



**REGIONE
TOSCANA**



**"MONITORAGGIO SISMICO DELLA PROVINCIA
DI FIRENZE, PRATO E PISTOIA"**

ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA

REGIONE TOSCANA - UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

Relazione Finale

**"MONITORAGGIO SISMICO DELLA PROVINCIA
DI FIRENZE, PRATO E PISTOIA"**

**ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA
REGIONE TOSCANA - UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE**

Relazione Finale

A cura di:

Gilberto Saccorotti^(1,2), Andrea Fiaschi⁽¹⁾, Luca Matassoni⁽¹⁾, Marco Morelli⁽¹⁾, Davide Piccinini⁽²⁾.

Responsabili Scientifici: Maurizio Ripepe⁽³⁾, Claudia Madiari⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Fondazione Prato Ricerche

⁽²⁾ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

⁽³⁾ Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Scienze della Terra

⁽⁴⁾ Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Indice

1. Introduzione
2. Sviluppo e miglioramento delle procedure per l'acquisizione e la trasmissione dei dati delle stazioni componenti la rete sismica
3. Interpretazione dei dati ai fini dello studio della sismicità
4. Supporto tecnico/scientifico per l'attività di gestione dell'emergenza anche mediante la realizzazione della Rete Sismica Mobile (RSM)
5. Riferimenti Bibliografici
6. Crediti

Allegati:

- DVD delle registrazioni sismiche continue (formato *MSeed*) alle stazioni RUF1 e MTCR, per il periodo 1 Aprile- 30 Settembre 2012; catalogo sismico per il periodo Gennaio 2011- Settembre 2012.
- CD-ROM contenente copia delle relazioni Tecnica, Intermedia e Finale (qs documento).

1. Introduzione

Questa relazione riporta i risultati finali delle attività tecnico-scientifiche svolte nell'ambito della Convenzione tra Università degli Studi di Firenze e Fondazione Prato Ricerche, come parte dell'accordo di collaborazione scientifica tra la Regione Toscana e l'Università degli Studi di Firenze per l'*Implementazione ed aggiornamento del monitoraggio sismico della provincia di Firenze, Prato e Pistoia*". Secondo quanto descritto nella Relazione Tecnico-Illustrativa (All. 1 della Convenzione fra Università di Firenze e Fondazione Prato Ricerche), le attività hanno compreso (i) una parte scientifica, mirata alla rivisitazione dei cataloghi sismici esistenti per il miglioramento delle procedure di localizzazione della sismicità e per la definizione di un possibile modello interpretativo dei meccanismi sismogenetici nell'Appennino Tosco-Emiliano; (ii) una parte tecnico-logistica, finalizzata al potenziamento della Rete Sismica della Toscana Nord-Orientale, mediante installazione di 2 nuove stazioni ed ammodernamento dei sistemi di acquisizione dati. Questa relazione è costituita da tre sezioni principali. La prima, è dedicata alla descrizione tecnica delle 2 nuove stazioni (ubicata nei comuni di Rufina e Serravalle Pistoiese), delle procedure di acquisizione dei segnali, della loro visualizzazione remota tramite apposita interfaccia *web*. La seconda parte è invece dedicata alla rivisitazione della sismicità strumentale nel periodo 2005-attuale, ed alla successiva definizione di un modello sismotettonico per il Mugello e zone limitrofe. Infine, la terza sezione presenta le esperienze e risorse strumentali che Università e Prato Ricerche mettono congiuntamente a disposizione dell'Amministrazione Regionale per interventi di Rete Sismica Mobile, finalizzati all'addensamento della copertura strumentale a seguito di forti terremoti o per sequenze sismiche di particolare rilievo.

3. Obiettivo (3): Sviluppo e miglioramento delle procedure per l'acquisizione e la trasmissione dei dati delle stazioni componenti la rete sismica.

Sulla base delle procedure attuate nell'ambito dell'obiettivo (1), questa sezione descrive le attività tecnico-logistiche di installazione delle due nuove stazioni, e della loro integrazione nel sistema di acquisizione della RSTNO.

P3.1 – Relazione tecnica con descrizione dei sensori, sistemi di telemetria ed acquisizione prescelti.

Selezione dei siti

Come descritto in sede di relazione intermedia, per la scelta dei nuovi siti avevamo individuato le seguenti condizioni:

- a) Miglioramento nella copertura azimutale delle principali sorgenti sismogenetiche;
- b) Basso livello del rumore di fondo;
- c) Assenza di effetti di amplificazione;
- d) Buona ricezione del segnale GPS;
- e) Possibilità di telemetria.

A questi fattori, si sono poi aggiunte considerazioni legate ai futuri sviluppi di un sistema di allerta/notifica, basato sulla continua scansione dei segnali che, dalle stazioni remote, sono trasmessi in tempo reale al centro di acquisizione. Come evidenziato dalla mappa riportata in Figura 3.1.1, le stazioni già esistenti della RSTNO dotate di sistema di trasmissione continua (SEI, VMG e PTF) coprono solo l'area del bacino del Mugello e parte della provincia di Prato. Conseguentemente, è emersa la necessità di estendere la rete in trasmissione continua sia ad Ovest, nella provincia di Pistoia, che ad Est, verso la media-bassa Val di Sieve. A queste considerazioni va poi aggiunta la futura dismissione, per cause indipendenti dalla nostra volontà, della stazione PSL, ubicata nel Comune di Sambuca Pistoiese (Fig. 3.1.1). Sulla base di queste valutazioni, i siti individuati per l'ubicazione delle stazioni sismometriche sono Monte la Croce, nel comune di Sambuca P.se (**MTCR**;

sito S13) e la località Castiglioni nel comune della Rufina (RUF1; sito S9).

Il sito RUF1 soddisfa pienamente tutte le condizioni sopra menzionate. In aggiunta alle buone condizioni di rumore di fondo ed assenza di fenomeni di amplificazione locale, le simulazioni numeriche descritte nella Relazione Intermedia hanno evidenziato come l'aggiunta di questa postazione porti a notevoli miglioramenti nella qualità delle localizzazioni per sorgenti ubicate nel bacino del Mugello.

Il sito MTCR, a fronte di uno spettro di amplificazione HVSR non propriamente favorevole (v. Relazione Intermedia), permette comunque di sopperire alla futura mancanza della stazione PSL, al tempo stesso fornendo una copertura in tempo reale dell'area pedemontana della Provincia di Pistoia. In aggiunta, per questo sito abbiamo avuto l'occasione di disporre di una postazione remota ben protetta, ed in area non accessibile al pubblico (v. sezione seguente); questo elemento ha fornito ulteriori condizioni alla scelta definitiva.

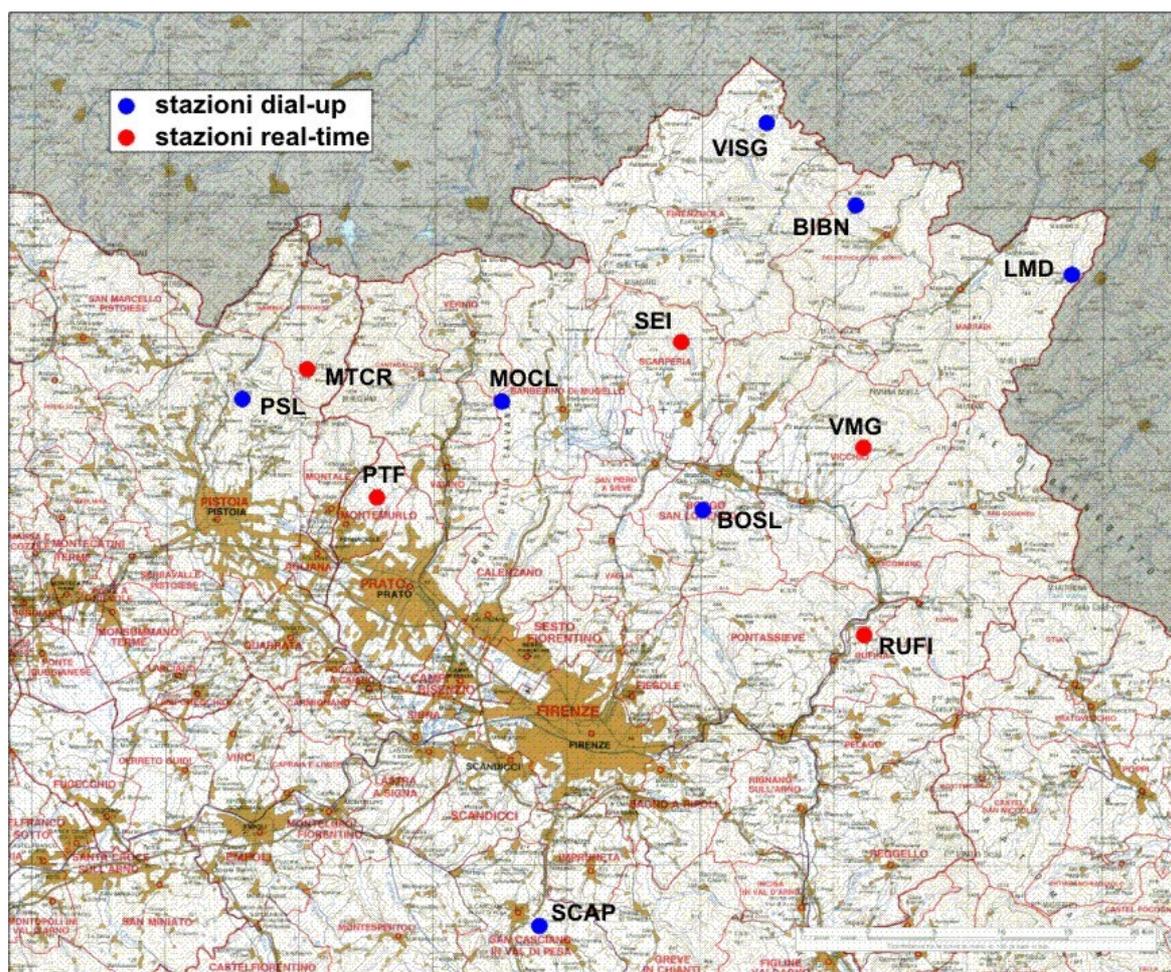


Fig. 3.1.1 – Rete sismometrica RSTNO. I pallini blu e rossi indicano le stazioni con telemetria a chiamata (dial-up) e continua, rispettivamente.

Le due nuove stazioni sismiche sono entrate in funzione in tempi successivi, dopo un primo periodo di prova tra la fine del 2011 e l'inizio del 2012. Dal 30 di marzo 2012 entrambe le stazioni sono pienamente operative (Fig. 3.1.2).

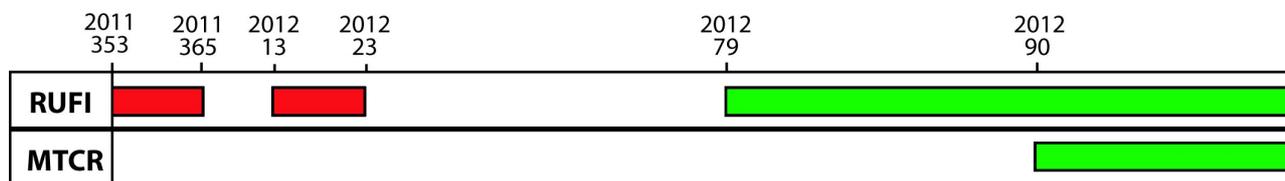


Fig. 3.1.2 – Periodi di funzionamento delle nuove stazioni sismiche (date espresse in giorni dell'anno; per riferimento, il giorno 90 corrisponde al 30 Marzo). Le caselle rosse sono relative a periodi in cui la stazione è stata formalmente in funzione, ma i cui dati non sono utilizzabili a causa di problemi nell'acquisizione del dato.

Acquisitori

Entrambi i siti sono stati equipaggiati con acquisitori digitali INGV-GAIA2 (Pintore e Salvaterra, 2007; Salvaterra et al., 2008; Rao et al., 2010) e sismometri a corto periodo. La logistica invece differisce in maniera sostanziale a causa delle diverse condizioni meteo climatiche caratteristiche dei due luoghi.

