5$, ognuna di queste è caratterizzata da una magnitudo massima attesa. Mentre nel caso delle sorgenti determinate con Boxer la magnitudo è ovviamente quella assegnata al terremoto dal catalogo CPTI, per le sorgenti determinate con strumenti di indagine di tipo geologico la magnitudo attesa è legata alle sue dimensioni. In particolare, il problema si è posto per i sistemi costituiti da più faglie. Infatti le magnitudo corrispondenti alle singole faglie risultano ovviamente più basse della magnitudo attesa per una rottura che interessa tutto il sistema. In termini di stima della pericolosità sapere se la prossima probabile rottura interesserà tutto un sistema o solo una sua porzione ha un'importanza determinante.

L'esigenza di compiere questa analisi nasce anche dalla recente esperienza della sequenza che nel settembre-ottobre 1997 ha colpito Umbria e Marche. A titolo di esempio analizziamo proprio il sistema di faglie individuato nella regione di Colfiorito e al quale sono stati associati gli eventi del 1279, forse quello del 1838 e la sequenza del 1997, pur non contenuta nel catalogo CPTI; tale sistema darebbe luogo ad un terremoto con magnitudo di quasi 6.6 se si dovesse rompere per tutta la sua lunghezza (stimata in circa 20 km). Le singole faglie/segmenti (che arrivano al massimo ad una lunghezza di 10 km) darebbero origine ad una magnitudo massima di 6.2, valore che appare più verosimile se confrontato con i dati storici disponibili.

In altri casi invece abbiamo un'unica faglia di lunghezza tale da avere una magnitudo stimata molto più elevata di quella osservata in occasione di terremoti storici. Uno di questi casi è rappresentato dal sistema del Vallo di Diano, numero 86b dell'inventario di Galadini et al. (2000, in questo volume), e caratterizzato da una lunghezza di oltre 43 km, cui sarebbe associata una magnitudo di oltre 7. Il massimo evento dell'area che è stato associato a questa faglia è quello del 1561 con una magnitudo di 6.45 nel valore più basso fra quelli forniti da CPTI. Inoltre le evidenze geologiche e geofisiche non sono tali da far ipotizzare un'evoluzione del sistema per eventi con $M > 7$. Si è pertanto proceduto a suddividere la faglia (sulla base di indicazioni di carattere geologico) in due segmenti rispettivamente di 25 e 16 km circa cui è stata assegnata una magnitudo di 6.7 e 6.45.

In modo analogo si è proceduto con le box, relativamente alle magnitudo determinate dall'algoritmo Boxer sulla base delle intensità delle località contenute nel piano quotato. In un certo numero di casi (poco più del 25%) si è osservato come la magnitudo di Boxer risultasse sensibilmente più elevata di altri valori di magnitudo del catalogo CPTI, stimate

con altre procedure; si è scelto quindi uno degli altri valori, con preferenza per la magnitudo strumentale quando disponibile.

Il risultato di questo tipo di considerazioni ha portato alla definizione della struttura finale della tabella/inventario delle sorgenti (in numero complessivo di 200) costituita da tre parti (Tab. 2):

- informazioni sulle sorgenti. Sono riportate nella parte sinistra della tabella e consistono in: nome del sistema di faglie o tipo di sorgente determinata con altri metodi che non siano il rilevamento geologico; tipo di movimento lungo la faglia, sua lunghezza e magnitudo ricavata con le relazioni di Wells e Coppersmith. Per i sistemi costituiti da più faglie le informazioni sono relative ad ognuna di queste;
- informazioni sui terremoti. Sulla parte destra della tabella sono riportati i dati relativi agli eventi che sono stati associati alle sorgenti; rispetto all'intero record del catalogo CPTI si sono mantenute le informazioni fondamentali che individuano l'evento. Nel caso di più eventi associati ad una stessa faglia questi sono elencati in successione. In questa parte della tabella sono state inserite le informazioni disponibili sui paleoterremoti con il relativo riferimento bibliografico;
- informazioni sulle magnitudo assegnate. Nella parte centrale della tabella sono contenute le informazioni sulle lunghezze delle sorgenti e sulle relative magnitudo. Per i sistemi costituiti da un'unica faglia questi parametri coincidono con la parte sinistra della tabella; per i sistemi costituiti da più faglie, invece, la lunghezza qui riportata è la lunghezza complessiva del sistema e la magnitudo che le compete; per le sorgenti non definite, cioè quelle rappresentate da cerchi, viene indicata la lunghezza della rottura ricavata sulla base della magnitudo. Un'ulteriore colonna in questa parte della tabella riporta per ogni sorgente la magnitudo "assegnata" al sistema: come descritto in precedenza, questa in molti casi coincide con il valore che deriva dalla lunghezza della faglia o dalla magnitudo dell'evento per il quale è stata generata la box, ma in altri casi si è ritenuto di dover intervenire per assegnare un valore più basso. Il tipo di criterio adottato per questo tipo di intervento è stato codificato ed è pure riportato in tabella.

