

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

Oggetto: PO Italia-Malta 2007-2013 – bando n°01/11 per progetti strategici - progetto
SIMIT –codice B1-2.19/11. CUP: G75J13000000006 CIG: 5546383Co8

*Costituzione di un sistema integrato di Protezione Civile Transfrontaliero Italo-Maltese --
- SIMIT --- WP2.1 ANALISI DEL RISCHIO BASATA SU SCENARI*

ELEBORAZIONE DI UN MODELLO REGIONALE DI ATTENUAZIONE IN FUNZIONE
DI MAGNITUDO E DISTANZA

INGV Gruppo di Lavoro⁽¹⁾

(1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma1, Roma

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

PREMESSA

1) Stato dell'arte

2) Data Set

3) Analisi Dati

4) Modellazione

5) Modello di attenuazione per la regione di studio

6) Spettri di sorgente

7) Termini di sito

8) Stime dei valori di picco del moto del suolo (PGA, PGV) e degli spettri di risposta in funzione della magnitudo e distanza

9) Validazione

10) Bibliografia

11) Allegati

12) Lista Abbreviazioni

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

Premessa

Seguendo quanto concordato tra l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e il Dipartimento di Protezione Civile della Regione Sicilia (DPCRS) nel contesto del Progetto Europeo "Costruzione di un Sistema Integrato di Protezione Civile Transfrontaliero Italo-Maltese" –SIMIT, durante la seconda parte del progetto è stato elaborato un modello regionale di attenuazione per la Sicilia e per le isole Maltesi, i cui risultati in funzione della distanza, forniti a diverse magnitudo e per diversi intervalli di frequenza, sono stati confrontati con i valori di picco di registrazioni accelerometriche disponibili nella zona. Il confronto sistematico con i dati accelerometrici ha permesso anche di verificare la validità dei valori usati nelle relazioni di attenuazione regionalizzate.

Allo scopo di studiare le caratteristiche dell'eccitazione e della propagazione delle onde sismiche nelle regione Siciliana, canale di Sicilia e le isole Maltesi, sono stati utilizzati circa 1968 eventi (sismogrammi di weak-motion), per un totale di 15955 forme d'onda, registrate durante gli anni 2006-2012 da 48 stazioni digitali a banda larga a tre componenti, gestite dall' *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)*. Sono stati usati soltanto eventi crostali, con profondità inferiore a 30 km, con distanza ipocentrale variabile tra 1 e 300 km, e magnitudo compresa tra 2.0 e 4.5. La distribuzione della sorgente-ricevitore per l'intero insieme dei dati è stata presentata in **figura 1**.

Prima di tutto, le velocità di picco sono misurate in bande di frequenza strette selezionate tra 0.25 e 20.0 Hz; una regressione sui picchi osservati è servita a definire una funzione regionale di attenuazione lineare a tratti, un insieme di termini di eccitazione, e un insieme di termini di risposta del sito. Poi i risultati vengono modellati attraverso la cosiddetta Random Vibration Theory, RVT (vedi [Cartwright](#) e [Longuet-Higgins 1956](#)). L'attenuazione crostale regionale è modellata con una funzione bilineare (nello spazio log-log)

$g(r)$ caratterizzata da una distanza di crossover a 100 Km: $g(r) \propto r^{-1.0}$ ($r < 100$ km);
 $g(r) \propto r^{-1.5}$ ($r > 100$ km). Un fattore di qualità dipendente dalla

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

frequenza, $Q(f) = 250 f_{ref}^{0.40}$ (in cui $f_{ref} = 1.0$ Hz), è accoppiato al coefficient di diffusione geometrica.

A causa del trade-off intrinseco dei parametri di eccitazione/attenuazione ($\Delta\sigma$ e κ), i loro valori specifici dipendono in larga misura dalla scelta fatta per lo stress drop dei terremoti più piccoli. Dopo aver scelto uno stress-drop di Brune ($\Delta\sigma_{Brune} = 2$ MPa a $M_w = 2.0$), siamo stati in grado di definire (1) un' alta frequenza efficace, parametro spettrale indipendente dalla distanza e magnitudo, $\kappa_{eff} = 0.05$ s e (2) un parametro di stress-drop dipendente della magnitudo, che aumenta con la magnitudo momento, da $\Delta\sigma_{Brune} = 2$ MPa per $M_w = 2.0$ a $\Delta\sigma_{Brune} = 25$ MPa per $M_w = 4.5$.

Il set di parametri qui menzionati possono essere utilizzati al fine di prevedere i movimenti attesi dai futuri terremoti nella regione che circonda la Sicilia e il Canale di Sicilia. I parametri ottenuti da tale studio serviranno per la creazione di scenari di scuotimento ai fini di pianificazione delle emergenze da parte della Protezione Civile Siciliana e Maltese. Inoltre i risultati potranno essere utilizzati per affinare le mappe di pericolosità della regione Sicilia sia per la creazione di una mappa di pericolosità sismica nazionale per l'arcipelago maltese.

1) Stato dell'arte

Uno degli strumenti cruciali per la valutazione della pericolosità sismica e per la costruzione di scenari di scuotimento è rappresentato dalle equazioni empiriche predittive del moto del suolo. La conoscenza del moto atteso in un dato sito in un arco di tempo corrispondente alla vita media prevista per le diverse strutture viene effettuata facendo ricorso a relazioni di attenuazione che in generale esprimono una particolare caratteristica del moto del suolo in funzione della magnitudo e della distanza della sorgente.

Comunemente le equazioni predittive del moto del suolo (*Ground Motion Predictive Equations*, GMPEs) permettono di stimare i parametri del moto sismico utilizzando modelli semplificati in cui gli effetti della sorgente sismica, della propagazione delle onde sismiche, e delle caratteristiche del sottosuolo di un dato sito vengono rispettivamente

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

rappresentati dalla magnitudo, da una misura della distanza, e dalla classificazione geotecnica e geologica del sito.

Numerose equazioni sono state proposte per una grande varietà di domini tettonici nella letteratura scientifica nazionale e internazionale. Una completa rassegna è stata pubblicata da Douglas (2002), che ha preso in considerazione un totale di 157 equazioni predittive in accelerazione sviluppate tra il 1969 e il 2002. Le relazioni empiriche predittive dell'accelerazione di picco del suolo più utilizzate sono quelle ricavate a partire da dati *strong-motion*, utilizzando procedure classiche di regressione (Boore, 1983; Toro and McGuire, 1987; Boore and Joyner, 1991; Atkinson and Boore, 1995; Ambraseys, 1996; Atkinson and Silva, 1997; Campbell, 1997; Sadigh, 1997). Recentemente sono state proposte GMPEs effettuando regressioni empiriche, nell'ambito del Pacific Earthquake Engineering Research Center's Next Generation Attenuation project (PEER NGA) (Power et al. 2006), su insiemi di dati contenenti migliaia di registrazioni accelerometriche (in maggioranza Californiane) provenienti da strutture attive superficiali. Per quando riguarda l'Europa, modelli empirici *strong-motion* (e.g. Ambraseys et al., 1996; Tromans and Bommer, 2002; Akkar and Bommer 2010), sono stati definiti utilizzando dati di partenza molto eterogenei. Questi ultimi comprendono accelerogrammi europei e del Medio Oriente, provenienti da domini tettonici molto diversi tra loro.

Le registrazioni *strong-motion* nel territorio italiano non sono molto numerose e per questo motivo nelle valutazioni di pericolosità sismica dell'Italia si sono usate prevalentemente relazioni di attenuazione che si basano su dati nazionali o europei. A partire dal 2006, INGV e DPC hanno dato luogo alla compilazione del database dei dati accelerometrici disponibili per l'Italia, prevalentemente derivanti dalla Rete Accelerometrica Nazionale (ITACA; <http://itaca.mi.ingv.it>). Tale database contiene un maggior numero di registrazioni e ha consentito la riparametrizzazione delle equazioni di Sabetta & Pugliese (Massa et al., 2009) e la definizione di un nuovo modello di attenuazione dello scuotimento del suolo (Bindi et al., 2008). Questi modelli sono però precedenti all'accadimento del terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009, che ha prodotto un

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

gran numero di registrazioni, per magnitudo e distanze dalla faglia che erano scarsamente rappresentate nel dataset precedente.

La scelta del tipo di GMPE da utilizzare può essere difficoltosa, in quanto esistono numerosi studi ed altrettante equazioni, che trattano il problema in modi molto differenti tra di loro. Solitamente, la scelta più semplice consiste nell'utilizzare equazioni che sono state ricavate a partire da dati acquisiti nell'area di interesse. Tale scelta non è, purtroppo, sempre possibile, in quanto spesso non è disponibile un numero sufficiente di dati per ottenere relazioni significativamente stabili da un punto di vista statistico.

Recentemente, diversi studi hanno anche dimostrato quanto diverse siano le caratteristiche dell'attenuazione in diversi regimi tettonici (Boore et al., 1997, Campell, 1997, Sadigh, et al., 1997, Atkinson and Silva, 1997, Spudich et al., 1999, Atkinson and Boore, 1995). Considerato che la penisola italiana è caratterizzata da situazioni tettoniche molto differenti, è chiara l'importanza della disponibilità di equazioni predittive per il moto del suolo derivate nelle principali province tettoniche in cui il territorio nazionale è suddiviso. Comunque per l'Italia non esiste un numero sufficiente di dati *strong-motion* per condurre tali studi. Per ovviare a questo inconveniente si è provveduto a verificare la possibilità di utilizzo GMPE determinate su un database regionale, a partire da registrazioni *strong-motion* e *weak-motion*, che forniscono ovviamente un campione di dati più consistente. Per questo motivo, riveste particolare interesse la possibilità di ricavare i parametri di scuotimento dalle GMPE che descrivono l'attenuazione crostale nelle diverse regioni italiane, derivate dall'analisi di registrazioni velocimetriche di terremoti regionali e/o locali di magnitudo piccola, intermedia ed alta (Malagnini et al., 2000a,b, 2002; Scognamiglio et al., 2003; Morasca et al. 2006; Malagnini et al., 2010). In tal modo, un approccio basato sull'utilizzo della sismicità di fondo può ovviare in parte alla mancanza di una mole sufficiente di dati *strong-motion* per tutte le regioni del Paese. Gli autori appena citati hanno utilizzato grandi quantità di dati provenienti dalla sismicità di fondo in aree il più possibile "omogenee". Per esempio, per quanto riguarda la regione italiana, Malagnini et al. (2002) hanno utilizzato i dati provenienti dalla rete sismometrica

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

digitale del Friuli-Venezia Giulia: 17200 forme d'onda selezionate, registrate durante 1753 eventi regionali, più tutti i dati *strong-motion* disponibili. Nelle Alpi occidentali, [Morasca et al. \(2003\)](#) hanno analizzato oltre 6000 sismogrammi da 446 eventi. Negli Appennini [Malagnini et al. \(2000\)](#) hanno usato circa 7500 sismogrammi da 957 eventi regionali.