La stazione GAIA2 è stata concepita e sviluppata all'interno dei laboratori tecnici dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), ed è costituita da una pluralità di moduli, ciascuno dedicato ad una diversa funzione, alimentati in corrente continua con tensione di ingresso da 9 a 18 V. I differenti moduli sono:

- 1 **Modulo AGDF2** è la scheda digitalizzatrice a 24 bit di dinamica, numero di canali variabile fino ad 8 (con aggiunta del modulo AGDF2Ext) e passo di campionamento fino a 2000 campioni al secondo. La scheda è dotata di connessioni seriali RS232 e RS485, sincronismo attivo a VCXO e GPS interno o esterno. Inoltre il modulo gestisce l'alimentazione per tutti i moduli interconnessi, tramite un circuito a microprocessore che supervisiona la tensione in ingresso attivando l'accensione degli altri moduli solo se la tensione raggiunge un valore sufficiente.
- 2 **Modulo TN2** è il sistema di controllo e telemetria di alto livello, dotato di processore a 32 bit e sistema operativo Linux. Ha 5 interfacce seriali, 3 USB ed 1 Ethernet, può registrare sia in locale, su flash memory, che inviare stream di dati in simultanea. Nel software è compreso il server SeiscomP, il visualizzatore Lomax su interfaccia web, il protocollo di funzioni stazione su SNMP.

3 **Modulo GPSExt** è l'alloggiamento remoto per ricevitore GPS con relativa antenna, collegato in seriale alla AGDF2. Viene utilizzato per collocazioni tra 50 e 1000 m dal modulo AGDF2.

4 **Modulo ALIM** è alimentatore e caricabatteria con controllo di carica a microprocessore.

Sensori

Entrambe le due nuove stazioni sono equipaggiate con sensori Lennartz Le3D-lite, le cui caratteristiche sono:

Costante di Trasduzione	400 V/m/s
Smorzamento critico	0.707
Intervallo di temperatura	-15 ... +60 °C
Frequenza propria	1 Hz
Frequenza superiore di taglio	100 Hz
RMS rumore @ 1 Hz	< 3 nm/s
Range dinamico	> 136 dB

Ulteriori dettagli su questi sensori sono disponibili sul sito del costruttore:

<http://www.lennartz-electronic.de> (ultimo accesso Giugno 2012).

Stazione di Monte la Croce (MTCR)

L'installazione è stata effettuata presso la postazione dell'aeronautica militare di Monte la Croce, all'interno di uno *shelter* in prefabbricato metallico di proprietà dell'ENEA (ex rete di monitoraggio sismometrico della centrale nucleare del Brasimone). La struttura geomorfologica è costituita da una antiforme ad asse E-W mentre il substrato lapideo appartiene alla formazione arenacea del Torrente Carigiola in assetto di monoclinale con immersione verso i quadranti meridionali. Il prefabbricato entro il quale è alloggiata la strumentazione (Fig. 3.1.3) è dotato di doppio rivestimento con intercapedine riempita di poliuretano espanso. Sul tetto dell'alloggiamento sono posizionati 6 pannelli solari da 35 W ciascuno collegati in parallelo ad un regolatore di tensione. Nel complesso la carica ottenibile in condizioni di piena insolazione è di circa 200 W. All'interno dello *shelter*, insieme al regolatore di carica è stata alloggiata anche la batteria tampone da 60 Ah e la stazione GAIA2, collegata esternamente al sensore Lennartz *Le3D-lite*.



Fig. 3.1.3 – Alloggiamento stazione MTCR

La GAIA2 installata al Monte la Croce è dotata di modulo AGDF2 a 3 canali con GPS interno e Modulo TN2. Il passo di campionamento utilizzato è 100 campioni al secondo. Esternamente al prefabbricato, in un pozzetto non pavimentato, è stato installato il sensore velocimetrico. Tutti i cablaggi sono stati inguainati e sigillati ad eccezione dell'antenna GPS e dell'antenna di trasmissione dati.

I segnali sismici raccolti in continuo dalla stazione vengono archiviati in loco su memoria flash e trasmessi in tempo reale alla sede di Prato dove vengono acquisiti mediante software *Seiscomp*. La trasmissione del segnale viene effettuata mediante un router UMTS modello UR5 della Conel, collegato via Ethernet con la GAIA2. La stazione trasmette mediante una scheda TIM (*machine to machine*) ed è stata registrata con DNS dinamico; pertanto, la stazione può essere interrogata sia tramite interfaccia web, che mediante il software di acquisizione.

Stazione di Rufina (RUF1)

L'installazione di Castiglioni alla Rufina, effettuata in un terreno privato, ha richiesto la realizzazione di un alloggiamento in muratura e di una struttura di supporto per i pannelli solari (Fig. 3.1.4). La struttura geomorfologica è costituita da una piccola dorsale con asse WNW-ESE, mentre il substrato lapideo appartiene alla formazione arenacea del Monte

Falterona il cui assetto è di dubbia determinazione. Il pozzetto contiene al suo interno un pilastro in cemento armato con tondini di ferro di 3 cm di diametro radicati in roccia fino ad una profondità di 1 m. Su questo pilastro è stato posizionato il sensore sismometrico, mentre il resto della strumentazione trova posto nello spazio circostante. A circa 8 m dal pozzetto è stata realizzata una struttura in metallo a T, fissata al suolo anche mediante tiranti, per il sostegno e l'orientamento dei 3 pannelli solari da 100 W necessari per garantire l'alimentazione della strumentazione. All'interno del pozzetto è stata posizionata la batteria tampone da 60 Ah ed il regolatore di carica. Sempre all'interno del pozzetto trova posto la stazione sismometrica composta da acquirente GAIA2, montato entro un contenitore stagno tipo Pelican, e sensore Lennartz *Le-3Dlite*.



Fig. 3.1.4 – Alloggiamento stazione RUF1 (pozzetto e pannelli solari).

Come per la stazione MTCR, la trasmissione del segnale viene effettuata mediante un router UMTS modello UR5 della Conel, collegato via Ethernet con la GAIA2. La stazione trasmette mediante una scheda TIM (*machine to machine*) ed è stata registrata con DNS dinamico ed è pertanto interrogabile sia via web, sia mediante il software di acquisizione.

Le Figure 3.1.5 e 3.1.6 illustrano le condizioni di rumorosità e gli effetti di amplificazione locale ai due siti di nuova installazione. In entrambi i casi, si notano effettivi miglioramenti rispetto alle misure effettuate durante la ricerca siti, grazie soprattutto alla installazione dei sensori nei loro pozzetti definitivi.

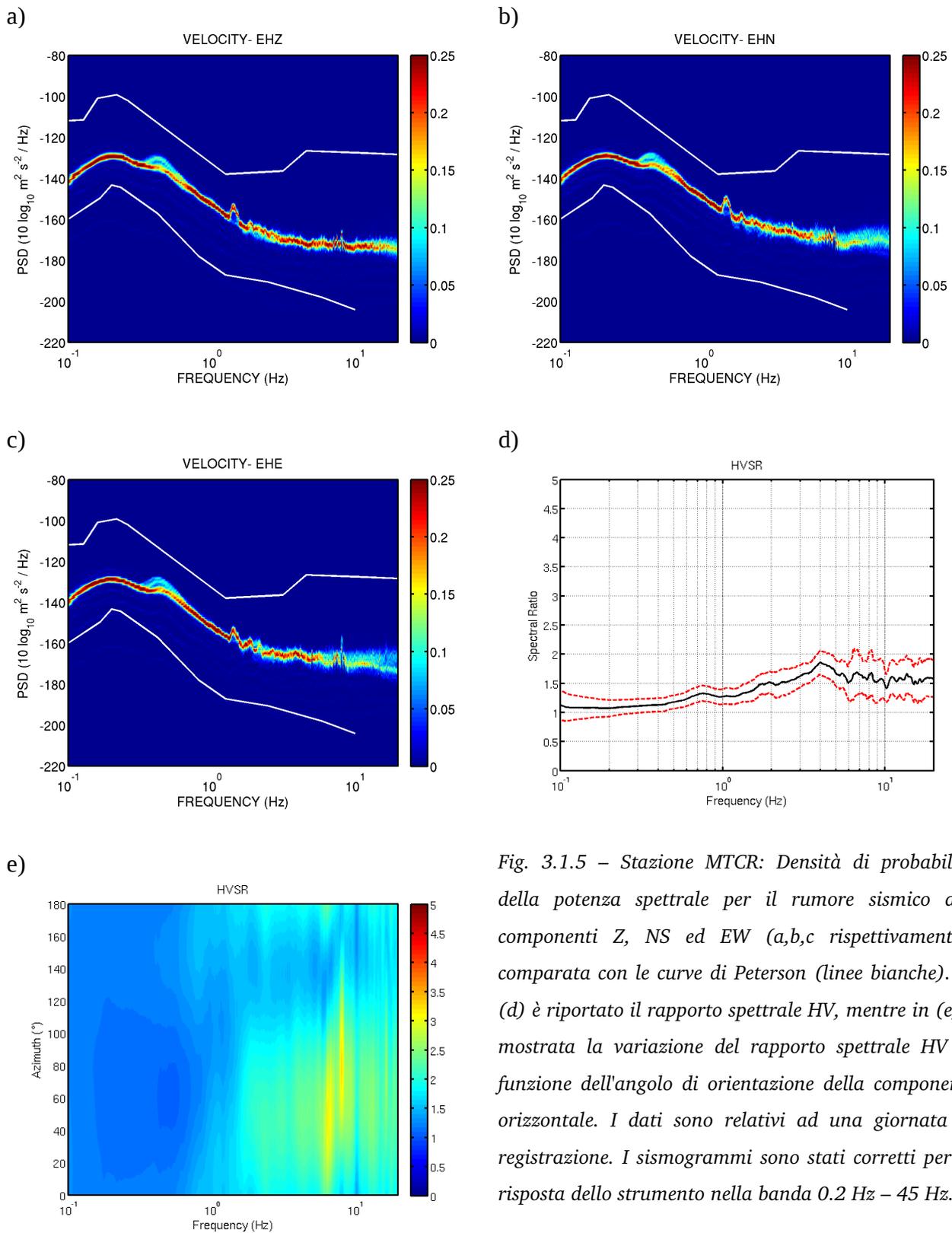


Fig. 3.1.5 – Stazione MTCR: Densità di probabilità della potenza spettrale per il rumore sismico alle componenti Z, NS ed EW (a,b,c rispettivamente), comparata con le curve di Peterson (linee bianche). In (d) è riportato il rapporto spettrale HV, mentre in (e) è mostrata la variazione del rapporto spettrale HV in funzione dell'angolo di orientazione della componente orizzontale. I dati sono relativi ad una giornata di registrazione. I sismogrammi sono stati corretti per la risposta dello strumento nella banda 0.2 Hz – 45 Hz.