La Tabella 2 mostra uno stralcio del file in cui sono riportate sorgenti e relativi eventi del catalogo storico con $M \geq 5.5$. Sono stati scelti alcuni casi significativi di situazioni tipo, brevemente descritte nel seguito.

Alla sorgente n. 46 (Equi Terme) sono stati associati 2 eventi (1837 e 1920); il 1920 è stato associato anche alla sorgente n. 47 (costituita da 2 faglie), essendo il danneggiamento di questo evento esteso dalla Lunigiana fino alla Garfagnana: per questa seconda sorgente si è ritenuto che la massima magnitudo attesa possa essere generata da una rottura che interessa entrambe le porzioni del sistema. La n. 91 rappresenta una sorgente sepolta del fronte compressivo dell'Arco Appenninico

Progr.	Nome sistema	Tipo	Lungh. faglia	M faglia	Lungh. sistema	M sist.	M ass.	Cod.	Nrec	ANNO	MESE	GIORNO	AE	NP	IO	ME	MM	MS	MA
46	Equi Terme	N	14.7	6.40	14.7	6.40	6.40	°	819	1837	4	11	ALPI APUANE	50	95	530	630	0	551
47	Garfagnana Sud	N	5.0	5.79	13.7	6.36	6.36	°	1708	1920	9	7	Garfagnana	640	95	645	630	650	648
		N	7.4	6.01					1708	1920	9	7	Garfagnana	640	95	645	630	650	648
91	Sorgente attiva sepolta	R	12.1	6.10	12.1	6.10	6.10	°	1847	1930	10	30	SENIGALLIA	263	90	585	600	600	594
100	Campo Felice- ColleCerasitto/ Ovindoli-Pezza	N	12.0	6.28	20.0	6.58	6.58	°	}	<i>dopo 860 d.C.</i>									
		N	10.2	6.19						<i>ca. 1900 a.C.</i>									
		U	13.4	6.35						<i>pre-ca. 5000 a.C.</i>									
108	<i>Sorgente non definita</i>				18.9	6.30	6.30	°	13	101	0	0	S. Valentino in Ab.	1	95	0	630	0	630
109	<i>Sorgente da Boxer</i>					6.67	6.67	°	445	1706	11	3	Maiella	99	95	667	630	0	660
110	M.Morrone	N	19.4	6.56	19.4	6.56	6.56	°											
160	Vallo di Diano	N	25.0	6.71	43.3	7.02	6.70	•	256	1561	8	19	Vallo di Diano	30	95	645	630	0	636
			16.1	6.45															
199	<i>Sorgente da Boxer</i>					7.08	6.90	*	520	1743	2	20	Basso Ionio	77	95	708	630	0	690

Tab. 2 – Stralcio di alcune porzioni della tabella di associazione tra sorgenti sismogenetiche e terremoti. I parametri in essa contenuti sono: numero progressivo della sorgente; nome assegnato al sistema; tipo di movimento lungo la faglia (N-normal; R-reverse; S-strike-slip; U-undefined); lunghezza della singola faglia e magnitudo di pertinenza; lunghezza del sistema e magnitudo di pertinenza; magnitudo assegnata alla sorgente; codice di assegnazione della magnitudo (°=coincidente con la magnitudo del sistema; •=assegnata sulla base di considerazioni geologiche; * = assegnata sulla base di considerazioni sismologiche); parametri del catalogo CPTI. Per la spiegazione della tabella si veda il testo.