Nelle precedenti valutazioni di pericolosità sismica fatte a scala europea (progetto GSHAP, [Giardini et al., 1999](#); progetto SESAME, [Jiménez et al., 2001](#)), ma principalmente in Italia (progetto GNDT, [Slejko et al. 1998](#); progetto GSHAP-ADRIA, [Slejko et al. 1999](#)), sono state usate le GMPEs in accelerazione di [Ambraseys 1995](#) e [Ambraseys et al., 1996](#). Mentre per valutazioni di pericolosità sismica a livello europeo la scelta di tali relazioni è diretta conseguenza della base di dati europea utilizzata, in Italia questa scelta è maturata in ambito GNDT sulla base di ragioni diverse. Rispetto alle GMPEs sviluppate a livello nazionale ([Sabetta e Pugliese, 1987](#); [Tento et al., 1992](#); [Sabetta e Pugliese, 1996](#)), le equazioni di [Ambraseys \(1995\)](#) e [Ambraseys et al \(1996\)](#), sono calibrate su una base di dati più ampia e possono essere applicate in un intervallo di magnitudo maggiore ([Slejko et al., 1999](#)). La carta di pericolosità prodotta dal Servizio Sismico Nazionale ([Romeo and Pugliese, 1998](#)) è stata calcolata usando la GMPE nazionale di [Sabetta and Pugliese \(1996\)](#), mentre la carta di consenso redatta congiuntamente dal Servizio Sismico Nazionale e dal GNDT ([Albarello et al., 2000](#)) rappresenta una media, calcolata assegnando uguale peso alla relazione di [Ambraseys et al. \(1996\)](#) e quella di [Sabetta and Pugliese \(1996\)](#).

La mappa di pericolosità sismica di riferimento per l'Italia (MPS04) ha utilizzato, combinandoli in una struttura ad albero logico, diversi modelli di attenuazione: [Sabetta & Pugliese \(1996\)](#), in quanto basata su dati italiani; [Ambraseys et al. \(1996\)](#) in quanto il modello più utilizzato in quel momento a scala europea; i modelli regionali elaborati su scala regionale da Malagnini e coautori.

I modelli finora esposti descrivono lo scuotimento del suolo in termini di accelerazione. Recentemente sono stati rilasciati anche in Italia modelli che descrivono l'attenuazione dello spostamento del suolo, anche per poter fornire la stima pericolosità sismica secondo un parametro che comincia ad essere utilizzato nella progettazione delle strutture. In Italia

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

è stato recentemente rilasciato il modello di [Cauzzi & Faccioli \(2008\)](#), che si basa però essenzialmente su dati registrati in Giappone e solo in parte su dati italiani.

In questo lavoro abbiamo utilizzato grandi quantità di dati provenienti dalla sismicità di fondo per determinare l'eccitazione e l'attenuazione del ground-motion nella regione Siciliana e le isole Maltesi.

In particolare, sono stati calcolati:

- la funzione regionale di attenuazione anelastica (funzione di spreading geometrico e fattore di qualità Q crostale medio);
- il parametro di stress dello spettro di Brune per i terremoti che avvengono entro la regione, e le sue variazioni con la magnitudo;
- il valore medio regionale del parametro che descrive l'attenuazione dovuta alla propagazione dell'energia negli strati più superficiali e nelle immediate vicinanze dei siti di registrazione;
- una forma funzionale che descriva l'andamento della 'durata' dello scuotimento del terreno al variare della distanza ipocentrale e della frequenza.
- Le stime teoriche dei valori di picco del moto del suolo in funzione della distanza ipocentrale utilizzando la '*Random Vibration Theory*'.

2) Data Set

Abbiamo utilizzato 48 stazioni a banda larga appartenenti alla Rete Sismica nazionale Italiana gestita da INGV che hanno registrato i terremoti tra 2006 e 2012. Le stazioni INGV sono equipaggiate con sismometri a larga banda con una risposta in velocità piatta tra 0,05 e 20 Hz e con una frequenza di Nyquist di 50 Hz. L'analisi di regressione è stata effettuata su più di 15955 forme d'onda per terremoti che variano in grandezza tra M_L 2.4 e 4.5. Le posizioni delle stazioni sismiche e degli eventi selezionati a distanze epicentrali tra 5 e 250 km sono mostrate in **Figura 1**. La **Figura 2** mostra la distribuzione delle forme d'onda per ogni stazione in funzione della distanza ipocentrale nell'intervallo tra 5 e 250 km.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile

Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

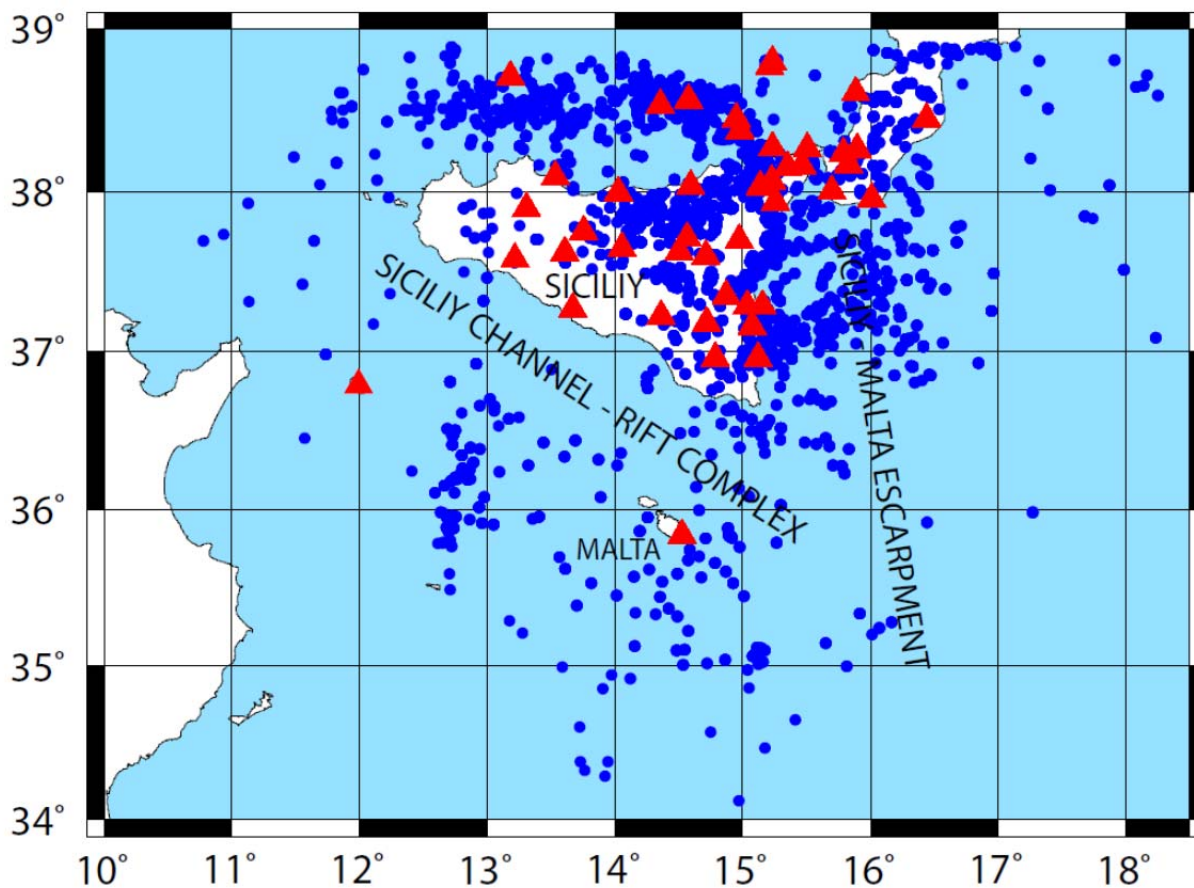


Figura 1 Mappa della regione di studio: localizzazione dei terremoti (blue dots) e localizzazione delle stazioni sismiche INGV (red triangles).

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Investing in your future!