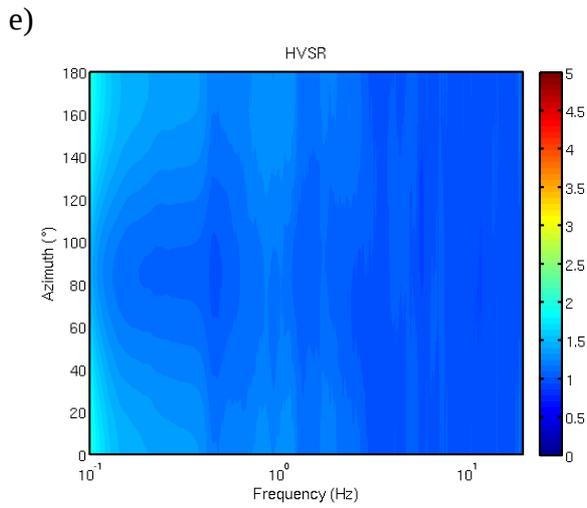
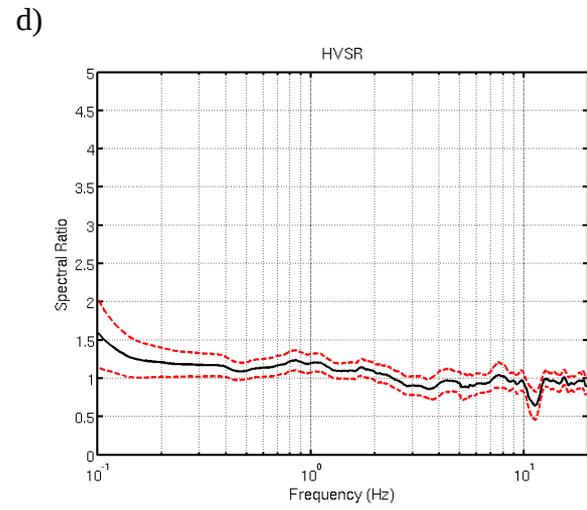
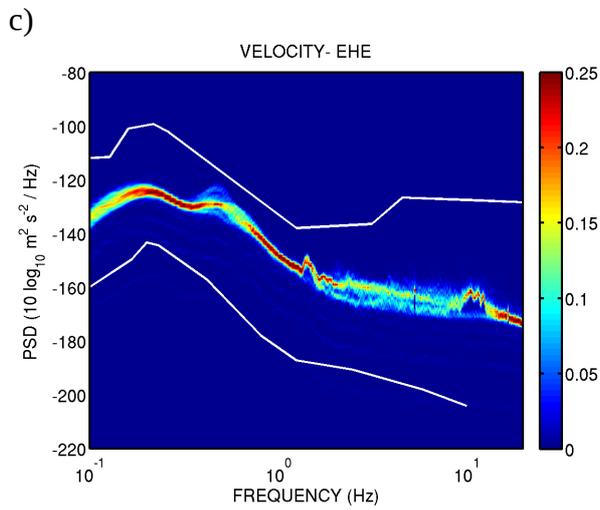
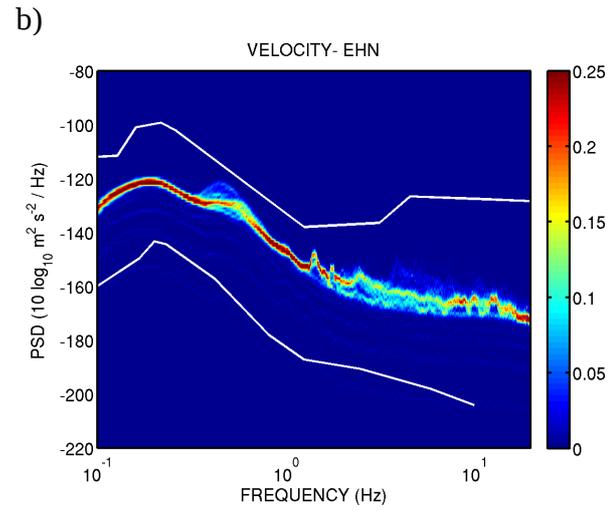
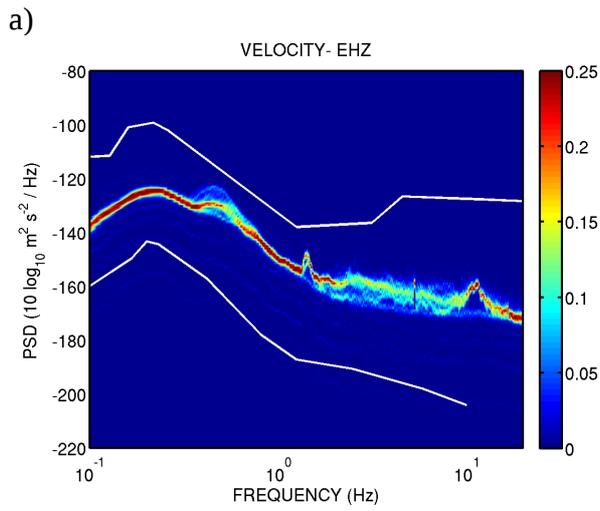


Fig. 3.1.6 – Lo stesso che in Fig. 3.1.5, ma per la stazione RUF1.

P3.2. - Relazione tecnica sulle nuove stazioni con esempi di registrazione.

Tutte le stazioni attualmente gestite dalla Prato Ricerche sono centralizzate presso la sala sismica di Prato, secondo differenti modalità di telemetria. Le due stazioni sismiche installate nell'ambito della presente Convenzione sono state integrate nel sistema di monitoraggio esistente del quale, per ragioni di completezza, si fornisce una sommaria descrizione. Il centro di monitoraggio è organizzato sulla base di tre sistemi di acquisizione indipendenti implementati su quattro diversi stazioni di lavoro (WS; v. Fig. 3.2.1):

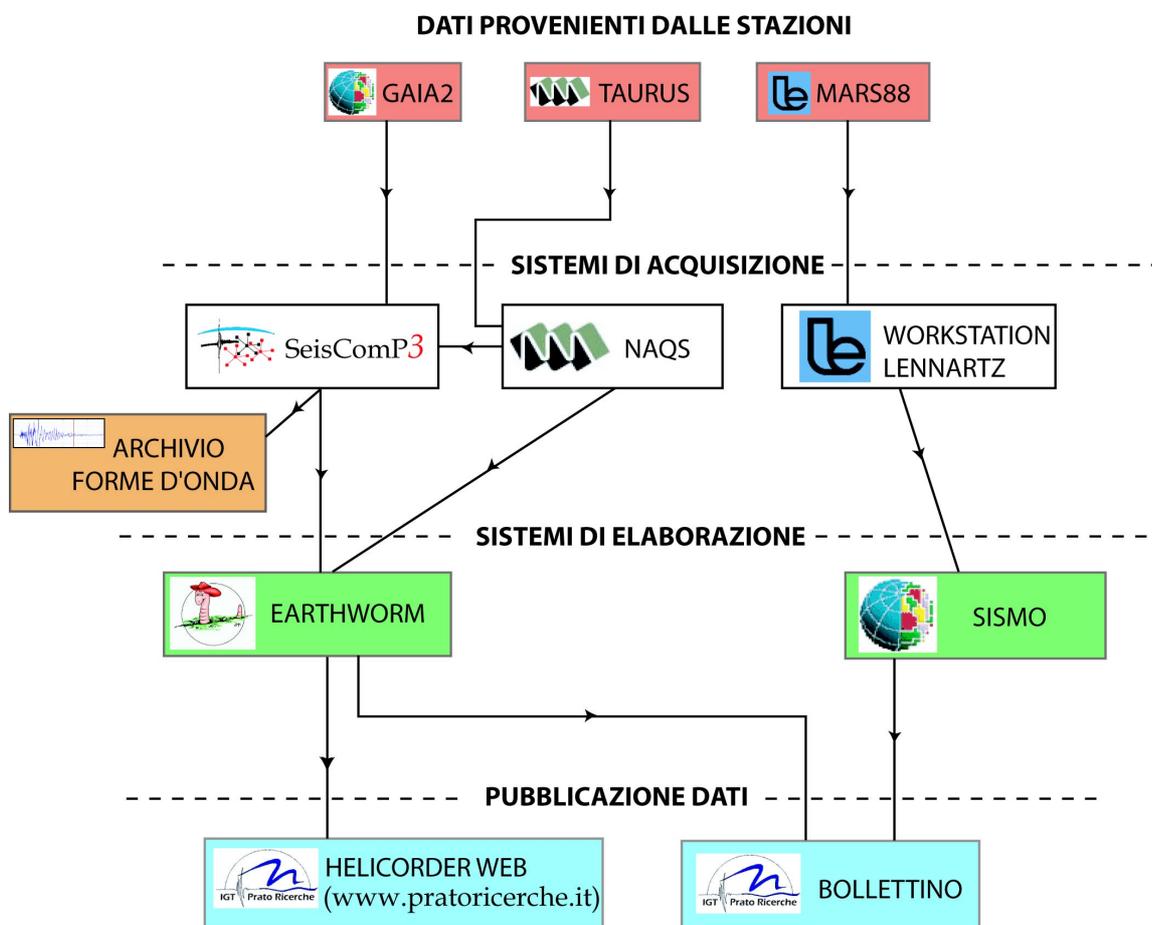


Fig. 3.2.1 – Diagramma di flusso rappresentante le procedure di acquisizione, visualizzazione, analisi ed archiviazione dei dati sismometrici.

1. WS Linux con sistema di acquisizione SeisComp3;
2. WS Windows con sistema di acquisizione Nanometrics-NAQS
3. WS Unix FreeBSD e Linux per la gestione delle stazioni Lennartz – MARS88 .

Questi tre diversi sistemi sono totalmente indipendenti, garantendo quindi una buona ridondanza sulle procedure di acquisizione / registrazione dei dati.

Le stazioni della RSTNO con telemetria in tempo reale (**PTF, SEI, VMG, MTCR e RUF1**) sono acquisite mediante il software SeisComp3, sviluppato nell'ambito del *GEOFON Program* e fornito gratuitamente con GNU Public License (GPL). La sua funzione è quella di interrogare in continuo le stazioni GAI2 le quali rispondono inviando in tempo reale tramite il router UMTS i dati acquisiti. Il software consente l'acquisizione dati tramite modulo *Seedlink*, la loro archiviazione in formato miniSEED, la visualizzazione degli stream in tempo reale, il picking automatico e la localizzazione. All'interno della suite sono presenti anche applicativi diagnostici per valutare lo stato e la qualità delle connessioni.

Tre stazioni equipaggiate con strumentazione Nanometrics, facenti parte di un diverso progetto di monitoraggio sismometrico, sono acquisite dal software NAQS (Nanometrics Acquisition System) ed archiviate su un ring buffer circolare di 24 ore. NAQS, oltre a ricevere i dati dalle stazioni, è in grado anche di verificare la completezza del dato ricevuto e richiedere eventuali pacchetti mancanti. Una volta acquisiti, i dati vengono prelevati da SeisComp3 mediante un apposito modulo ed archiviati definitivamente in formato miniSEED.

Il sistema Lennartz presiede invece alla gestione delle stazioni della RSTNO con telemetria di tipo dial-up (**VISG, BIBN, LMD, PSL, MOCL, BOSL, SCAP**; v. Fig. 3.1.1). A partire dal 2006, forme d'onda e dati parametrici per i terremoti registrati da queste stazioni sono raccolti nel database della Prato Ricerche e pubblicati su un database on-line. La modalità di consultazione del database prevede la possibilità di estrarre i dati relativi alla localizzazione degli eventi, alle letture dei tempi di arrivo, ed alle forme d'onda digitali nei formati SAC, MSEED ed ASCII. Il database è accessibile all'indirizzo <http://dbrstno.pratoricerche.it>.

Accanto a SeisComp3 è stata attivata una istanza *Earthworm* che provvede a localizzare e visualizzare gli eventi in tempo reale (Fig. 3.2.2). *Earthworm* è un software open source per l'acquisizione e l'analisi di dati sismici sviluppato dall'USGS fin dagli anni '90. L'architettura del software è modulare, permettendo quindi la possibilità di implementazione delle diverse funzioni senza necessità di riprogrammare l'ambiente di lavoro già operativo. Inoltre, in caso di arresto di un modulo, questo viene automaticamente riavviato dal modulo centrale, garantendo così una stabilità eccezionale a tutto il sistema. La versione

utilizzata presso la Prato Ricerche è la 7.5 e tra i numerosi moduli disponibili sono stati attivati tutti quelli necessari al prelevamento dei dati dai sistemi SeisComp3 e NAQS, al picking automatico, alla localizzazione, alla visualizzazione delle tracce, ed infine quelli necessari alla pubblicazione su pagina web dedicata dei dati acquisiti. Earthworm gestisce i dati archiviandoli temporaneamente su un ring buffer circolare la cui dimensione è fissata a priori dall'utente, nel nostro caso è stato scelto di utilizzare un buffer di 24 ore.