settentrionale alla quale è stato associato l'evento del 1930 di Senigallia. La sorgente n. 100 (costituita da 3 faglie) viene da indagini geologiche; gli studi di paleosismologia hanno rinvenuto evidenze di 3 paleoterremoti. Tuttavia, non si hanno nel catalogo storico eventi che possano essere ricondotti a questa struttura; la magnitudo associata alla sorgente è quella che deriva dalla lunghezza dell'intero sistema ed è paragonabile a quella stimata per i paleoterremoti. La sorgente 108 appartiene alla categoria delle sorgenti non definite, nel senso che l'unico dato di intensità del terremoto dell'anno 101 non consente una sua definizione e pertanto la sorgente viene rappresentata da un cerchio avente diametro di 18.9 km e centrato sulle coordinate epicentrali; la dimensione è dedotta dalla magnitudo applicando le relazioni di Wells e Coppersmith (1994). Per l'evento del 1706 che ha colpito la regione della Maiella è stata definita, con l'algoritmo Boxer, una sorgente (n. 109) corrispondente in dimensioni alla magnitudo che è stata valutata per questo evento. Nel caso della struttura di Monte Morrone (sorgente n. 110) si hanno evidenze di attività recente della faglia ma non si hanno eventi storici che abbiamo interessato l'area (questa è una delle strutture rappresentate in Figura 3). La sorgente 160 del Vallo di Diano è stata associata al terremoto del 1561; questo però è legato alla attivazione di un solo segmento del sistema. Si è ritenuto che questo sia uno dei casi in cui il sistema non si rompa contemporaneamente per la sua intera lunghezza e la massima magnitudo attesa è stata ridotta alla magnitudo che deriverebbe dalla rottura del segmento più lungo (il simbolo nella colonna Cod. indica questo tipo di considerazione basata prevalentemente su base geologica). L'ultimo esempio che viene riportato in tabella 2 è quello relativo all'evento del 1743 per il quale l'algoritmo Boxer ha valutato una magnitudo di 7.08: essendo questo un evento particolare con epicentro nel Canale di Otranto e che ha interessato le due coste opposte dell'Adriatico, si è ritenuto che questa magnitudo potesse essere sovrastimata e quindi è stata assegnata alla sorgente una magnitudo uguale al valore di M_a nel catalogo (questo tipo di considerazione basata su evidenze sismologiche è pure rimarcata nella colonna Cod. della tabella).

La figura 7 è la rappresentazione cartografica degli sorgenti che costituiscono l'inventario. Le linee si riferiscono a strutture geologiche individuate con il rilevamento geologico o la prospezione geofisica. I rettangoli sono le box prodotte dall'algoritmo Boxer (sono cioè la proiezione sulla superficie della rottura), mentre i cerchi sono le ipotetiche sorgenti per quegli eventi i cui dati di intensità non hanno consentito di ricavare l'immagine della sorgente. I colori indicano la massima magnitudo attesa per ogni sorgente in base alla definizione di una serie di classi di magnitudo ritenute significative. Le figure 8 e 9 sono due ingrandimenti della stessa carta appoggiata sulla base cartografica del modello di elevazione del terreno.

4 Conclusioni

Il presente lavoro ha consentito la predisposizione di un inventario speditivo delle sorgenti per terremoti con magnitudo maggiore o uguale a 5.5. Molte sono state le approssimazioni che forzatamente sono state adottate per arrivare ad un documento di primo livello che coprisse l'intero territorio nazionale. Allo stesso modo si è ricorsi spesso a scelte guidate in larga misura dal "giudizio esperto" che, come tale, è difficile da esplicitare

compiutamente; parte di queste scelte sono state descritte nel testo in modo da chiarire il tipo di problemi incontrati.