www.italiamalta.eu



Sicily-Malta

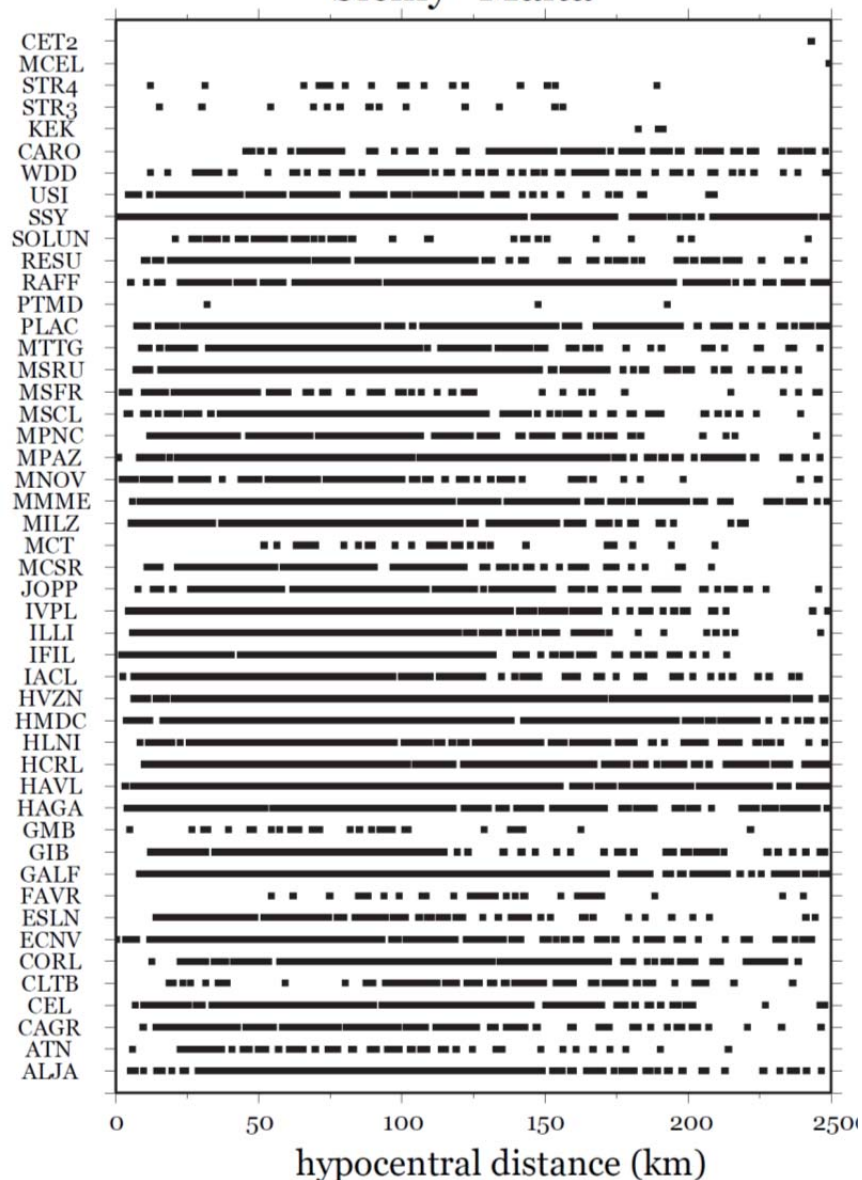


Figura 2 Distanza ipocentrale tra sorgente ed evento dei dati registrati dalla rete sismica nazionale INGV. L'asse orizzontale riporta la distanza ipocentrale espressa in km, mentre sull'asse verticale sono riportati i nomi delle stazioni sismiche presenti nell'area in esame.

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

3) Metodologia

Una procedura introdotta da Raof et al. (1999) e Malagnini, Herrmann, e Di Bona (2000) viene utilizzata per l'analisi. Questa tecnica è stata applicata con successo a varie regioni del mondo. Ad esempio, è stata utilizzata in Appennino (Malagnini e Herrmann, 2000 ; Malagnini, Herrmann, e Di Bona, 2000 ; Malagnini et al , 2008 , 2011), la zona della baia di San Francisco (Malagnini . et al , 2007 , le Alpi nord-orientali (Malagnini et al. , 2002), il bacino Kachchh , nella regione indiana (Bodin et al. , 2004 , le regioni Erzincan e Marmara della Turchia (Akinci et al. , 2001 , 2006), le Alpi nord-occidentali (Morasca et al. , 2006), la Sicilia orientale (Scognamiglio et al. , 2005), la Svizzera (Bay et al. , 2003), l'Europa centrale (Malagnini, Herrmann, e Koch, 2000), la California del sud (Raof et al. 1999), Israele (Meirova et al. , 2008), Taiwan (D ' Amico et al. 2012), e l'Anatolia occidentale (Akinci et al. , 2013). Questi studi hanno dimostrato che le relazioni dell'ampiezza con la distanza sono significativamente diverse da regione a regione, anche a brevi distanze dalla sorgente. Risultati di regressione possono essere utilizzati per la previsione dei movimenti del terreno in funzione della frequenza e distanza ipocentrale, così come per l'ampiezza dei picchi di accelerazione e velocità.

Per studiare la variazione di attenuazione dell'onda sismica con la frequenza nella regione attorno al Canale di Sicilia, ogni traccia viene ispezionata visivamente, e vengono letti i tempi di arrivo delle onde P e S. Successivamente le onde vengono, di volta in volta, filtrate in una bande centrale intorno a 14 differenti frequenze centrali, f_c (0.25, 0.40, 0.60, 0.85, 1.25, 1.75, 2.5, 3.5, 5.0, 7.0, 9.0, 12.5, 17.5, e 20.0Hz), mediante l'uso congiunto di un filtro passa-basso Butterworth a 8 poli e di un filtro passa-alto Butterworth a 8 poli, le cui rispettive frequenze di taglio sono state fissate a $f_c / \sqrt{2}$ e $\sqrt{2} f_c$. La combinazione di filtri Butterworth qui utilizzata produce un segnale filtrato con contenuto in frequenza vicino alla frequenza centrale del filtro.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11





Le regressioni sono stimate nel dominio del tempo sulle serie temporali $(A_{ij}(f_c, r_{ij}) = \log_{10}(\text{peak}(a(f_c, r_{ij}))))$, dove $\text{peak}(a(f_c, r_{ij}))$ e' il valori di picco di velocita' della serie temporale filtrata intorno alla frequenza f_c al sito j -th durante l'evento i -th. I dati sono espressi in forma matriciale ad ogni frequenza di campionamento. La forma matriciale risulta dal seguente schema:

$$A_{ij}(f_c, r_{ij}) = \text{EXC}_i(f_c, r_{\text{ref}}) + \text{SITE}_j(f_c) + D(r_{ij}, r_{\text{ref}}, f_c) \quad (1)$$

dove r è la distanza ipocentrale tra la sorgente e l'evento, $A_{ij}(f_c, r_{ij})$ rappresenta il picco d'ampiezza del moto del suolo (in velocita'), $\text{EXC}_i(f_c, r_{\text{ref}})$ e $\text{SITE}_j(f_c)$ rappresentano rispettivamente il termine di sito e di sorgente, $D(r_{ij}, r_{\text{ref}}, f_c)$ è il termine di attenuazione regionale, che include gli effetti dello spreading geometrico e attenuazione anelastica, r_{ref} è una distanza ipocentrale arbitraria di riferimento che è necessaria per ridurre i gradi di libertà del sistema. Nel presente studio è usata una matrice (1) con le seguenti frequenze centrali: 0.25, 0.4, 0.6, 0.85, 1.25, 1.75, 2.5, 3.5, 5.0, 7.0, 9.0, 12.5, 17.5 e 20.0 Hz.

Durante le regressioni, i gradi di libertà del sistema sono ridotti e la stabilità viene introdotta imponendo i seguenti vincoli:

- 1) Il termine di propagazione è normalizzato a zero ad una distanza specifica di riferimento. Abbiamo selezionato $r_{\text{ref}} = 40$ km al fine di facilitare i confronti con i risultati di studi analoghi altrove in Italia ([Scognamiglio et al., 2005](#); [Malagnini et al., 2001](#)). Questo vincolo è formalmente definito come segue:

$$D(r = r_{\text{ref}}, f_c) = 0; \quad r_{\text{ref}} = 40 \text{ km} \quad (2)$$

La distanza di riferimento r_{ref} è selezionata per essere all'interno delle distanze osservate; dovrebbe essere abbastanza lontana dalla sorgente, ma non così lontano da prevedere riflessioni super-critiche dalla Moho.

- 2) La somma dei termini del sito in tutte le componenti orizzontali disponibili viene forzato a zero; la durata media "assoluta" del sito (vedi [Malagnini et al., 2004](#)) è mappata nel termine di $\text{EXC}_i(f_c, r_{\text{ref}})$. Questa è la ragione per cui questa funzione viene chiamata come termine di eccitazione dei dati osservati, piuttosto che come

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

termine di origine assoluta. I termini $EXC_i(f_c, r_{ref})$ rappresentano il livello del moto del suolo atteso a r_{ref} , presso il sito media della rete.

Il termine di propagazione $D(r_{ij}, r_{ref}, f_c)$, è descritto come una funzione continua a tratti con N_{nodi} :

$$D(r, r_{ref}, f_c) = \sum_{m=1}^{N_{nodi}} L_m(r) D_m \quad (3)$$

dove $L_m(r)$ è una funzione di interpolazione lineare, e D_m è il valore della funzione di attenuazione ad una distanza ipocentrale. I nodi sono impostati a distanze fisse (approssimativamente) scelti per campionare uniformemente l'insieme di dati. Il termine di propagazione $D(r, r_{ref}, f_c)$ è soggetto ad uno smoothing; nel caso di nodi linearmente ed uniformemente distanziati, lo smoothing definisce un vincolo di minima rugosità, cioè, una derivata seconda nulla. Le regressioni effettuate a tutte le frequenze centrali producono i seguenti termini:

$EXC_i(f_c, r_{ref})$, $SITO_j(f_c)$ e $D(r, r_{ref}, f_c)$.

Un' inversione normalizzata in L_1 viene attuata per tutte le fasi della regressione (Bartels e Conn, 1980), in modo che la regressione sia molto meno sensibile ai grandi valori anomali rispetto ai minimi quadrati.

Le **Figure 3-5** mostrano i risultati della regressione. Oltre a misurare il valore di picco della serie ogni volta filtrata, la durata del segnale effettivo (T) è stato determinato come finestra temporale che comprende il 5% al 75% dei limiti di energia che segue l'arrivo dell'onda S (Malagnini et al, 2000a). La **Figura 6** mostra le durate osservate in funzione della distanza di sei bande di frequenza. La curva di regressione mostra inoltre le barre di errore. La durata misurata sarà utilizzata nelle regressioni effettuate sulle ampiezze di picco.

4) Modellazione

Lo scopo della modellazione è quello di caratterizzare i risultati di regressione in termini di attenuazione geometrica, anelastica $Q(f)$, fattori di scala per la sorgente sismica, ed effetti

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11





di sito. Data l'ampiezza spettrale e la durata del segnale, la Random Vibration Theory (RVT, [Cartwright e Longuet-Higgins, 1956](#)) e / o simulazioni stocastiche ([Boore, 1983](#); [Boore e Joyner 1984](#)) possono essere utilizzate per stimare i valori di picco osservati: accelerazione, velocità, spettri di risposta. Il teorema di Parseval può essere utilizzato per passare dal dominio del tempo a quello della frequenza, e il teorema di convoluzione può quindi essere utilizzato per scrivere la forma matriciale per l'inversione lineare (equazione 1).