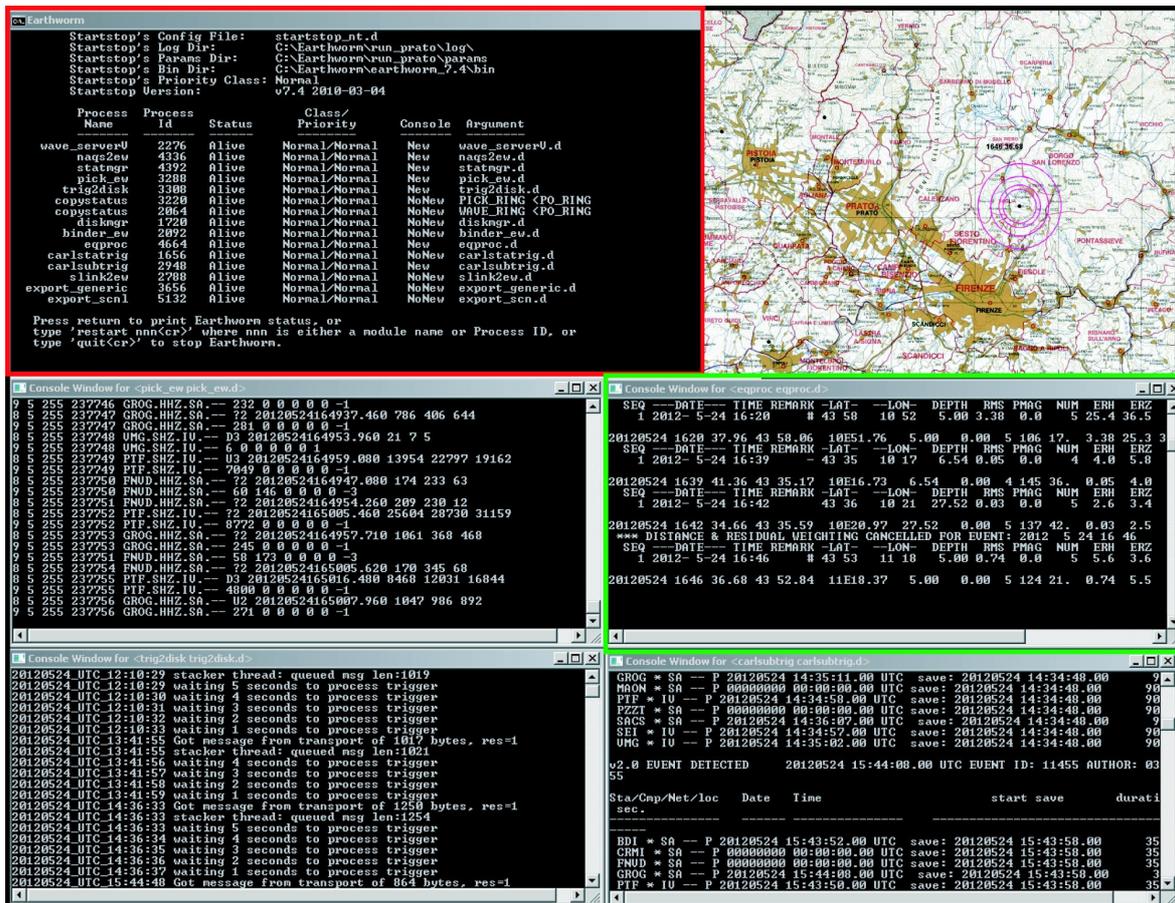


Fig. 3.2.2 – Moduli EarthWorm operativi e mappa per la rappresentazione delle localizzazioni.

Per la visualizzazione delle tracce viene utilizzato l'applicativo SWARM distribuito insieme ad Earthworm e sviluppato in ambiente Java. Le possibilità di visualizzazione sono molteplici e consentono la rappresentazione di tutto il ring buffer stazione per stazione e canale per canale secondo una rappresentazione di tipo *helicopter* (Fig. 3.2.3), oppure la visualizzazione continua di un numero arbitrario di canali.

Le serie temporali acquisite da EarthWorm vengono poi sottoposte ad una procedura di discriminazione in tempo reale basata sull' algoritmo STA/LTA, ovvero sull'analisi del

rapporto fra le ampiezze medie del segnale calcolate su finestre di breve (Short-Term) e lunga (Long-Term) durata, rispettivamente.

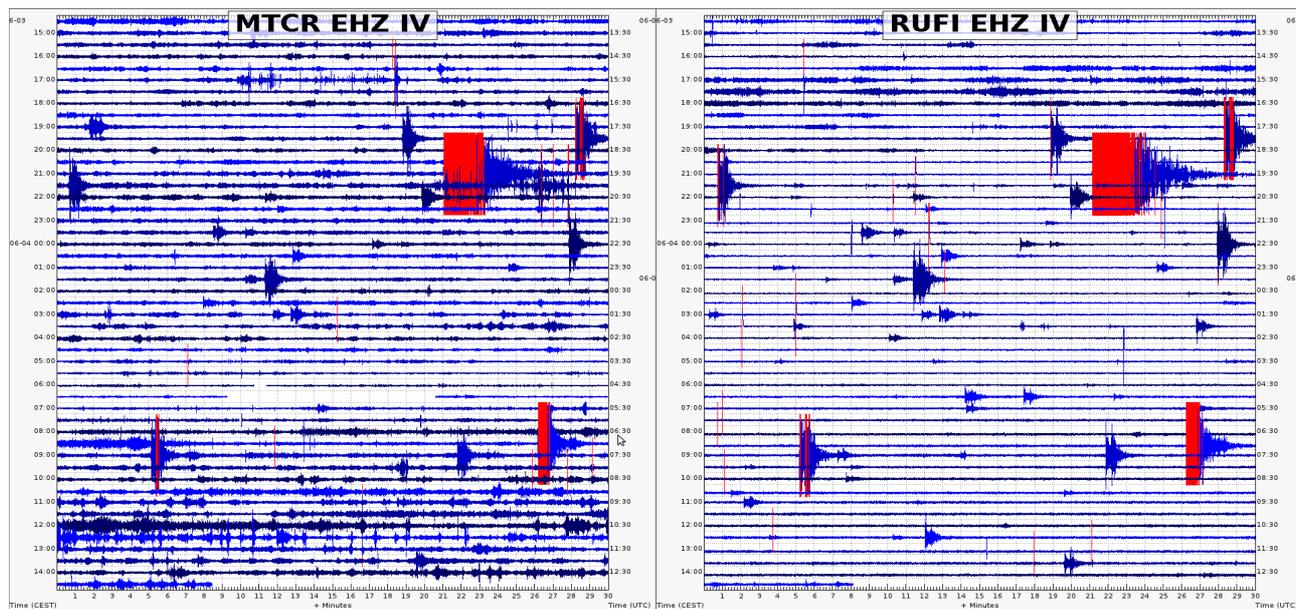


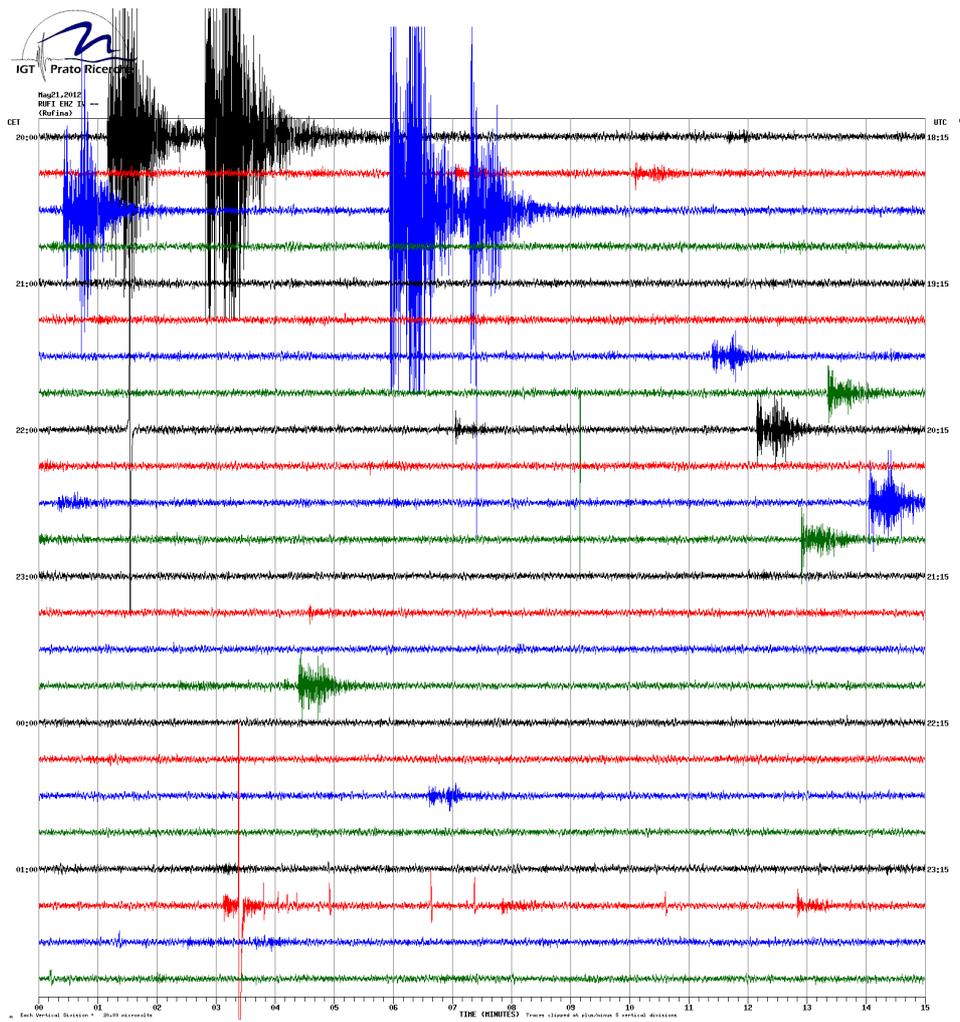
Fig. 3.2.3 – Tracciato giornaliero per la componente verticale delle stazioni MTCR e RUF1. Le tracce iniziano il giorno 3 Giugno 2012, alle 14:30 locali (12:30 UTC). Le aree tinte in rosso indicano le porzioni di segnale per le quali il sistema automatico di triggering ha dichiarato un evento.

I tempi di arrivo delle fasi P individuati da questa procedura sono poi utilizzati per una localizzazione in tempo reale mediante il codice *Hypoinverse* appositamente modificato per operare entro l'istanza EarthWorm. Questa prima localizzazione viene sempre rivista dall'operatore in sala sismica che provvede in ogni caso a confrontarla con quella ufficiale dell'INGV. Successivamente, i segnali di tutte le stazioni della rete locale sono poi integrati per procedere con la lettura manuale dei tempi di arrivo, e la conseguente rilocalizzazione mediante Hypoellipse. La procedura di discriminazione e localizzazione in tempo reale, tuttavia, è ancora in fase di prova. La corretta calibrazione dei vari parametri, soprattutto per quanto concerne l'algoritmo di *triggering*, richiede infatti una accurata verifica su un gran numero di eventi di diverse magnitudo e differenti distanze epicentrali, comportando pertanto l'estensione del monitoraggio su periodi sufficientemente estesi. Le tracce sismiche acquisite dalle stazioni di nuova installazione sono pubblicate sul sito web della Prato Ricerca all'interno di una [pagina riservata messa a disposizione dell'Università e dell'Amm.ne Regionale](http://www.pratoricerche.it/EW_tracce/helicorder/welcome.html), con aggiornamento automatico ogni due minuti (Fig. 3.2.4:

http://www.pratoricerche.it/EW_tracce/helicorder/welcome.html)