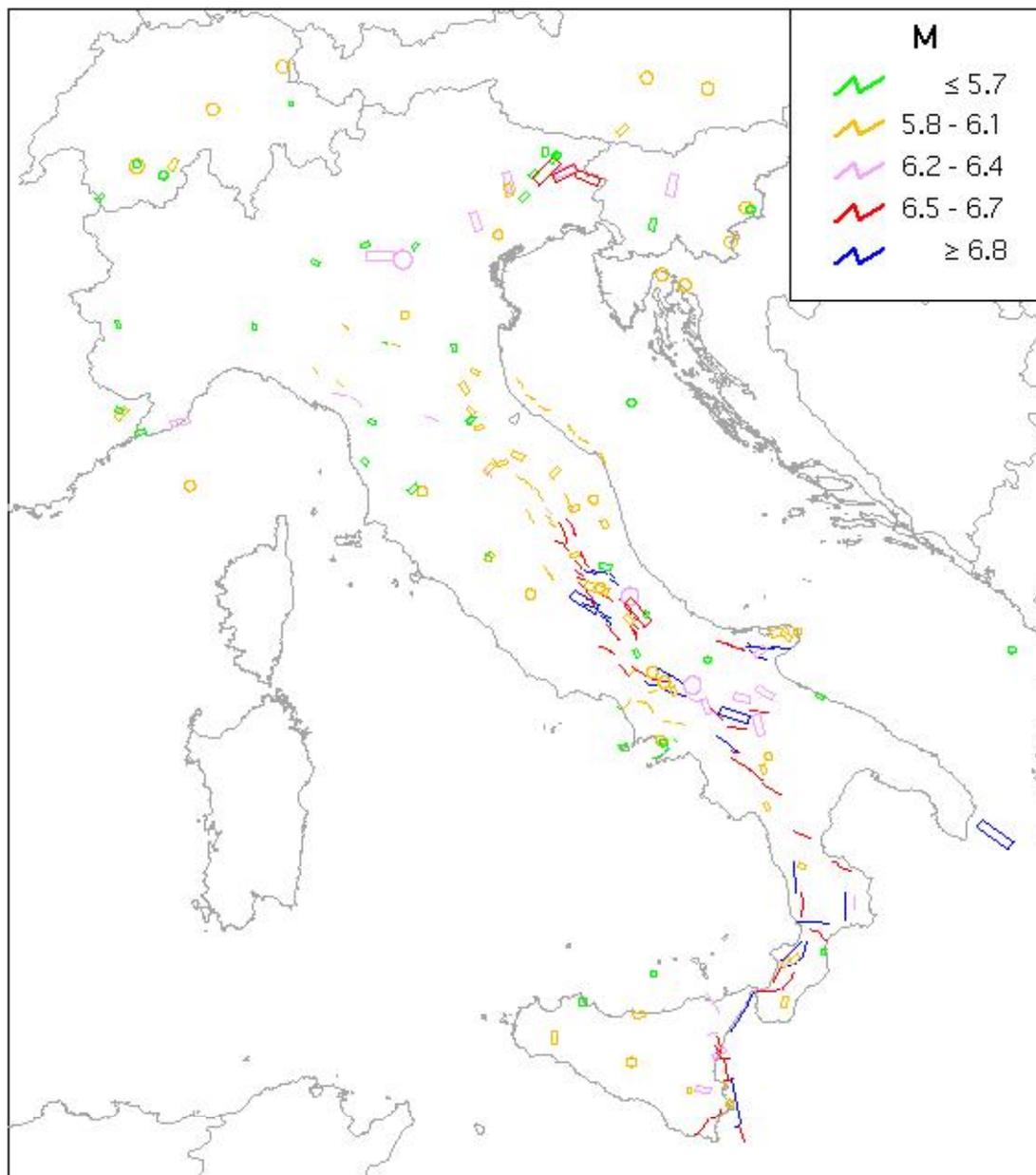


Figura 7 – Carta delle sorgenti potenziali di terremoti con $M \geq 5.5$ per l'area italiana.

Sicuramente il risultato finale è molto lontano da essere considerato esaustivo, ma rappresenta a nostro avviso uno strumento per raggiungere gli obiettivi del Progetto 5.1.1 (nuova zonazione sismogenetica). Inoltre, il contenuto informativo dei dati considerati da

questo lavoro è certamente molto maggiore di quanto sia stato elaborato in questo documento.

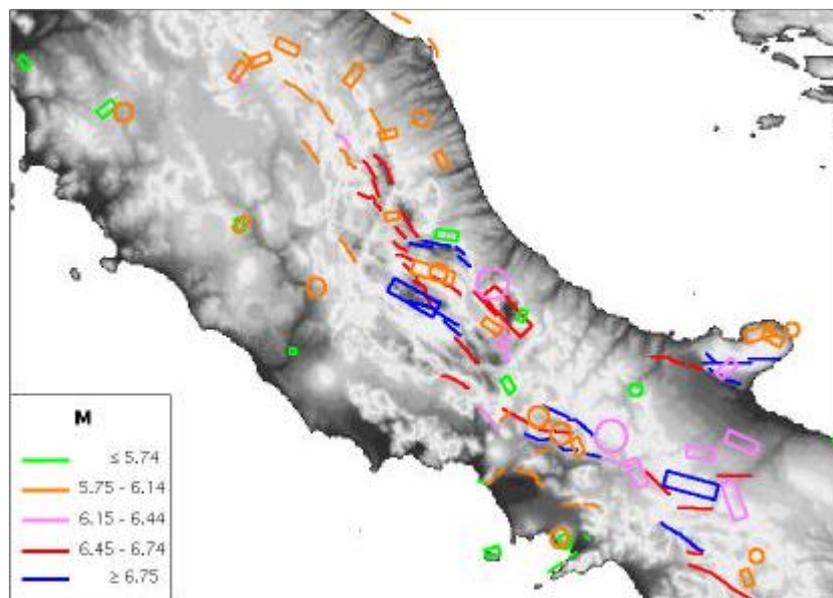


Figura 8 – Dettaglio della carta delle sorgenti relativo all'Italia centro-meridionale.