In sintesi, per una serie temporale casuale di lunghezza T', la "Random Vibration Theory" produce un valore di picco:

$$Peak(a(t)) \approx \xi a_{RMS} \quad (4)$$

dove a_{RMS} è la media RMS della serie temporale di lunghezza T', dal momento dell'arrivo delle onde S. Il parametro $\xi = \xi(m_0, m_2, m_4)$ è una funzione dei momenti spettrali

$$m_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \omega^n |\hat{a}(\omega)|^2 d\omega]$$

L'azione di filtraggio eseguita dal filtro passa-banda rende le ampiezze di Fourier diverse da zero solo tra le due frequenze angolari, consentendo la seguente equazione:

$$a_{RMS}(f_i) = \sqrt{\frac{\int_0^T a^2(t, f_i) dt}{T}} = \sqrt{\frac{\int_{f_{1i}}^{f_{2i}} \hat{a}^2(f) df}{T}} \quad (5)$$

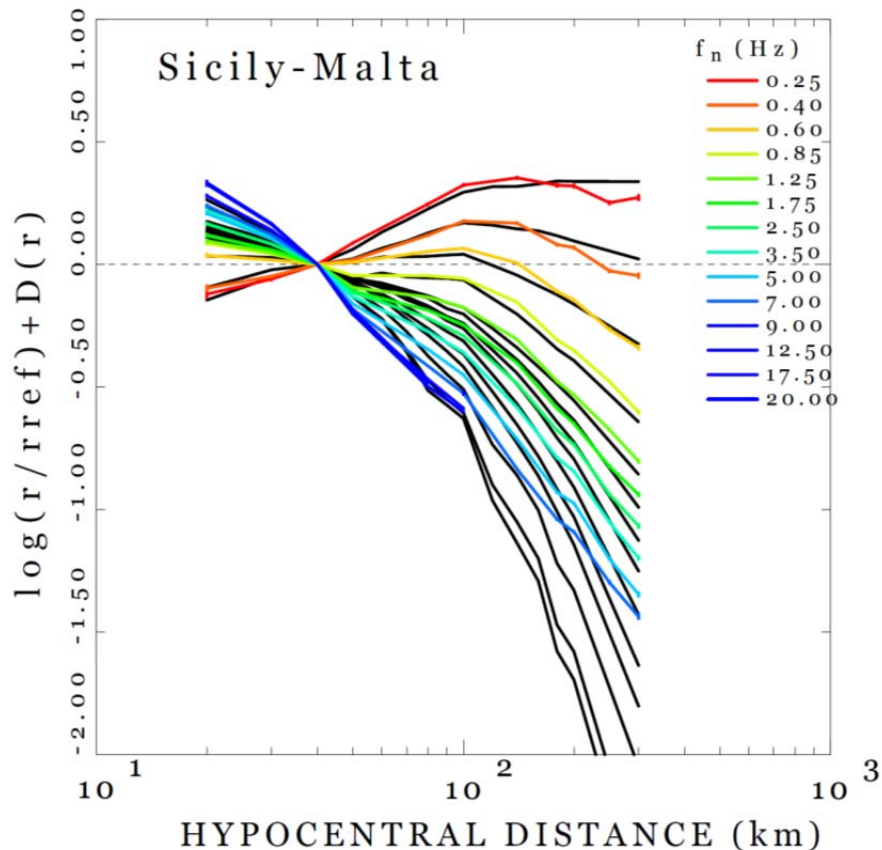
Nel nostro studio, la RVT viene applicata a un insieme di sismogrammi che sono significativamente diversi da zero solo tra $t = 0$ (cioè, il tempo di arrivo delle onde S) e $t = T$ (cioè, la durata del segnale che segue le onde S dirette). La durata efficace del moto del suolo (T) viene calcolata per ogni sismogramma filtrato, come accennato in precedenza.

Il dettaglio della procedura di modellazione è descritto in [Malagnini et al \(2002\)](#). Il termine $D(r)$ è modellato definendo l'attenuazione geometrica, $g(r)$, ed anelastica, $Q(f) = Q_0 (f/f_{ref})$. La durata utilizzata per modellare i valori di picco osservati ad una data frequenza, distanza e la magnitudo ($T(f_c, r, M_w)$) tiene conto della durata sorgente, così come la dispersione delle onde sismiche nella regione. Per i piccoli terremoti, l'effetto



distanza (dispersione) sarà molto più grande della durata della sorgente. Il risultato sarà un adattamento ai dati mostrati nella **Figura 3**.

Le sorgenti sismiche del nostro data set sono modellate utilizzando il modello di Brune, con un parametro di stress che è una funzione della dimensione del terremoto. A causa dei vincoli applicati alle regressioni, un filtro ad alta frequenza della forma: $\langle V(f)\exp(-\pi f k_0) \rangle_{\text{avg}} \approx \exp(-\pi f k_{\text{eff}})$ è comune a tutte le stazioni. Questo effetto è contenuto in tutti i termini di eccitazione: rappresenta la forte attenuazione subita dalle onde sismiche sotto il sito di registrazione, insieme con l'effetto medio di impedenza sismica, ed è anche mappato sui termini di eccitazione (vedi più avanti). Il parametro K_{eff} deve essere regolato per adattarsi alle eccitazioni di **Figura 4**. Infine, la modellazione dei termini sorgente dell'eq. (1) è vincolata con l'ausilio di stime indipendenti del momento sismico di un certo numero di terremoti di calibrazione.



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

Figura 3 Funzionale di attenuazione empirica e regionale (normalizzate) $D(r, f)$ per le componenti orizzontali a diverse frequenze. Le curve indicano le funzioni di attenuazione empiriche ottenute dalla regressione delle ampiezze di velocità di picco filtrate in un insieme di frequenze. Le linee nere indicano stime teoriche (modellate) della stessa funzione.

5) Attenuazione modello per la regione

La **Figura 3** mostra i risultati delle regressioni, in termini di attenuazione dei picchi di velocità ampiezze, $D(r, r_{ref}, f_c)$, tracciata in funzione di frequenza e distanza ipocentrale per la regione di studio. Una ricerca attraverso lo spazio delle soluzioni ha dato i seguenti parametri che descrivono le osservazioni 0.25- a 20.0 Hz. Utilizzando $f_{ref} = 1,0$ Hz.

$$Q(f) = 250 (f)^{0.40} \quad (6)$$

con lo spreading geometrico definito con le seguenti relazioni bilineari

$$\begin{aligned} g(r) &= r^{-1.0} & r \leq r_0 & 100 \text{ km} \\ g(r) &= (1/r_0)(r_0/r)^{1.5} & r > r_0 & \end{aligned} \quad (7)$$

Questi parametri si adattano alla $D(r)$ entro gli errori standard, a tutte le distanze campionate.

6) Termini di Sorgente

I termini empirici di eccitazione (sorgente): $EXC_i(f_c, r_{ref})$ nell'equazione (1) sono legati allo spettro sorgente, era rappresentano il moto del suolo alla distanza $r = r_{ref}$ per ciascun terremoto. Questi termini possono essere modellati utilizzando il modello di [Brune \(1970, 1971\)](#), e "propagando" la sorgente alla distanza ipocentrale di riferimento di 40 km:

$$s(f, M_w) (1/r_{ref}) \exp(-\pi r_{ref} \beta) Q_0 (f / f_{ref})^\eta \langle V(f) \exp(-\pi f \kappa_0) \rangle_{avg} \quad (8)$$

dove $V(f)$ rappresenta il sito di amplificazione medio termine relativo a hard rock ([Atkinson e Silva 1997](#)). κ_0 descrive la caduta spettrale ad alta frequenza presso la stazione sismica ([Anderson e Hough, 1984](#)). L'espressione $\langle V(f) \exp(-\pi f \kappa_0) \rangle_{medio}$ rappresenta la distorsione media indotta dai siti della rete, in modo che possiamo utilizzare il



parametro κ_{eff} nella nostra modellazione, dove $\exp(-\pi f \kappa_{\text{eff}})$ è usato per approssimare la termine $\langle V(f) \exp(-\pi f \kappa_0) \rangle_{\text{avg}}$.

La forma di $s(f, M_w)$ che rappresenta gli spettri di velocità del moto del suolo:

$$s(f, M_w) = C [M_0 4 \pi \rho \beta^3] (2 \pi f) S(f) \quad (9)$$

$$C = (0.55 \times 2.0 \times 0.707) = 0.24 \quad (10)$$

dove $\log M_0 = 1,5 M_w + 6.03$ da [Hanks e Kanamori, \(1979\)](#). Il parametro C nelle equazioni (9) e (10) ([Boore 1983, 1986; Atkinson e Boore 1995](#)) prende in considerazione:

- i) i valori di radiazione mediati su tutti gli azimuth e tutti gli angoli di take-off ($\langle R_{\Theta\Phi} \rangle$, [Boore e Boatwright, 1984](#)), 0,55;
- ii) L'amplificazione dovuta alla superficie libera, 2.0
- iii) la partizione dell'energia nelle due componenti orizzontali del moto, 0.707.

$S(f)$ è lo spettro di Brune, per il quale sono stati utilizzati i seguenti parametri: densità $\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$, la velocità delle onde di taglio 3,5 km/s, mentre M_0 è il momento sismico. Nei nostri termini di eccitazione, $S(f)$ è attenuato alla distanza di riferimento di 40 km. La frequenza d'angolo del modello di Brune, f_c , è ottenuta con la seguente espressione

$$f_c = 0.49 \beta (\Delta \sigma_{\text{Brune}} M_0)^{1/3} \quad (11)$$

dove $\Delta \sigma_{\text{Brune}}$ è il parametro di stress espresso in Pa. La RVT è utilizzata per modellare i risultati della regressione nel dominio del tempo, utilizzando la durata efficace dei sismogrammi alla distanza di riferimento, oltre ai parametri di eccitazione e attenuazione spettrale.

La **Figure 4** mostra i termini di eccitazione empirici (linee nere), insieme ai relativi modelli teorici di origine, ottenuti per i picchi di ampiezza dei sismogrammi filtrati. Singole curve di eccitazione a 40 km sono mostrate con tratti sottili neri. Le linee rosse spesse in **Figure 4** mostrano i termini teorici di eccitazione ottenuti utilizzando le equazioni (9, 10, e 11).

È chiaro che esiste un compromesso tra κ_{eff} e $\Delta \sigma_{\text{Brune}}$, nel definire l'energia che viene rilasciata dalla sorgente. I due parametri sono in competizione, uno contro l'altro, nel

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

definire le ampiezze spettrali osservate ad alta frequenza. Il trade-off appena descritto non può essere risolto con l'approccio utilizzato in questo lavoro.