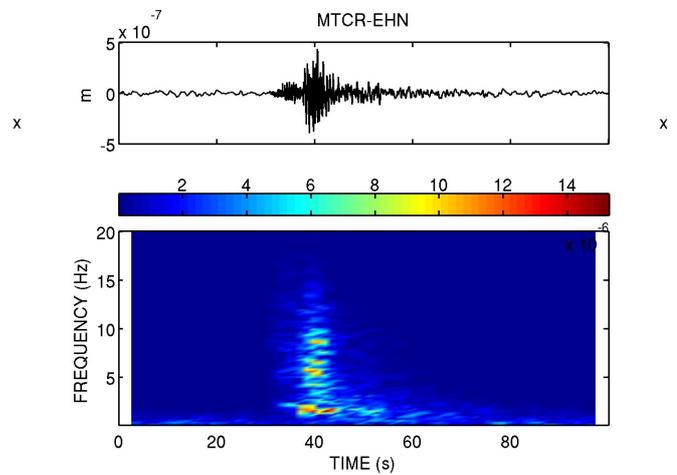
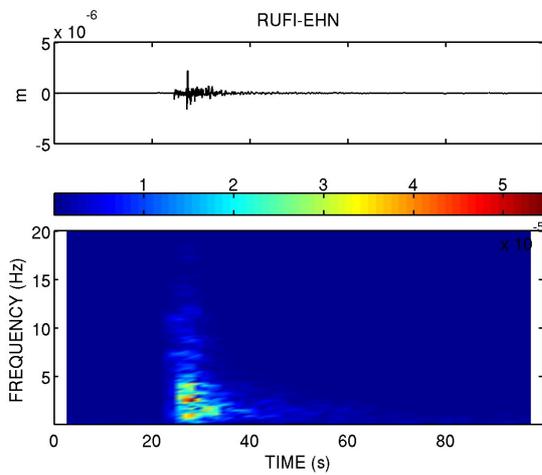
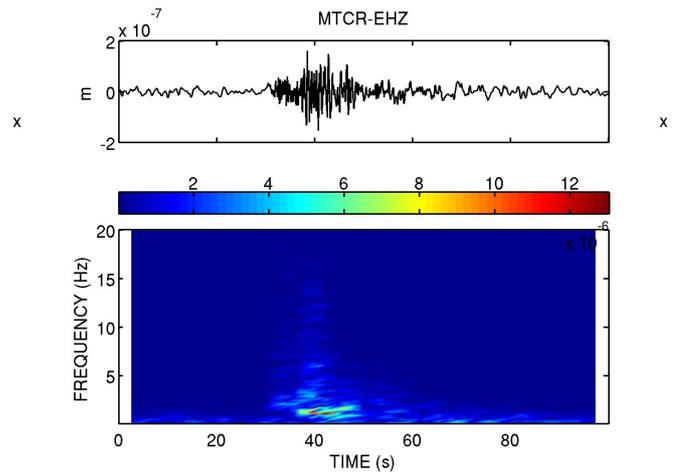
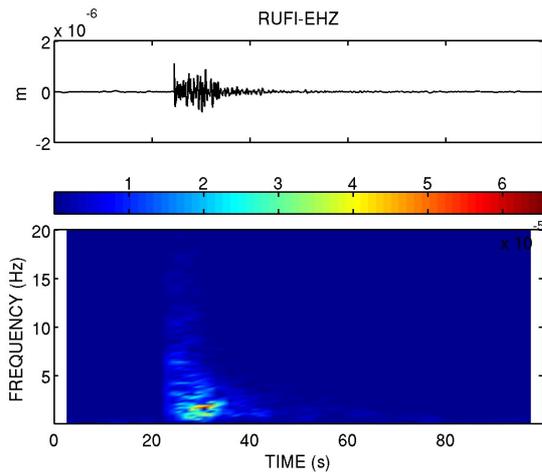
a)

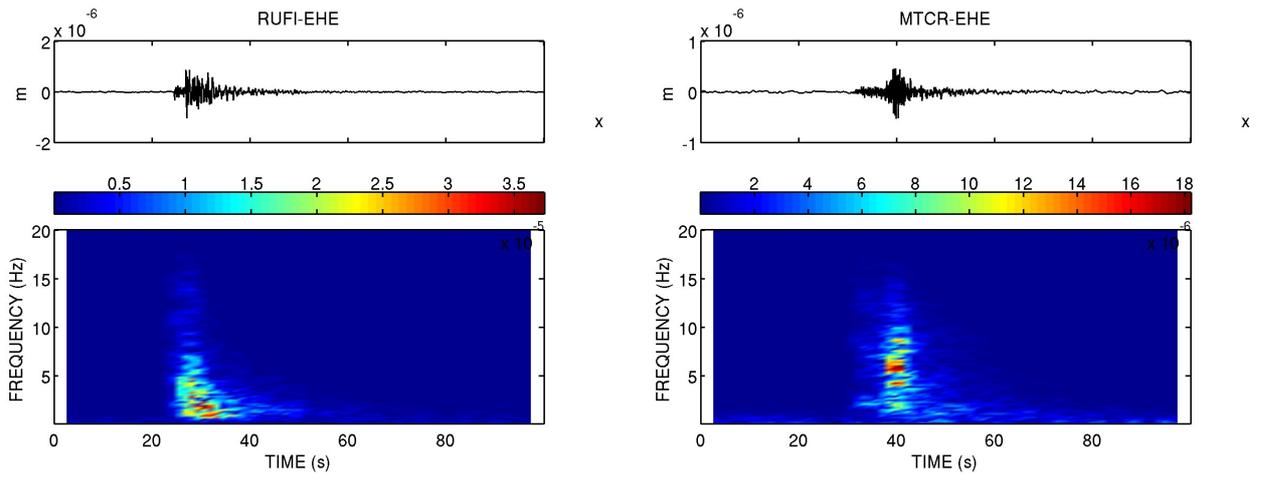


b)

Fig. 3.2.4 – (a) Schermata di benvenuto alle pagine di visualizzazione dei tracciati sismici. (b) tracciato tipo

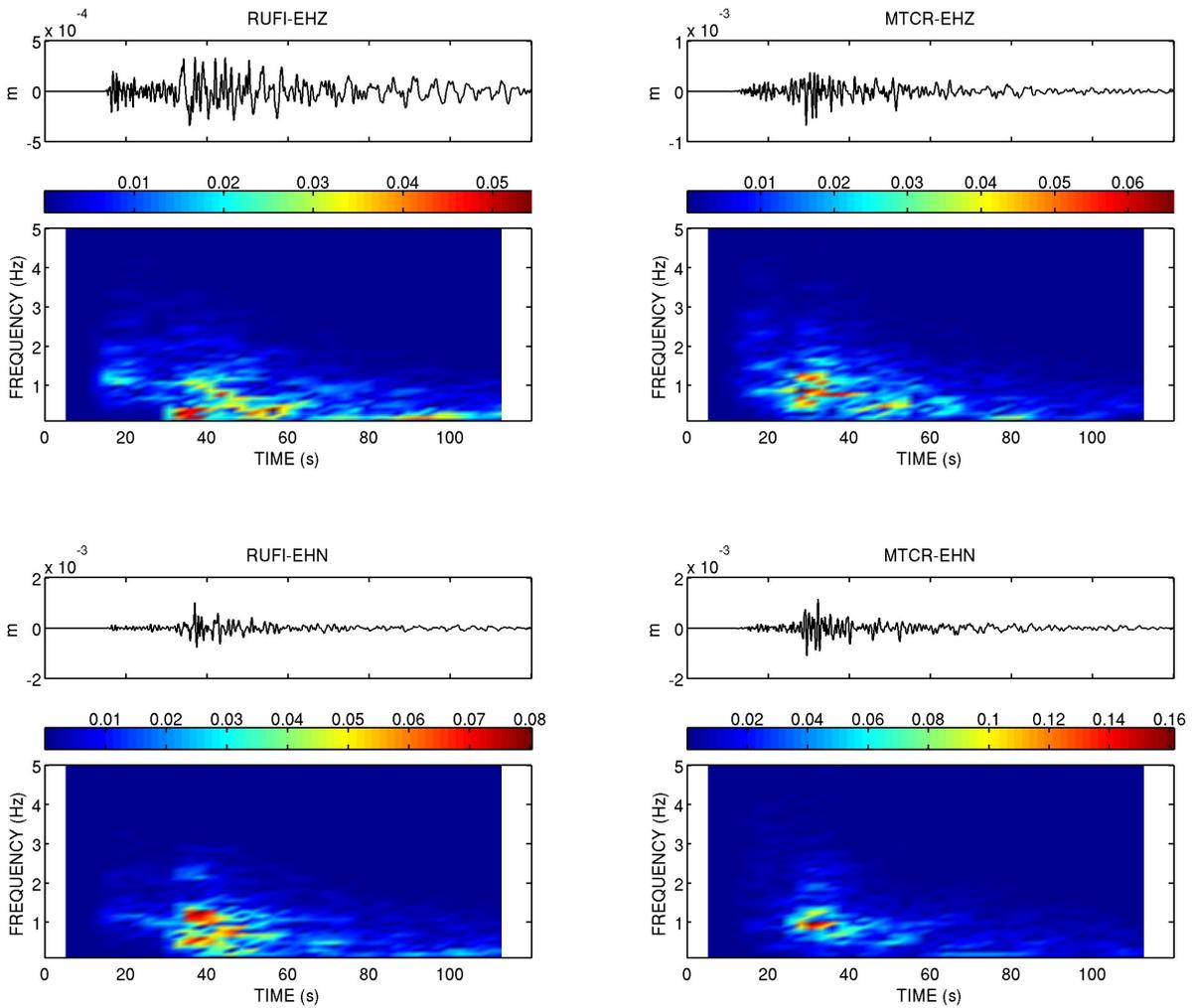
'helicorder' con 6 ore di tracciato sismico, visualizzato in tempo quasi-reale (aggiornamento ogni due minuti). Questo esempio si riferisce alla componente verticale della stazione RUF1, con inizio alle 12:00 UTC del 10 Giugno 2012. Gli orari riportati sull'asse sinistro e destro del grafico si riferiscono al tempo locale (UTC+2) ed universale, rispettivamente.

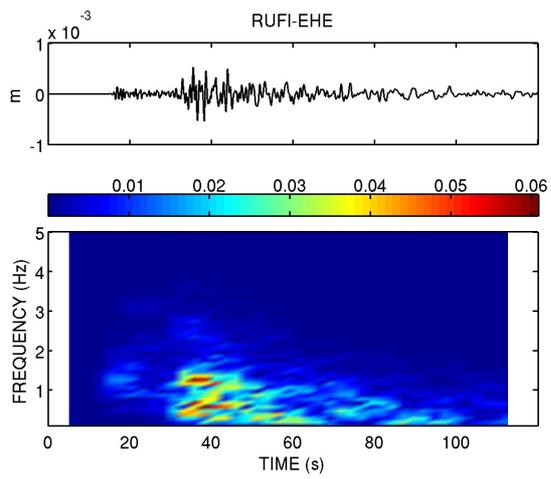




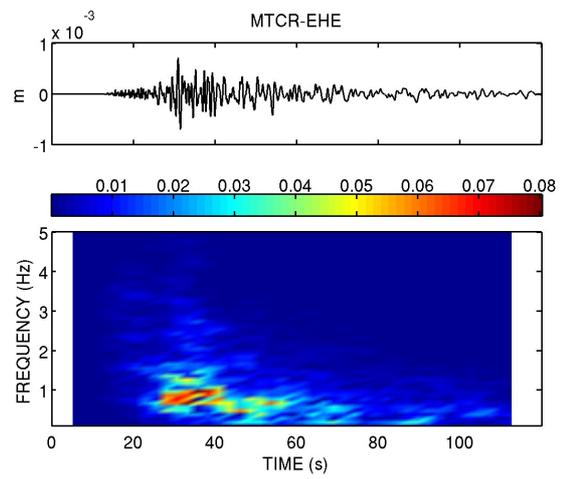
D = 51.3 km

Fig. 3.2.5 – Evento sismico del 19 Maggio 2012 ore 17:35 UTC, $M=1.9$ (Comune di Vicchio). Registrazione dello spostamento del suolo alle 3 componenti della stazione RUF (colonna di sinistra) e MTCR (colonna di destra), con relativi spettrogrammi. Gli spettrogrammi sono stati calcolati utilizzando una finestra mobile di 5.12 s con sovrapposizione del 75%. La scala colorata esprime la densità di ampiezza spettrale in $m/s/Hz$. Le scritte in basso indicano la distanza epicentrale.





D = 119.3 km



D = 98.0 km

Fig. 3.2.6 – Lo stesso che in Figura 3.2.5, ma per l'evento sismico del 20 Maggio 2012 ore 02:03 UTC, $M=5.9$ (Pianura Padana). Le finestre utilizzate nel calcolo degli spettrogrammi sono di 10.24 s.

Le Figure 3.2.5 e 3.2.6 illustrano ulteriori esempi di registrazione per le due nuove stazioni, corredate delle relative rappresentazioni tempo-frequenza (spetrogrammi). Infine, la Figura 3.2.7 riporta un esempio di evento sismico locale registrato a tutte le stazioni della rete.