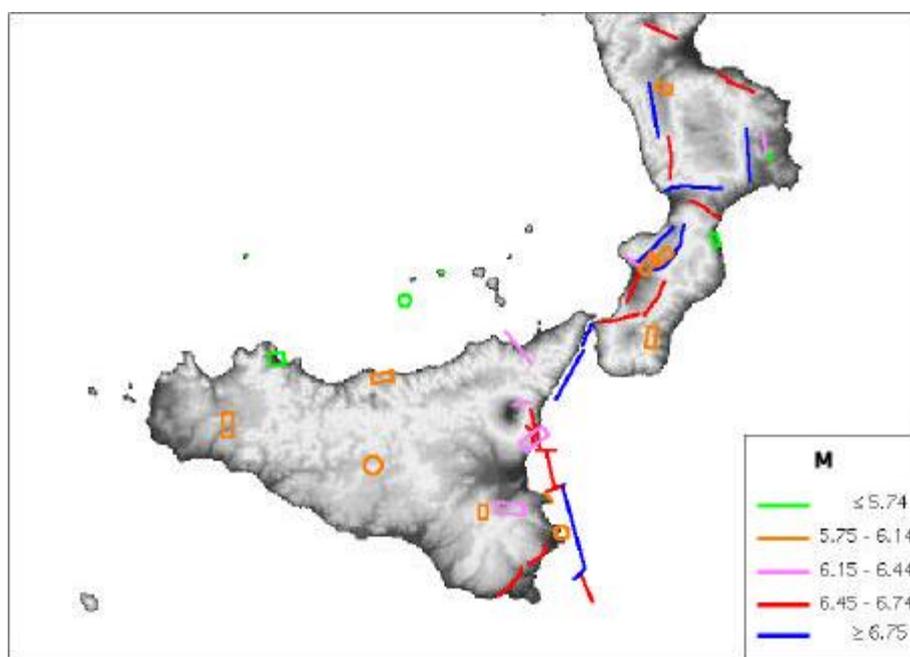


Figura 9 – Dettaglio della carta delle sorgenti relativo a Calabria e Sicilia.

Complessivamente, su 201 eventi che in catalogo hanno almeno una magnitudo che eguaglia o supera 5.5 e che pertanto costituivano il nostro set di riferimento, per 85, equivalente a poco più del 40%, è stato possibile ipotizzare una associazione con una struttura geologica riconosciuta attiva. Queste strutture sono concentrate geograficamente nelle aree dell'Italia centrale e meridionale laddove più sviluppate sono state in passato indagini sulle faglie attive. Questa considerazione fa presupporre che una maggiore attenzione dei geologi verso le aree oggi scoperte possa portare ad un miglioramento sostanziale della carta.

Un aspetto che merita grande attenzione è quello relativo alle faglie riconosciute per via sperimentale come sicuramente attive e alle quali non viene attualmente associato alcun evento del catalogo CPTI (Fig. 3).

Se infatti si ritengono corrette le indicazioni delle indagini geologiche di superficie, si pone il problema di capire se la mancata associazione a eventi noti sia dovuta ad una lacuna del catalogo che non ha individuato terremoti disastrosi nell'area o sia dovuta al fatto che la finestra temporale di osservazione del catalogo è tale da non coprire l'intervallo temporale corrispondente al tempo di ricorrenza di eventi con elevata magnitudo. E' evidente come dal punto di vista della pericolosità sismica le due ipotesi possano avere implicazioni di segno opposto.