Possiamo osservare che lo scaling assoluto della sorgente sismica nella regione dovrebbe essere affrontato da uno studio dedicato, come quello di [Malagnini et al. \(2014a b\)](#), o di [Morasca et al. \(2005\)](#). Possiamo tuttavia risolvere l'impasse elaborando un modello di eccitazione efficace per il movimento del suolo, scegliendo (arbitrariamente) uno stress drop $\Delta\sigma_{\text{Brune}} = 2$ MPa a $M_w = 2.0$, e ottenendo $\kappa_{\text{eff}} = 0,05$ sec. È importante notare come κ_{eff} non dipenda dal momento sismico del terremoto, ma solo dalle proprietà medie di attenuazione ai siti della rete. I termini di eccitazione dei eventi vengono confrontati con le nostre previsioni in **Figura 4**. Il fit a $M_w > 4.0$ sono eccellenti per tutte le frequenze. Si vede anche che, per i terremoti studiati, lo stress drop sembra costantemente aumentare con l'aumentare della magnitudo momento: da $\Delta\sigma_{\text{Brune}} = 2$ MPa a $M_w = 2.0$, per $\Delta\sigma_{\text{Brune}} = 25$ MPa a $M_w = 4.5$.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



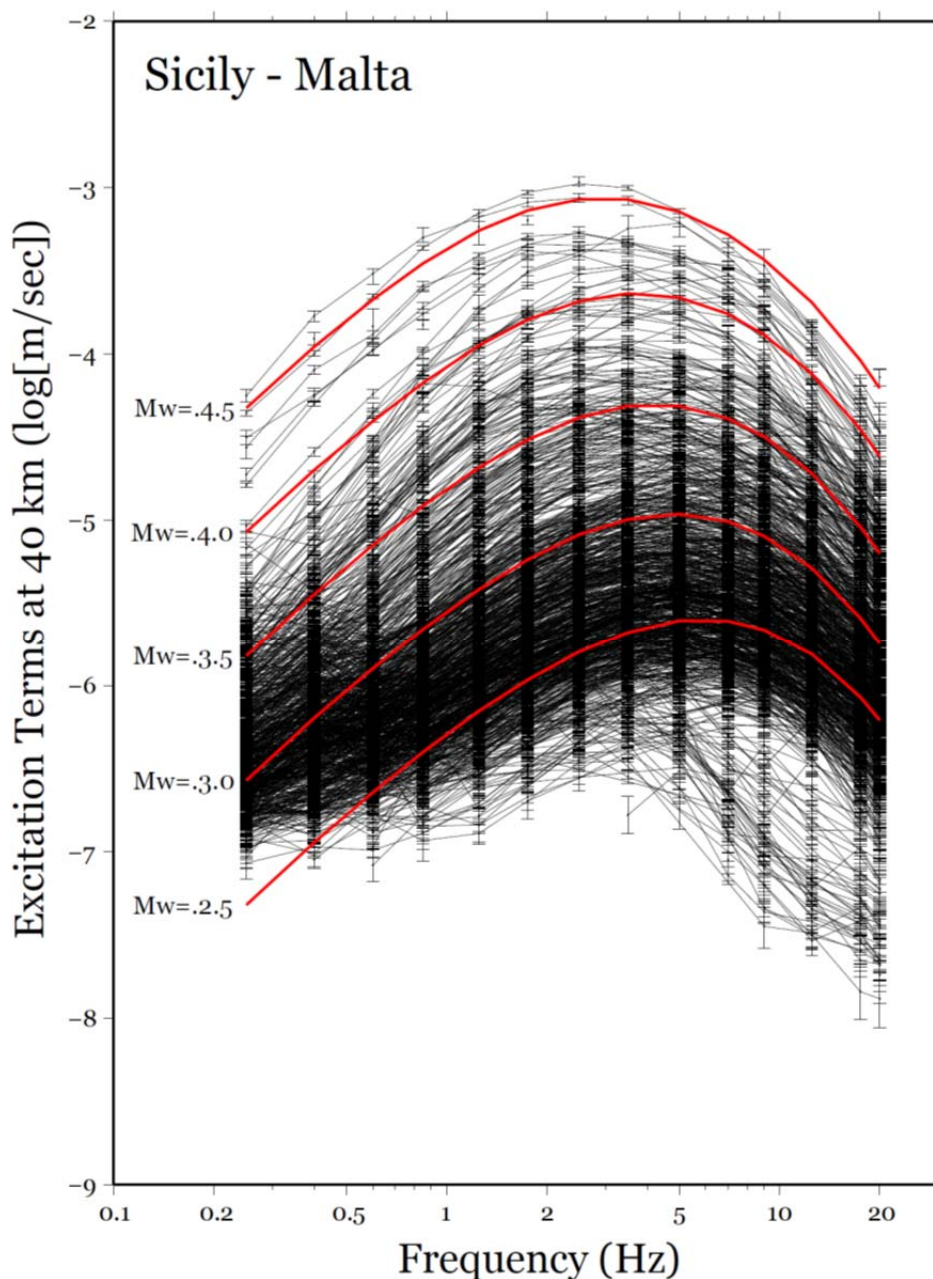


Figura 4 Termini di eccitazione alla distanza $r_{ref} = 40$ km (con errori standard). Le linee rosse rappresentano i termini teorici di origine, che sono modellati utilizzando il modello di Brune (Brune 1970) per M_w 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, e 4.5.

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

7) Termini del sito

La **Figura 5** mostra i termini del sito della regressione sulle ampiezze di picco filtrate. Poiché il vincolo di media nulla è stato applicato alle componenti orizzontali del moto del suolo, possiamo interpretare i termini di eccitazione dell'equazione (1) come il moto del suolo orizzontale che sarebbe osservato presso il sito medio, a 40 km di distanza ipocentrale. Niente di sistematico che sia presente a tutti i siti di registrazione (ad esempio, quando tutti gli strumenti sono distribuiti sullo stesso bacino sedimentario) potrebbe cambiare i singoli termini di sito mostrati in **Figura 5**. Invece, ogni comportamento sistematico viene mappato nei termini di eccitazione di **Figura 4**. Esistono tecniche per ridurre o eliminare l'intrinseco trade-off tra sorgenti e siti, introdotto dalla equazione (1) (vedi [Malagnini et al., 2004, 2007](#)), anche se non sono state applicate nel caso di cui al presente studio. I termini di sito, nella loro attuale situazione, in cui sono affetti dal trade-off con i termini di eccitazione empirici, non sono di alcuna utilità pratica nel presente modulo, eccezione fatta per l'analisi delle differenze relative tra i diversi termini di sito. Per quanto riguarda le applicazioni a equazioni predittive del moto del suolo a distanza regionale, la scelta piu' consona e' quella relativa a siti "generici" (rock-soil, vedi [Boore e Joyner, 1997](#)) che possono essere rappresentativi delle situazioni di una determinata area.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

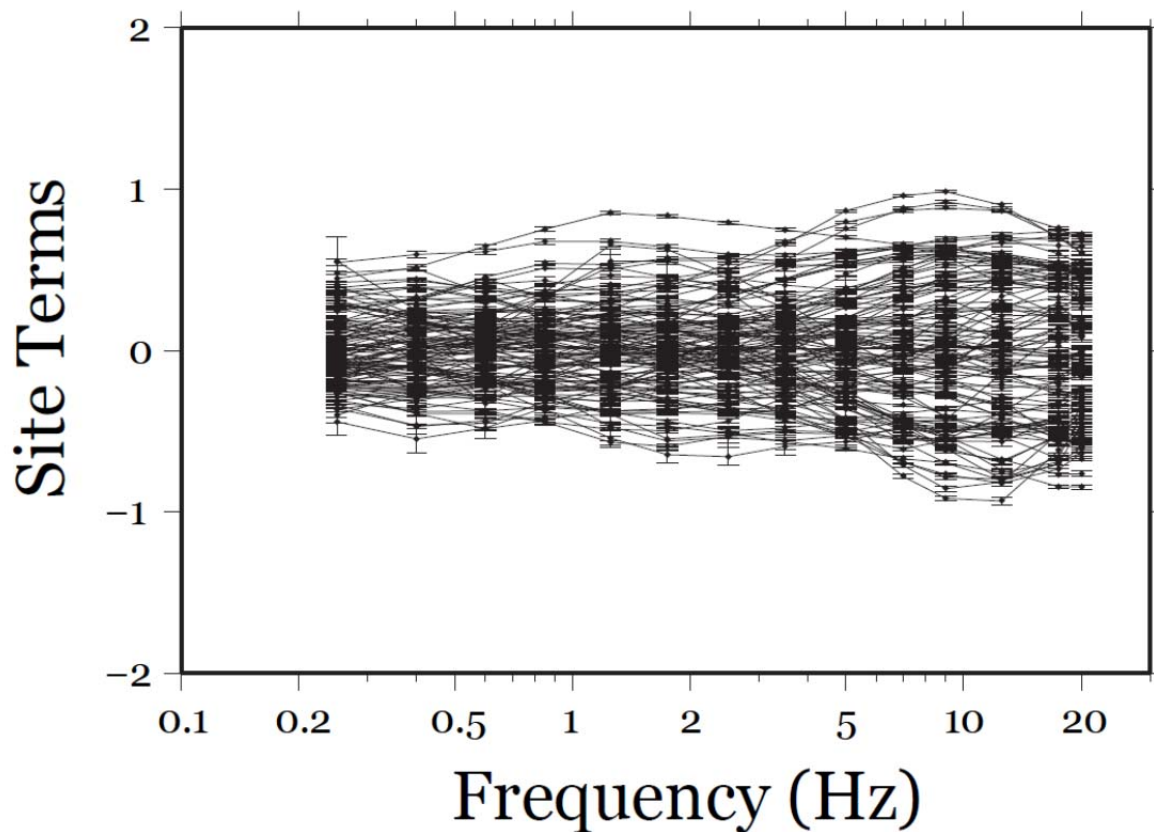


Figure 5 i termini del sito della regressione su ampiezze di picco filtrati (orizzontali).