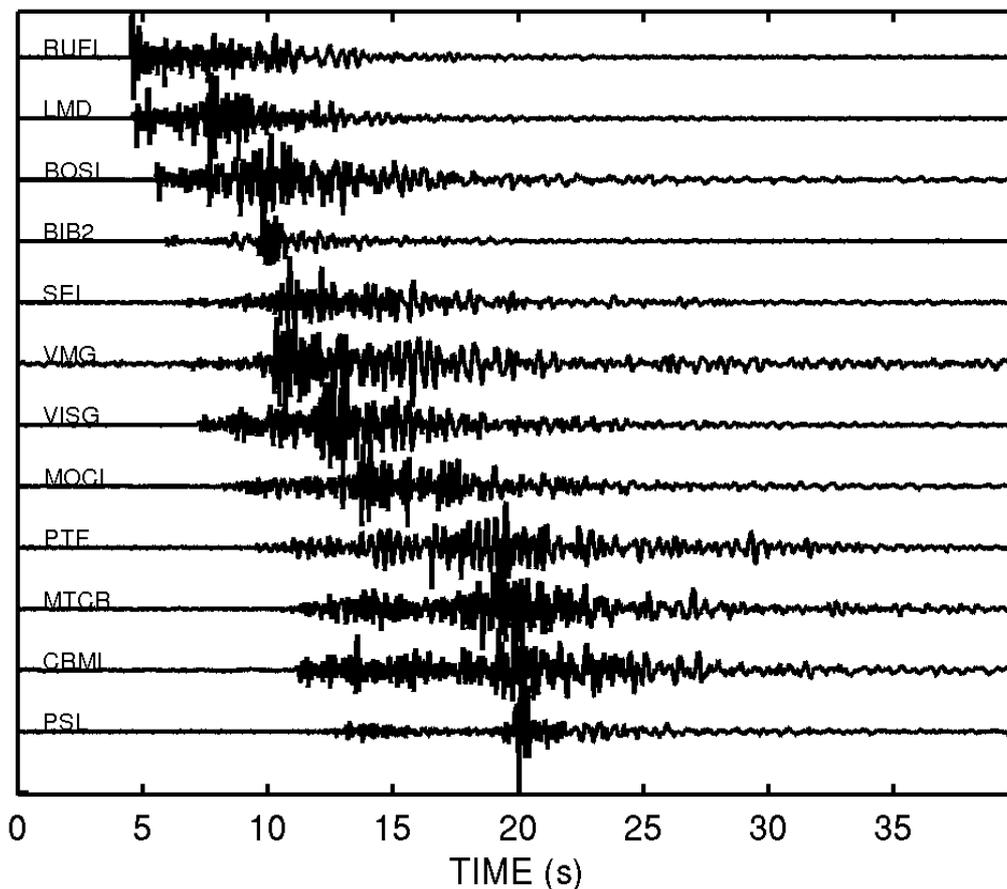


Fig. 3.2.7 – Registrazione della componente verticale del moto del suolo (velocità) a tutte le stazioni della RSTNO per lo stesso evento di Figura 3.2.5. Ciascuna traccia è normalizzata alla sua massima ampiezza. I segnali sono stati filtrati nella banda 1-15 Hz utilizzando un filtro di Butterworth a 2 poli senza ritardo di fase. L'inizio delle registrazioni è alle 17:34:59 UTC del 19 Maggio 2012.

4. Obiettivo (4): Interpretazione dei dati ai fini dello studio della sismicità.

Questa sezione è interamente dedicata all'analisi dei dati di catalogo della RSTNO ed a quelli di nuova acquisizione, al fine di migliorare lo stato delle conoscenze sulla sismicità

dell'area oggetto di studio. I bollettini prodotti della RSTNO sono prima stati integrati con quelli della Rete Sismica Nazionale (RSNC), per la creazione di un archivio omogeneo di tempi d'arrivo per il periodo 2005-attuale. Su questa base si è quindi proceduto con la rilocalizzazione di precisione utilizzando le nuove strutture di velocità e metodi ad alta risoluzione basati sulla stima dei tempi differenziali alle diverse stazioni. Una prima definizione delle principali aree sismogenetiche è stata ottenuta mediante la produzione di mappe di densità ipocentrale e di rilascio energetico. Una immagine di maggior dettaglio sulle principali faglie attive e sul campo di sforzi agente nelle varie zone sismiche è invece ottenuta mediante la produzione di meccanismi focali per i terremoti di maggior entità sia per il catalogo passato che per quello ottenuto nell'ambito della presente Convenzione.

P4.1- Mappa delle localizzazioni

Integrazione dei cataloghi RSTNO-RSNC

In sede di Relazione Intermedia (P2.2) si sono descritte le procedure seguite per l'integrazione del catalogo della RSTNO con quello della RSNC, al fine di ottenere un set consistente di letture dei tempi di arrivo da utilizzare per la definizione di un modello di velocità di minimo *misfit*. Abbiamo poi utilizzato questo modello per la rilocalizzazione del catalogo integrato per il periodo 2005-2010. I risultati di questa procedura sono mostrati in Fig. 4.1.1. Con l'eccezione di pochi terremoti a profondità intermedia ($35 < z < 90$ km) localizzati tra Pistoia e Lucca, la sismicità crostale profonda (punti rosso scuro in Fig. 4.1.1) si verifica solo sul fronte esterno della catena appenninica, verso la pianura Padana. Al contrario, la sismicità superficiale (punti blu in Fig. 4.1.1) occorre sia sul fronte esterno che su quello interno della catena, quest'ultimo caratterizzato comunque da una maggiore abbondanza di ipocentri. Nella porzione centrale dell'area di studio (asse Pistoia-Bologna) la distribuzione epicentrale mostra una evidente deviazione muovendosi in direzione SW lungo l'asse della catena. Tale deviazione è particolarmente evidente considerando la distribuzione dei terremoti crostali profondi ($z > 20$ km) sul fronte esterno. Lo stesso vale per l'inviluppo degli epicentri sul lato tirrenico, che mostra una marcata discontinuità al bordo NW del bacino del Mugello. L'*offset* nella distribuzione dei terremoti profondi è di circa 30 km lungo la direzione NNE, ed interessa un'area larga circa 40 km, nella quale osserviamo un tasso minore di sismicità sia superficiale che profonda. Tale area comprende

le valli del Reno e del Sillaro, lungo il lato adriatico dell'orogene, e la valle del Bisenzio lungo il lato toscano.

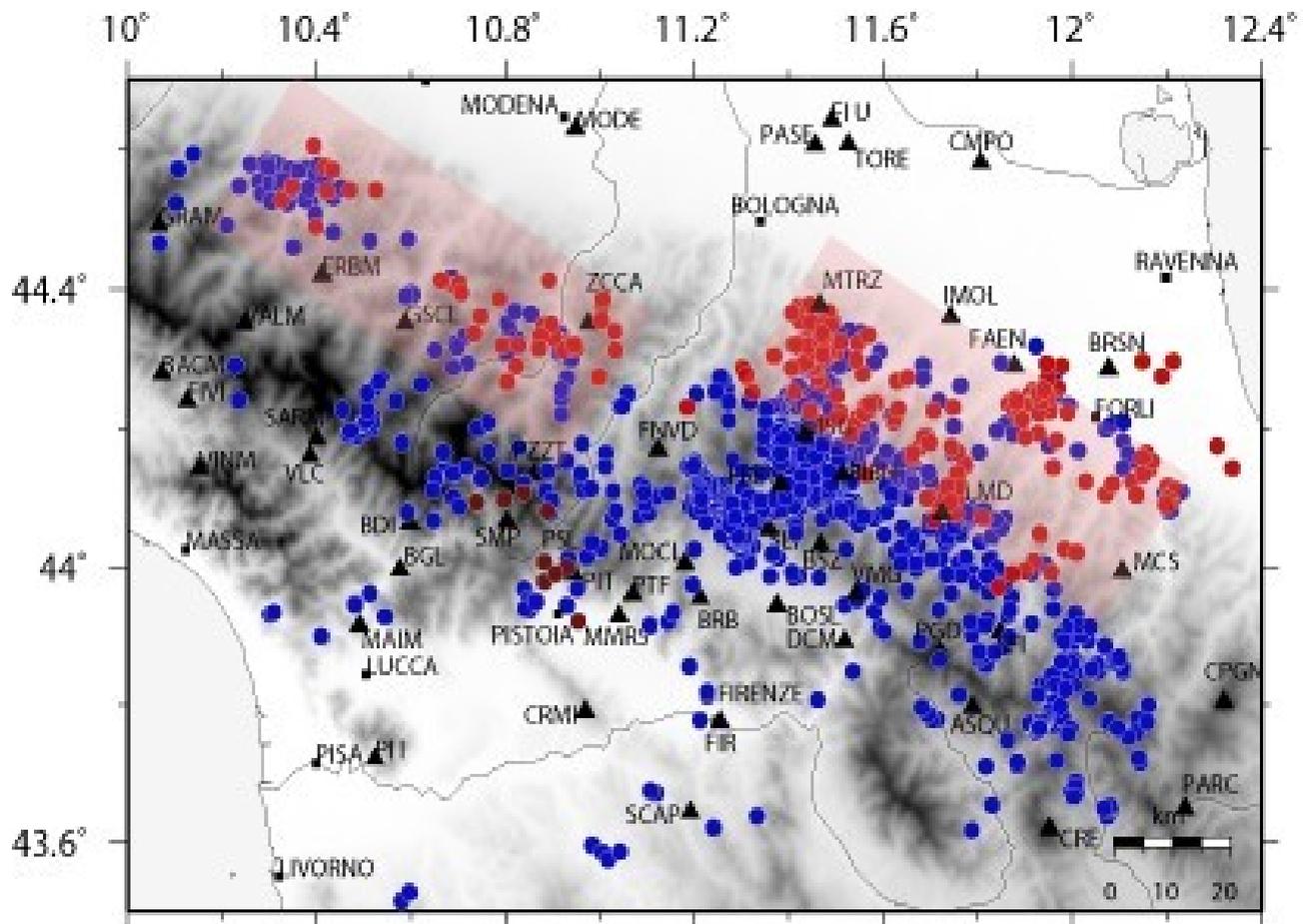


Figura 4.1.1. Rilocalizzazione della sismicità nell'Appennino Settentrionale utilizzando il catalogo integrato RSNC-RSTNO per il periodo 2005-2010, ed il modello di velocità di minimo misfit descritto nella Relazione Intermedia (Tavola 2.2.2). I triangoli neri indicano le stazioni utilizzate per le localizzazioni. I pallini rossi e blu indicano ipocentri superficiali ($z < 20$ km) e profondi ($z > 20$ km), rispettivamente. I pallini rosso scuro nell'area Pistoia-Lucca rappresentano ipocentri profondi ($35 < z < 90$ km).

Sismicità recente e durante il periodo della convenzione (2011-2012)

La distribuzione della sismicità più recente (2011-attuale) conferma le caratteristiche emerse dall'analisi dei cataloghi integrati. In tale periodo, le aree più attive sono state l'Appennino Pistoiese, l'area a Nord di Firenzuola (aree di Monghidoro e Monterezio), ed il versante adriatico dell'Appennino Tosco-Romagnolo (S. Sofia - Bagni di Romagna), luogo di una importante sequenza sismica occorsa nell'estate del 2011 (Fig. 4.1.2).

Durante il periodo della convenzione (Luglio 2011-attuale) gli eventi più significativi ($M > 2.5$) verificatisi sono riportati in Tabella 4.1.1.