Bibliografia

- Aoudia K., Suhadolc P. (2000): Il terremoto del 6 maggio 1976 e la tettonica attiva in Friuli. In questo volume.
- Azzaro R. (1999): Earthquake surface faulting at Mount Etna volcano (Sicily) and implications for active tectonics. *Journal of Geodynamics*, **28**, 193-213.
- Barchi M., Galadini F., Lavecchia G., Messina P., Michetti A.M., Peruzza L., Pizzi A., Tondi E., Vittori E. (a cura di) (2000): Sintesi delle conoscenze sulle faglie attive in Italia Centrale: parametrizzazione ai fini della caratterizzazione della pericolosità sismica. *CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, Roma, 62 pp.
- Basili R., Bosi V., Galadini F., Galli P., Meghraoui M., Messina P., Moro M., Sposato A. (1998): The Colfiorito earthquake sequence of September-October 1997: surface breaks and seismotectonic implications for the Central Apennines (Italy). *Journal of Earthquake Engineering*, **2**, 291-302.
- Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smriglio G., Valensise G. (eds.) (1995): Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980. *ING-SGA*, Bologna, 970 pp.
- Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Valensise G., Gasperini P., (eds.) (1997): Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990. *ING-SGA*, Bologna, 644 pp.
- Cello G., Deiana G., Mangano P., Mazzoli S., Tondi E., Ferrelì L., Maschio L., Michetti A.M., Serva L., Vittori E. (1998): Evidence for surface faulting during the september 26, 1997, Colfiorito (Central Italy) earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, **2**, 1-22.
- Cinti F.R., Cucci L., Marra F., Montone P. (1999): The 1997 Umbria-Marche (Italy) earthquake sequence: relationship between ground deformation and seismogenic structure. *Geophysical Research Letters*, **26**, 895-898.

- Cinti F.R., Cucci L., Pantosti D., D'Addezio G., Meghraoui M. (1997): A major seismogenic fault in a "silent area": the Castrovillari fault (southern Apennines, Italy). *Geophysical Journal International*, **130**, 595-605.
- Gruppo di Lavoro CPTI (1999): Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, *ING, GNDT, SGA, SSN*, Bologna, 92 pp.
- Monachesi G., Stucchi M. (1997): DOM4.1, un database di osservazioni macrosismiche di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. *Rapporto tecnico, GNDT*, 1052 pp. Internet, <http://www.emidius.itim.mi.cnr.it/DOM/home.html>.
- Finetti I., Del Ben A. (1995): Fagliazioni nell'area dello Stretto. In: *Il ponte sullo Stretto: la geosismotettonica. Stretto di Messina S.p.A.*, Brochure no.10, Roma: 39-45.
- Galadini F., Meletti C., Vittori E., 2000. Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie. In questo volume.
- Gasparini P., Bernardini F., Valensise G., Boschi E. (1999): Defining seismogenic sources from historical felt reports. *Bull. Seism Soc. Am.*, **89**, 94-110, 1999.
- Hirn A., Nicolich R., Gallart J., Laigle M., Cernobori L. (1997): Roots of Etna volcano in faults of great earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, **148**: 171-191.
- Meletti C., Patacca E., Scandone P., 2000. Construction of a seismotectonic model: the case of Italy. *Pageoph*, **157**, 11-35.
- Michetti A. M., Ferrelì L., Serva L., Vittori E., 1997. Geological evidence for strong historical earthquakes in an "aseismic" region: the Pollino case (southern Italy). *Journal of Geodynamics*, **24**, 67-86.
- Pantosti D., Valensise G. (1995): Investigating active faulting in Italy. In: *Proc. of the International School of Solid Earth Geophysics*, 11th course: "Active faulting studies for seismic hazard assessment", Erice, 27/9-5/10/1995, 16 pp.
- Peruzza L. (a cura di) (1999): Progetto MISHA. Metodi Innovativi per la Stima dell'Hazard: applicazione all'Italia Centrale. *CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, Roma, pp. 176
- Sirovich L. (1996): A simple algorithm for tracing out synthetic isoseismal *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 1019-1027
- Sirovich L., Pettenati F., Bobbio M. (2000): Inversione di intensità macrosismiche per le faglie di terremoti storici. In questo volume.
- Sirovich L., Pettenati F., M. Bobbio (1999): Inversione di piani quotati macrosismici di terremoti storici. Progetto 62a MISHA. In: Peruzza L. (a cura di): Progetto MISHA. Metodi Innovativi per la Stima dell'Hazard: applicazione all'Italia Centrale *CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, Roma, 88-106.
- Valensise G., Pantosti D. (1992): A 125 Kyr-long geological record of seismic source repeatability: the Messina Straits (southern Italy) and the 1908 earthquake (Ms 7½). *Terra Nova*, **4**, 472-483.
- Valensise G., Pantosti D. (eds) (2000): Database of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy. In stampa su *Quaderni di Geofisica*, con testo esplicativo e database completo su CD-ROM.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. (1994): Updated empirical relationships among magnitude, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 974-1002.