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11

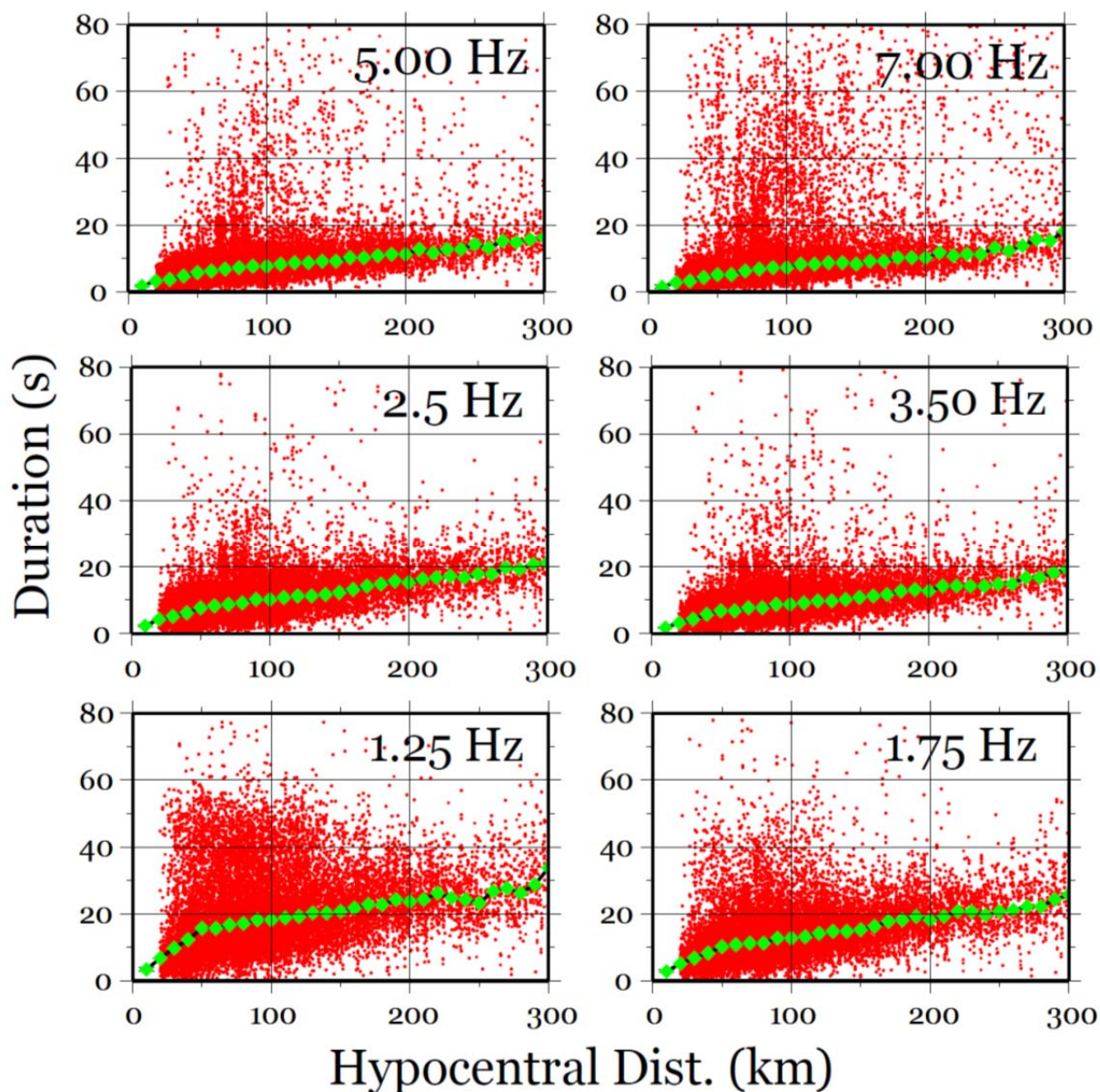


Figura 6 Durata in funzione della distanza ipocentrale per differenti frequenze (1.25, 1.75, 2.5, 3.5, 5.00 and 7.00 Hz). I pallini rossi rappresentano i singoli valori della durata per ciascun evento del dataset. I quadrati verdi indicano i valori della durata calcolata ai nodi durante la procedura d'inversione. Le incertezze sono state calcolate usando il metodo dei minimi quadrati.

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

8) Stime dei valori di picco del moto del suolo (PGA, PGV) e degli spettri di risposta (SA) in funzione della magnitudo e distanza

Per riassumere, le quantità che concorrono alla determinazione delle caratteristiche del moto del terreno durante un terremoto sono:

- i) le caratteristiche spettrali della radiazione sismica, e delle loro variazioni in funzione della magnitudo;
- ii) quelle dell'attenuazione crostale (anelastica-scattering);
- iii) quelle della durata temporale del moto del suolo in funzione della distanza dall'epicentro e della frequenza;
- iv) la amplificazione del moto del suolo indotta dalle caratteristiche della geologia di superficie. Una definizione della durata del moto del suolo, fornita in base alle caratteristiche dell'integrale dell'energia che segue l'arrivo delle onde S, viene utilizzata per quantificare un funzionale durata $T(r,f)$ attraverso opportune regressioni sulle durate osservate. Le caratteristiche di cui ai punti i), ii), iv) vengono anche desunte direttamente dai risultati di regressioni sulle ampiezze del moto del suolo osservate, ovvero sui loro spettri di Fourier.

Per ottenere le informazioni appena descritte, una regressione viene effettuata sulle ampiezze osservate sulle forme d'onda del database, filtrate passa-banda a una serie di frequenze centrali. Il logaritmo dell'ampiezza osservata su ciascun sismogramma (es. valore di picco del sismogramma filtrato) viene scritto in termini della somma di tre contributi: sorgente, sito e attenuazione crostale. Quest'ultimo è parametrizzato come una funzione regolare a tratti con numerosi nodi. Una inversione (effettuata minimizzando la norma L^{-1} del vettore residui) fornirà il valore di ciascun parametro.

Durante il processamento dei dati viene anche quantificata la durata del segnale corrispondente alla specifica forma d'onda (alla specifica distanza ipocentrale) alle diverse frequenze di campionamento. Una regressione su tutte le durate disponibili fornirà un

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

funzionale che descrive la durata in funzione della frequenza di campionamento e della distanza ipocentrale.

Una volta che le regressioni sono completate, lo strumento della teoria delle vibrazioni aleatorie (Random Vibration Theory, o RVT, [Cartwright e Lounguet-Higgins, 1956](#)) viene utilizzato per ottenere stime teoriche delle ampiezze di picco del moto del suolo. La RVT viene utilizzata per sintetizzare accurate stime dei valori di picco del moto del suolo (PGA, PGV) e degli spettri di risposta in velocità e/o accelerazione (PSA, PSV), in funzione della magnitudo, della distanza ipocentrale ed eventualmente della frequenza.

I parametri di input per il metodo stocastico possono essere separati in due sottoinsiemi: quelli relativi alla propagazione crostale e quelli relativi alla sorgente sismica. I primi sono i seguenti: il parametro di attenuazione anelastica crostale e la sua dipendenza dalla frequenza ($Q(f)=Q_0f^n$), una funzione multi-lineare (nello spazio log log) di attenuazione geometrica, fornita in termini di distanze di cross-over e di esponenti cui viene elevata la distanza ipocentrale tra i nodi di questa funzione, ed una funzione che descrive l'andamento della durata dello scuotimento del terreno in funzione della distanza ipocentrale. Oltre ai parametri appena discussi, ci sono quelli che descrivono le caratteristiche della radiazione sismica (lo spettro di Fourier). Il modello spettrale utilizzato per le simulazioni è quello a singola corner-frequency, caratterizzato da un parametro di stress legato allo stress drop sulla faglia, ma anche al comportamento dei siti rocciosi sui quali è stato determinato ($\Delta\sigma$) e da un parametro di attenuazione anelastica di alta frequenza, κ_0 . Viene fornito anche il valore di radiation pattern medio che è stato calibrato per la regione specifica. Le simulazioni prodotte in questo studio vanno riferite al comportamento medio dei siti su roccia che sono stati utilizzati nelle diverse regressioni. Le relazioni di PGA, PGV e SA nella zona viene fornite in funzione di magnitudo momento e distanza ipocentrale utilizzando il codice di SMSIM ([Boore, 1996](#)) che contiene tutte le informazioni sui parametri di attenuazione/eccitazione nella zona per cui è disponibile uno studio di attenuazione.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

9) Validazione

Una serie di test ha dimostrato che le relazioni di attenuazione regionalizzate sono complessivamente in accettabile accordo con i valori di picco di registrazioni accelerometriche non comprese negli insiemi di dati usati per la calibrazione.

In **figura 7** sono stati presentati le registrazioni in occasione di diversi terremoti di magnitudo circa 4.0-4.5, e 5.0 mentre in **figura 8** sono mostrati alcuni confronti; i dati accelerometrici utilizzati per il confronto. Nella **figura 8** sono state poste a confronto le stime di PGA, PGV e PSA (0.3 e 1 Hz) ottenute dalle simulazioni utilizzando il modello dell'attenuazione ottenuto in questo lavoro con i valori registrati in occasione dei terremoti della zona. L'accordo è accettabile in tutti i casi, soprattutto per quanto riguarda il terremoti M 4.0-4.3. In generale, Si osserva che l'accordo tra le stime predittive e i valori di PGA effettivamente registrati è generalmente buono per magnitudo intermedie (4.0 – 4.5) mentre le curve di PGA e PGV tendono a sottostimare i valori di PGA di terremoto di magnitudo M 5.0. La differenza potrebbe essere dovuta al fatto che la profondità ipocentrale dell'evento era a circa 66 km e il nostro dataset usato per ricavare il modello di attenuazione crostale non contiene dati con profondità ipocentrale superiore a 30km.

Entrando nello specifico, i valori di picco sono estrapolati oltre M_w 4.5 nella area. Gli svantaggi dell'azione di estrapolazione dei risultati oltre il range delle magnitudo presenti nei dati vengono in qualche modo compensati dall'uso di un campione di dati molto grande composto da decine di migliaia di osservazioni che ci permettono di quantificare in maniera molto precisa il contributo al moto del suolo di processi fisici indipendenti dalla magnitudo come quelli inerenti la propagazione crostale delle onde (dispersione, attenuazione anelastica, attenuazione geometrica).