Tabella 4.1.1 – Parametri focali per i terremoti più significativi occorsi durante il periodo della convenzione. Per gli eventi riportati in grassetto è stato possibile calcolare anche i meccanismi focali (v. Fig. 4.2.3)

	Data	Tempo Origine (UTC)	Lat (°N)	Lon (°E)	Prof (km)	Mag (M_L)	Comune
1	2012-04-27	00:59:44.000	43.999	11.247	8.9	2.6	Barberino M.llo
2	2012-04-13	22:13:56.000	44.075	10.882	6.7	3.3	S.Marcello P.se
3	2011-12-19	03:42:21.000	44.118	10.865	8.9	2.6	S.Marcello P.se
4	2011-11-22	18:54:34.000	44.163	10.929	6.7	2.5	Porretta T.me
5	2011-11-22	16:32:10.000	44.175	10.945	7.4	2.5	Porretta T.me
6	2011-11-22	14:47:32.000	44.130	10.967	8.1	2.5	Porretta T.me
7	2011-11-02	19:15:50.000	44.151	11.421	8.7	2.8	Firenzuola
8	2011-08-20	20:02:48.050	44.075	10.893	3.9	2.9	S.Marcello P.se

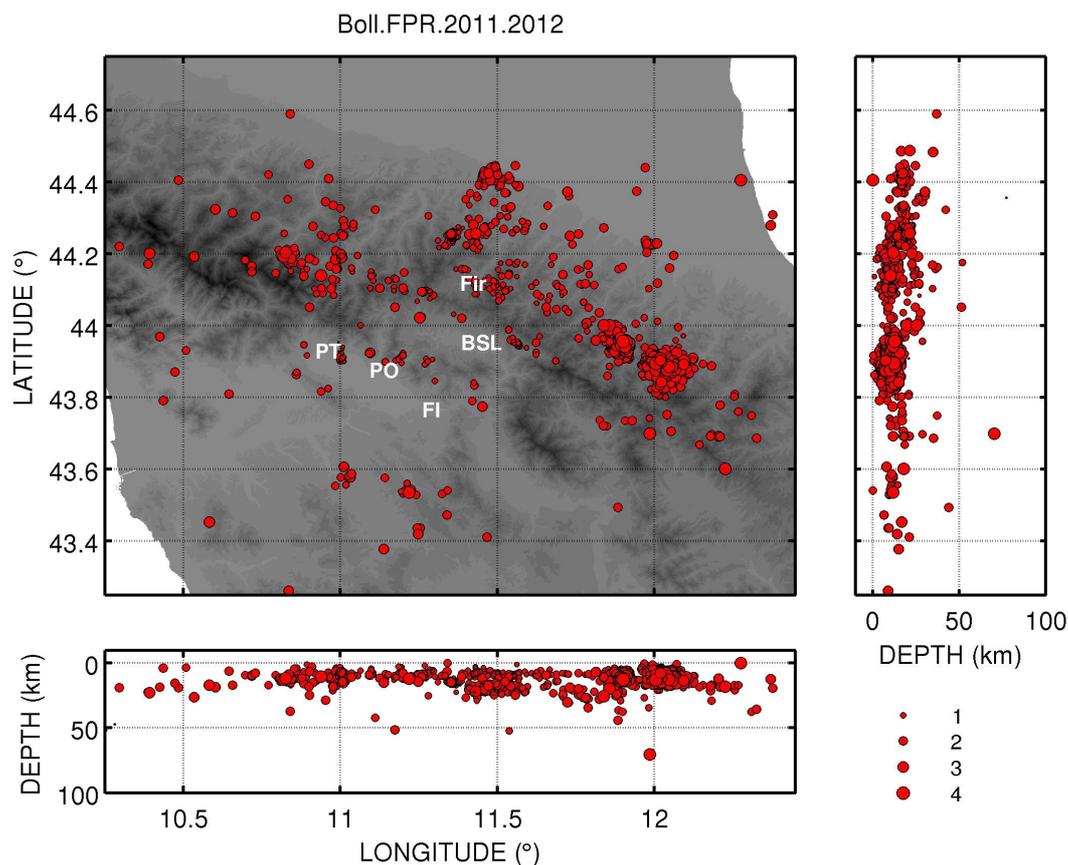
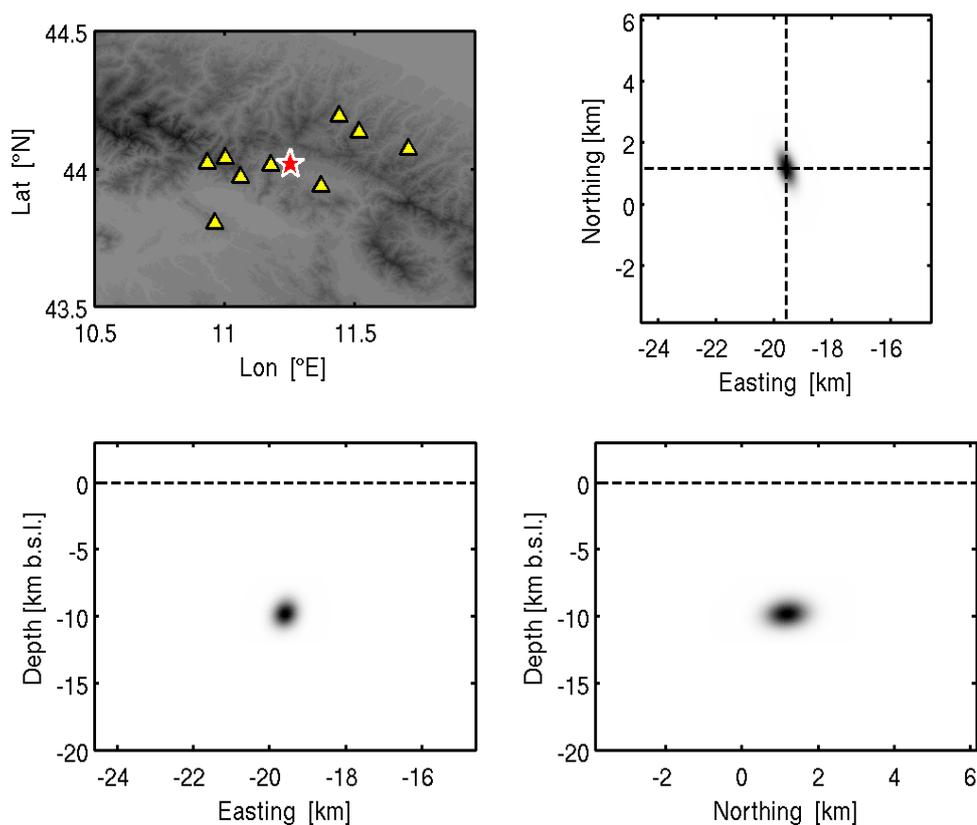


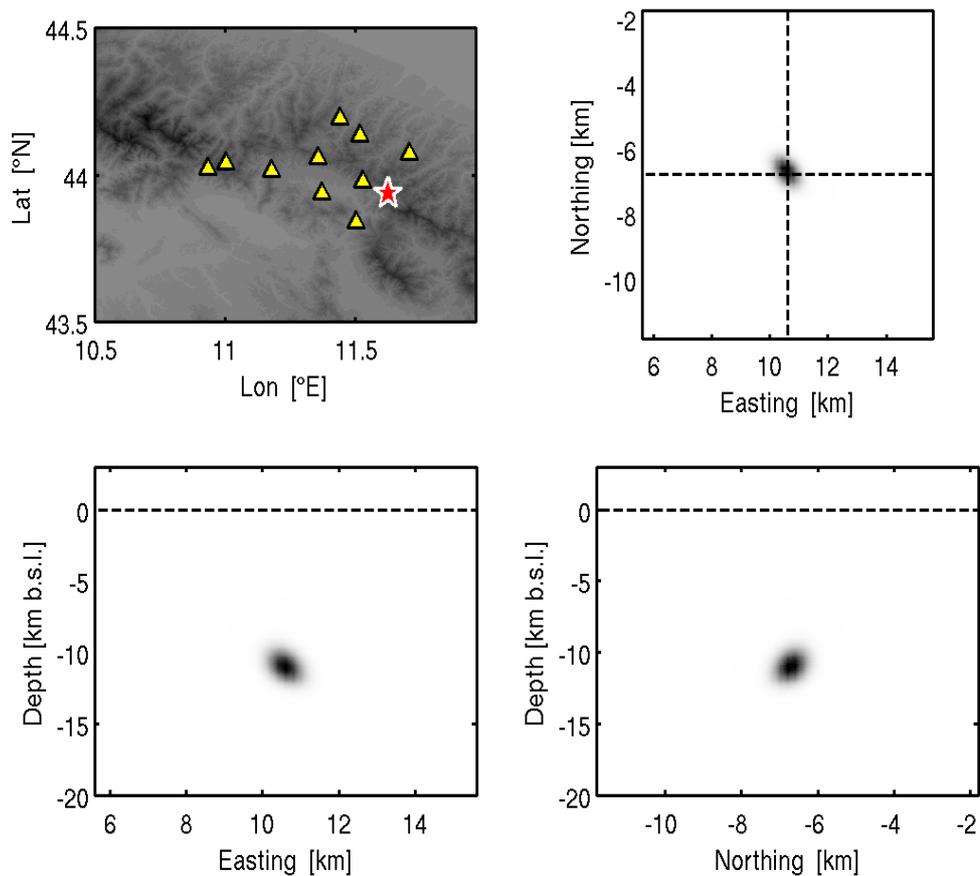
Fig. 4.1.2 – Localizzazione della sismicità per il periodo 2011-attuale, Le dimensioni dei simboli sono proporzionali alla magnitudo, secondo la scala riportata in basso a destra. Le scritte bianche indicano alcuni centri abitati utilizzati per riferimento: FI, Firenze; PT, Pistoia; PO, Prato; BSL, Borgo San Lorenzo; Fir, Firenzuola.

Esempi di localizzazione ottenute utilizzando anche le nuove stazioni sono riportati nelle Figure 4.1.3 e 4.1.4. Questi due eventi hanno avuto origine alle estremità WNW (Fig. 4.1.3) e ESE (Fig 4.1.4) del bacino del Mugello, e sono stati registrati da tutte le stazioni della RSTNO. Per entrambe le localizzazioni, gli errori (99% di confidenza) sono nell'ordine delle centinaia di metri per le 2 coordinate orizzontali, e del chilometro per la coordinata verticale. I residui di localizzazione (RMS) sono di pochi decimi di secondo, a conferma della bontà del modello di velocità adottato.



DATE	ORIGIN	LAT	LONG	DEPTH	MAG	NO	GAP	RMS	ERH	ERZ
120427	005944.60	44°0.62	11°15.28	9.85	2.60	18	120	0.16	0.5	1.3

Fig. 4.1.3 – Localizzazione in mappa e lungo due sezioni verticali orientate NS e EW passanti per l'ipocentro per un recente sisma di magnitudo $ML=2.6$ avvenuto nel comune di Barberino di Mugello. Le aree a toni di grigio indicano le probabilità marginali di localizzazione dell'evento; il limite esterno delle zone ombreggiate delimita quel volume che contiene il vero ipocentro con una probabilità del 99%. La tabella in basso riporta i risultati parametrici della localizzazione: DATE: data (aa mm gg); ORIGIN: Tempo origine (hhmmss.ss); LAT,LON: Latitudine N e Longitudine E, rispettivamente; DEPTH: profondità (km); MAG: Magnitudo Locale; NO: numero di tempi di arrivo P e/o S utilizzati per l'inversione; GAP: Gap azimuthale, in gradi sessagesimali; RMS: residuo (scarto quadratico medio) fra tempi predetti ed osservati); ERH, ERZ: errori (in km) orizzontale e verticale, rispettivamente.



DATE	ORIGIN	LAT	LONG	DEPTH	MAG	NO	GAP	RMS	ERH	ERZ
120519	173520.07	43°56.3	11°37.95	11.00	1.90	20	200	0.30	0.4	2.3

Fig. 4.1.4 – Lo stesso che in Fig. 4.1.3, ma per un sisma di magnitudo $ML=1.9$ avvenuto nel comune di Vicchio (FI).

P4.2 – Meccanismi focali.

La Figura 4.2.1 riporta i meccanismi focali da catalogo CMT (Pondrelli et al., 2011), per gli eventi principali occorsi nel periodo 2005-2010. In generale, tutte le strutture attivate sia in catena che ai suoi margini hanno andamento appenninico (NW-SE); tuttavia, appare evidente come i versanti tirrenico e padano della dorsale siano caratterizzati da meccanismi di tipo distensivo e compressivo, rispettivamente.