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



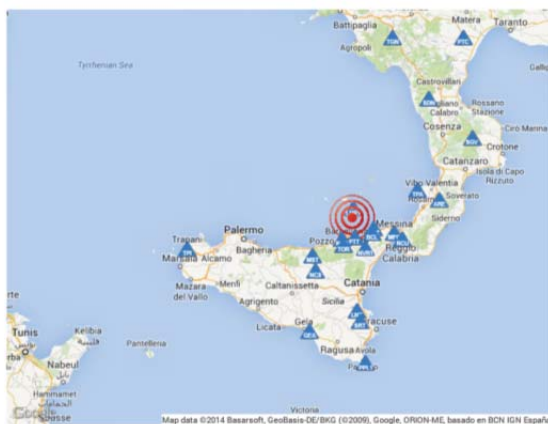
Repubblica Italiana



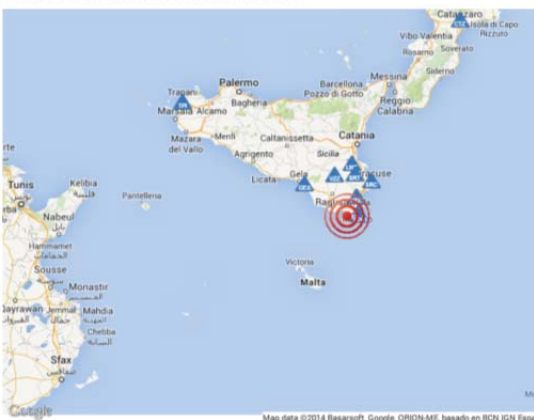
Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile

Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

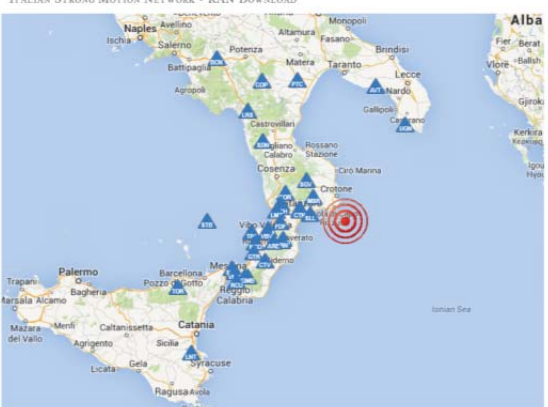
ITALIAN STRONG MOTION NETWORK - RAN DOWNLOAD



ITALIAN STRONG MOTION NETWORK - RAN DOWNLOAD



ITALIAN STRONG MOTION NETWORK - RAN DOWNLOAD



ITALIAN STRONG MOTION NETWORK - RAN DOWNLOAD

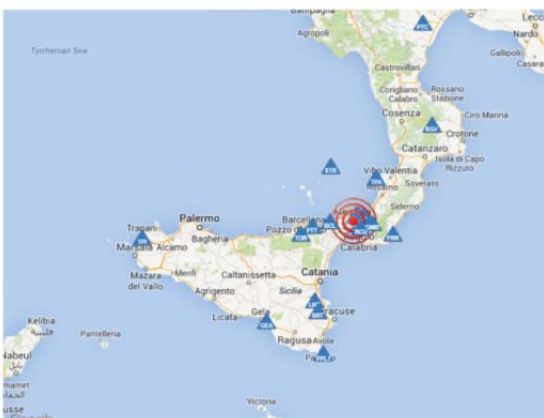


Figura 7 Alcuni terremoti registrati nelle zona; a) del 14/01/2014 (04:35:00) $h=11$ km, $M_w=4.0$, b) del 15/12/2013 (03:57:33), $h=10.3$, $M_w=4.1$, c) del 05/04/2014 (10:24:45) $h=65.7$, $M_w=5.0$, d) del 04/01/2013 (07:50:06) $h=10.1$ km, $M_w=4.3$.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11

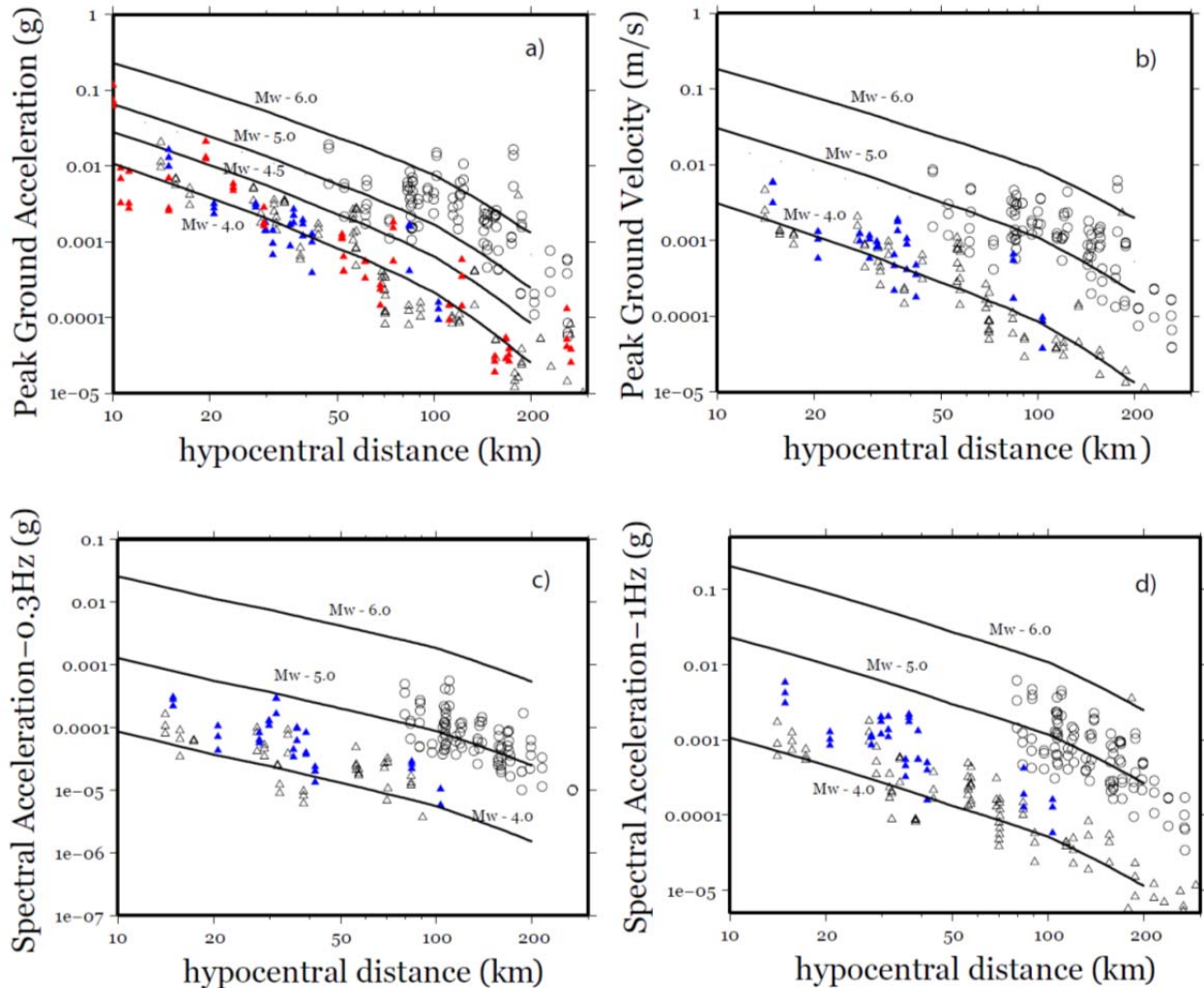


Figura 8 a) Confronto tra le curve di PGA per $M_w = 4.0, 4.5, 5.0$ e 6.0 di questo lavoro con i dati di alcuni terremoti registrati nelle zona (vedi la figura precedente 7), b) confronto delle stesse di PGV, c) PSA - 0.3 Hz e d) PSA - 1 Hz con i dati dei gli stessi terremoti. (cerchi neri indicano i dati osservati del terremoto M 5.0 , triangoli sono quelli del terremoti, M $4.0, 4.1$ e 4.3).

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile

Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

10) Bibliografia

Akinci, A., Malagnini, L., Herrmann, R. B., Gok, R. & Sorensen, M., (2006). Ground motion scaling in the Marmara Region, Turkey, *Geophys. J. Int.* **166** 635– 651.

Akinci, A., Malagnini, L., Herrmann, R.B, Pino, N.A., Scognamiglio, L. & Eyidogan, H., (2001). High-frequency ground motion in the Erzincan region, Turkey: inferences from small earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **91** 1446–1455.

Ambraseys, N. N., K. A. Simpson, and J. J. Bommer (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* **25**, 371–400.

Ambraseys, N. N. (1995). The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* **24**, 467–490.

Atkinson, G.M. & Boore, D.M., (1995). Ground-motion relations for eastern North America, *Bull. Seism. Soc. Am.* **85** 17–30.

Atkinson, G.M. & Silva, W., 1997. An Empirical study of earthquake source spectra for California earthquakes, *Bull. seism. Soc. Am.*, **87**, 97–113.

Bakun, W. H., and W. B. Joyner (1984). The *L M* scale in central California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1827–43.

Boatwright, J., H., Bundock, J. Luetgert, L. Seekins, L. Gee, and P. Lombard (2003). The dependence of PGA and PGV on distance and magnitude inferred from northern California ShakeMap data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2043–55.

Hutton, L. K., and D. M. Boore (1987). The ML scale in southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2074–94.

Bay, F., Fah, D., Malagnini, L. & Giardini, D., (2003). Spectral shear wave ground motion scaling for Switzerland, *Bull. Seism. Soc. Am.* **93** 414–429.

Bodin, P., Malagnini, L. & Akinci, A., (2004). Ground motion scaling in the Kachchh Basin, India, deduced from after-shocks of the 2001 *M*_w 7.6 Bhuj earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* **94** 818–827.

Boore, D.M., (2009). Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM. *Bull. Seism. Soc. Am.* **99**, 3202–3216.

Boore, D.M., (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure appl. Geophys.* **160**, 635–676.

Boore, D.M. & Akkar, S., (2003). Effect of causal and acausal filters on elastic and inelastic response spectra, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* **32** 1729–1748.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11

Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

Boore, D. M. (1989). The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters. *Tectonophysics*, 1–14.

Boore, D.M., (1986). Short-period P- and S-wave radiation from large earthquakes: implications for spectral scaling relations, *Bull. Seism. Soc. Am.* **76** 43–64.

Boore, D.M. and J. Boatwright (1984). Average body-wave radiation coefficients, *Bull. Seism. Soc. Amer.* **74** 1615-1621.

Boore, D.M., (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* **73** 1,865–1,894.

Benz, H. M., A. Frankel, and D. M. Boore (1997). Regional L_g attenuation for the continental United States. *Bull. Seism. Soc. Am.* 606–19.

Boore, D.M. & Joyner, W.B., 1991. Estimation of ground motion at deep-soil sites in eastern North America, *Bull. seism. Soc. Am.*, **81**, 2167–2185.

Campell, W.K., 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo- absolute acceleration response spectra, *Seis.Res. Lett.*, **68**(1), 128–154.

Brune, J., (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.* **75** 4997–5009.

Brune, J., (1971). Correction, *J. Geophys. Res.* **76**, 5002.

Cartwright, D. E. & Longuet-Higgins, M. S., (1956). The statistical distribution of the maxima of a random function, *Proc. R. Soc. London*, **237** 212–232.

D'Amico S., Akinci A., Malagnini L., (2012). Predictions of high-frequency ground-motion in Taiwan based on weak motion data. *Geophys. J. Int.* **189** 611-628.

Douglas J., 2001. A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). ESEE Report No. 01-1, Department of Civil Engineering, Imperial College, 144 pp.

Douglas J., 2002. Errata and additions to ESEE Report No. 01-1. A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). Department Report, Department of Civil Engineering, Imperial College, 40 pp.

Giardini D. (ed), 1999. GSHAP Global Seismic Hazard Assessment Program. *Annali di Geofisica*, 42(6), 957-1230.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile

Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

Jiménez M.J., Giardini D., Grünthal G. and SESAME Working Group, 2001. unified seismic hazard modelling throughout the Mediterranean region. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, n. 1-2, pp. 3-18.

Edwards, B. and D. Fäh, (2013). A Stochastic Ground-Motion Model for Switzerland, *Bull. Seism. Soc. Amer.* **103** (1) doi:[10.1785/0120110331](https://doi.org/10.1785/0120110331).

Fatehi, A., and R. B. Herrmann. (2008). High frequency ground motion scaling in the Pacific Northwest, Northern and Central California, *Bull. Seism. Soc. Am.* **98** 709-721

Hanks, T.C. & Kanamori H., (1979). A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.* **84**(B5) 2348–2350.

Herrmann, R. B., Benz, H., and Ammon, C. J., (2011). Monitoring the Earthquake Source Process in North America, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 101, No. 6, pp. 2609–2625, doi:[10.1785/0120110095](https://doi.org/10.1785/0120110095)

Malagnini, L., R. B. Herrmann, and M. Di Bona (2000). Ground-motion scaling in the Apennines (Italy), *Bull. Seism. Soc. Am.* **90**, 1062–1081.

Malagnini, L., and R. B. Hermann (2000a). Ground-motion scaling in the region of the Umbria-Marche earthquake of 1997, *Bull. Seism. Soc. Am.* **90**, 1041–1051.

Malagnini, L., R. B. Hermann, and K. Koch (2000b). Regional ground motion scaling in central Europe, *Bull. Seism. Soc. Am.* **90**, 1052–1061.

Malagnini, L., Akinci, A., Herrmann, R.B., Pino, N.A. & Scognamiglio, L, (2002). Characteristics of the ground motion in Northeastern Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.* **92** 2186–2204.

Malagnini, L., K. Mayeda, A. Akinci, and P. L. Bragato (2004). Estimating absolute site effects, *Bull. Seism. Soc. Am.* **94**, 1343–1352.

Malagnini, L., Mayeda, K., Uhrhammer, R., Akinci, A. & Herrmann, R.B., (2007). A regional ground motion excitation/attenuation model for the San Francisco region, *Bull. Seism. Soc. Am.* **97**(3), 843–862; doi:[10.1785/0120060101](https://doi.org/10.1785/0120060101).

Malagnini, L., Scognamiglio, L., Mercuri, A., Akinci, A. & Mayeda, K., (2008). Strong evidence for non-similar earthquake source scaling in central Italy, *Geophys. Res. Lett.* **35** L17303, doi:[10.1029/2008GL034310](https://doi.org/10.1029/2008GL034310).

Malagnini, L., A. Akinci, K. Mayeda, I. Munafò, R. B. Herrmann and A. Mercuri (2011). Characterization of earthquake-induced ground motion from the L'Aquila seismic sequence of 2009, Italy, *Geophys. J. Int.* **184** 325-337.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile

Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

Malagnini, L., K. Mayeda, S. Nielsen, S.-H. Yoo, I. Munafo', C. Rawles, and E. Boschi (2014a). Scaling transition in earthquake sources: a possible link between seismic and laboratory measurements, *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-013-0749-8.

Malagnini, L., I. Munafo', M. Cocco, S. Nielsen, K. Mayeda, and E. Boschi (2014b). Gradual fault weakening with seismic slip: inferences from the seismic sequences of L'Aquila, 2009 and Northridge, 1994, *Pure and Applied Geophysics*, doi: 10.1007/s00024-013-0752-0.

Morasca, P., Malagnini, L., Akinci, A., Spallarossa, D. & Herrmann, R.B., (2006). Ground-motion scaling in the Western Alps, *J. Seismol.* **10**(3) doi:10.1007/s10950-006-9019-x.

Morasca, P., K. Mayeda, L. Malagnini, and W. Walter (2005). Coda-derived source spectra, moment magnitudes and energy-moment scaling in the western Alps, *Geophys. J. Int.*, 160, 1, 263-275 doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02491.x

Montaldo, V., E. Faccioli, G. Zonno, A. Akinci, and L. Malagnini, 2005. Treatment of ground-motion predictive relationships for the reference seismic hazard map of Italy, *Journal of Seismology.*, 9, 295-316.

Mori, J., and D. Helmberger (1996). Large-amplitude Moho reflections (SmS) from Landers aftershocks, southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1845-52.

Power, M., B. Chiou, N. Abrahamson, and C. Roblee (2006). The Next Generation of Ground Motion Attenuation Models (NGA) project: An overview. In *Proceedings, Eighth National Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2022.

Raoof, M., Herrmann, R.B. & Malagnini, L., (1999). Attenuation and excitation of three-component ground motion in Southern California, *Bull. Seism. Soc. Am.* **89** 888-902.

Rietbrock, A., F. Strasser and B. Edwards, (2013). A stochastic earthquake ground motion prediction model for the United Kingdom *Bull. Seism. Soc. Am.* **103** (1) doi:10.1785/0120110231. modelleri. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, **107** 73-94 (in Turkish).

Raoof, M., R. Herrmann and L. Malagnini (1999). Attenuation and excitation of three component ground motion in southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 888-902.

Scognamiglio, L., Malagnini, L. & Akinci, A., (2005). Ground motion scaling in Eastern Sicily, *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**(2) 568-578.

Slejko, D., Peruzza, L. and Rebez, A. (1998) Seismic hazard maps of Italy, *Annali di Geofisica*, 41, n. 2, pp. 183-214.

Slejko D., Camassi R., CeciĆ I., Herak D., Herak M., Kociu S., Kouskouna V., Lapajne J., Makropoulos K., Meletti C., Muço B., Papaioannou Ch., Peruzza L., Rebez A., Scandone P., Sulstarova E., Voulgaris N., Živčić M. and Zupančić P., 1999. Seismic hazard assessment of Adria. *Annali di Geofisica*, 42, n. 6, pp. 1085-1107.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile

Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

Spudich, P.; Joyner, W. B.; Lindh, A. G.; Boore, D. M.; Margaris, B. M.; Fletcher, J. B., 1999. SEA99, A Revised Ground Motion Prediction Relation for Use in Extensional Tectonic Regimes. *Bull. Seism. Soc. Am.* v. 89, pp. 1156 - 1170.

Tento A., Franceschina L. and Marcellini A., 1992. Expected ground motion evaluation for Italian sites. Proceedings of the "Tenth World Conference on Earthquake Engineering", Madrid, Spain, 19-24 July 1992, Vol. 1, pp. 489-494.

Zonno G. and Montaldo V., 2002. Analysis of strong ground motions to evaluate regional attenuation relationships, *Annals of Geophysics*, 45, n. 3-4, pp. 439-454.
Sabetta, F., and A. Pugliese (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 337-352.

Sadigh, K., 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seism. Res. Lett.*, **68**(1), 180-189.

Tromans, I.J., Bommer, J.J., The attenuation of strong-motion peaks in Europe, The 12th European conference on earthquake engineering, 2002, Pages: 1 - 10.

Toro, G.R. & McGuire, R.K., 1987. An investigation into earthquake ground motion characteristics in eastern north America, *Bull. seism. Soc. Am.*, **77**, 468-489.

Xu, Y., R. B. Herrmann, C.-Y. Wang, and S. Cai, (2010). High frequency ground motion scaling in Yunnan and Sichuan, China, *Bull. Seism. Soc. Am.* **100** 2508-2517.

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11



Repubblica Italiana



Regione Siciliana
Presidenza
Dipartimento della Protezione Civile



Project co-financed by the
European
Union European Regional
Development

11) Allegato

TABELLA_PGA_PGV_SA_MxR

Lista dei valori di Peak Ground Acceleration (cm/s^2) (PGA), Peak Ground Velocity (cm/s) (PGV) e degli spettri di risposta in accelerazione, Peak Spectral Acceleration (cm/s^2) (PSA), in funzione della magnitudo (M_w), della distanza ipocentrale, Hypo Dist. (km). Le ordinate spettrali sono presentati per le frequenze (0.33, 1.0 e 3.33Hz). Le relazioni di attenuazione sono state prodotte per M_w comprese tra 2.0 e 7.4 e distanze ipocentrali comprese tra 10 e 200 km.

12) Lista Abbreviazioni

Hypo Dist (km)	MW	PSA's at freqs below..			Peak Values	
		in cm/s^2			cm/s	cm/s^2
		0.33	1.0	3.33	PGV	PGA

PSA - Peak Spectral Acceleration

PGA - Peak Ground Acceleration

PGV - Peak Ground Velocity

RVT - Random Vibration Theory

EXC - excitation source term

P.O Italia-Malta 2007-2013 progetto SIMIT :
Costituzione di un sistema integrato di protezione civile transfrontaliero italo-maltese
Codice B1-2.19/11