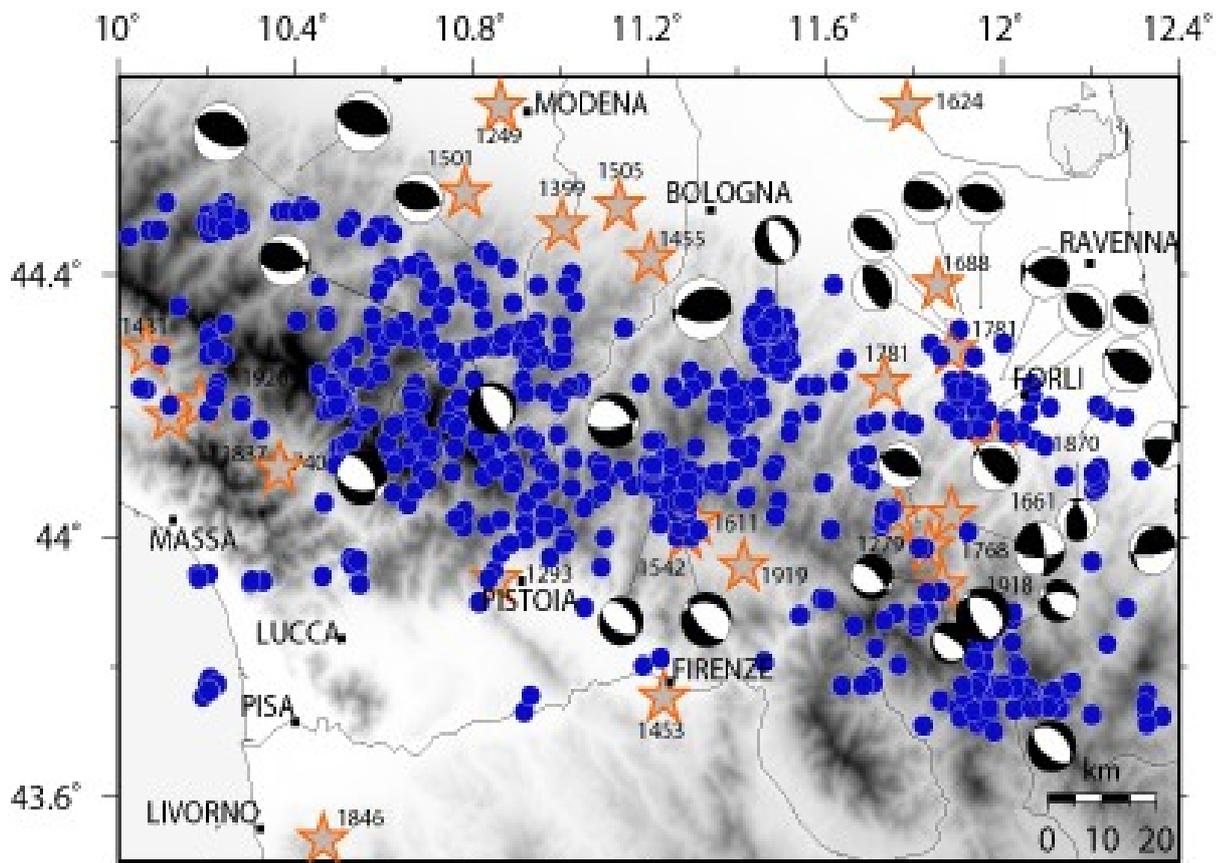
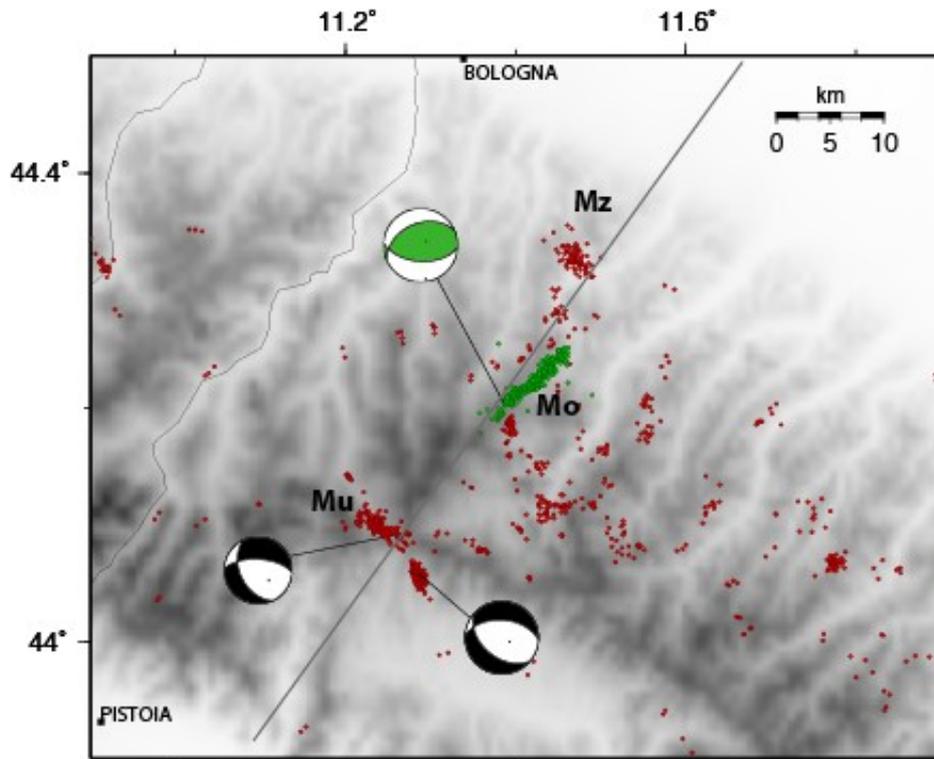
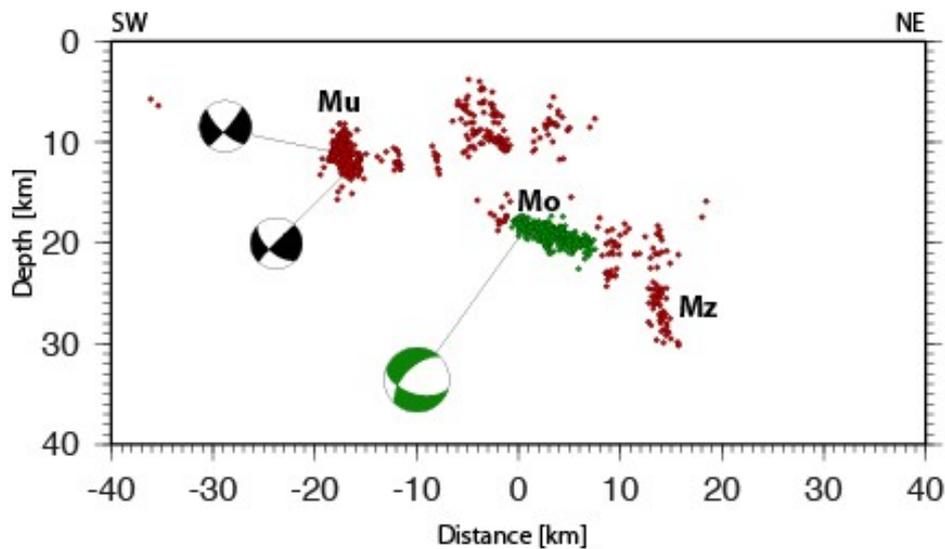


Figure 4.2.1. Mappa dei meccanismi focali da catalogo CMT (Pondrelli et al., 2011), per il periodo 2005-2011. Le stelle rappresentano gli eventi storici con magnitudo equivalente maggiore di 5.

Per ottenere una visione di dettaglio sulla geometria e giacitura delle principali strutture attive, abbiamo provveduto a localizzare nuovamente il catalogo integrato utilizzando il codice HypoDD (Waldhauser e Ellsworth, 2001). Questa immagine ad alta risoluzione riguarda 1188 localizzazioni, con errori formali generalmente nell'ordine del centinaio di metri. La Figura 4.2.2 illustra la distribuzione delle sorgenti associate con la porzione centrale dell'area di studio. Gli epicentri risultano nettamente clusterizzati, e si identificano con chiarezza tre volumi sismogenetici principali. Il primo è associato con le sequenze sismiche del Mugello del 2008 e 2009 (Mu), mentre il secondo è associato con la sismicità più recente (2010-2011) che ha interessato il distretto sismico di Bologna (Monterezio, Mz). A completamento, la Fig. 4.2.2 mostra anche le localizzazioni della sequenza di Monghidoro (Mo) del 2003 (Piccinini et al., 2006).



(a)



(b)

Fig. 4.2.2: (a) Immagine di dettaglio sulla distribuzione della sismicità nell'area di studio (Bacino del Mugello e zone limitrofe). I pallini rossi rappresentano gli ipocentri del catalogo integrato (2005-2010) rilocalizzati utilizzando il metodo HypoDD. I pallini verdi riportano la localizzazione della sequenza di Monghidoro del 2003. I meccanismi focali, calcolati dalle polarità delle onde P utilizzando il codice FpFit (Reasenberg and Oppenheimer, 1985), sono relativi ai terremoti principali delle due sequenze del Mugello (2008 e 2009) e di Monghidoro. La linea marca la sezione verticale riportata in (b). Mu, Mo e Mz si riferiscono alle tre aree sismogenetiche del Mugello, Monghidoro e Montereziio, rispettivamente. (b) Sezione verticale orientata NE-SW (perpendicolare alla catena appenninica) con gli ipocentri rilocalizzati.

Entrambe le sequenze del Mugello sono state caratterizzate da una scossa principale seguita di alcune centinaia di repliche concentrate in pochi giorni (2-5). La prima sequenza è iniziata il 1 Marzo 2008, con una scossa di $M_w=4.6$. La seconda sequenza ha avuto inizio il 14 settembre 2009, con un terremoto di $M_w=4.2$. Gli ipocentri di entrambe le sequenze occupano un volume ristretto ubicato al margine nord-occidentale del bacino. Gli ipocentri del 2008 appaiono meno dispersi rispetto a quelli del 2009; tuttavia gli epicentri di entrambe le sequenze sono allineati abbastanza chiaramente in direzione NNW (Fig. 4.2.2a). Ciò è in accordo anche con le soluzioni dei piani di faglia, che indicano per entrambe le scosse principali faglie normali orientate in direzione appenninica. Nonostante la similarità della direzione di *strike*, la distribuzione degli ipocentri sembra delineare due differenti segmenti della medesima faglia, attivati a profondità leggermente diverse (comunque comprese nell'intervallo 10-13 km) e con immersioni verso direzioni differenti (NE e SW, rispettivamente, per gli eventi del 2008 e del 2009; Fig. 4.2.2b).

Per la sismicità dell'area di Monterezi non è stato possibile ricavare meccanismi focali affidabili. Le profondità ipocentrali di quest'ultima sequenza sono comprese nell'intervallo 20-30 km, che è significativamente superiore rispetto a quello tipicamente osservato sull'asse appenninico e sul lato toscano. La distribuzione degli ipocentri è allungata in senso sub-verticale piuttosto che lungo una struttura sismica planare. Inoltre, la sequenza manca di una scossa principale. Riguardo all'evento di Monghidoro del 2003 ($M_w=5.3$) e della sua sequenza delle repliche, il meccanismo è riconducibile ad un *back-thrust* obliquo con direzione NE ed immersione a NW verso la catena montuosa. Il regime compressivo è evidenziato dal meccanismo focale dell'evento principale. La sismicità è confinata ad una profondità di 15-22 km ed è ben organizzata lungo una struttura obliqua che si estende per circa 10 km (Piccinini et al., 2005).

Infine, La Figura 4.2.3 illustra i meccanismi focali per alcuni degli eventi listati in Tabella 4.1.1. Alcune delle osservazioni effettuate precedentemente sono confermate da questi eventi più recenti. Ad esempio, i due sismi più orientali, con epicentro a NW di Borgo San Lorenzo e a N di Firenzuola, sono caratterizzati da meccanismi focali di tipo distensivo e compressivo, rispettivamente. Ciò è in accordo con quanto descritto in precedenza circa la differenza dei campi di sforzo fra i versanti Toscano (distensivo) e Padano (compressivo) della catena. E' anche da notare come il terremoto a NW di Borgo San Lorenzo sia sostanzialmente co-localizzato con gli eventi della sequenza del 2009 (Fig. 4.2.2), e condivide

con questi il medesimo meccanismo focale. Pertanto, è probabile che questo evento sia attribuibile alla medesima struttura sismogenetica che ha causato le sequenze del 2008 e 2009.

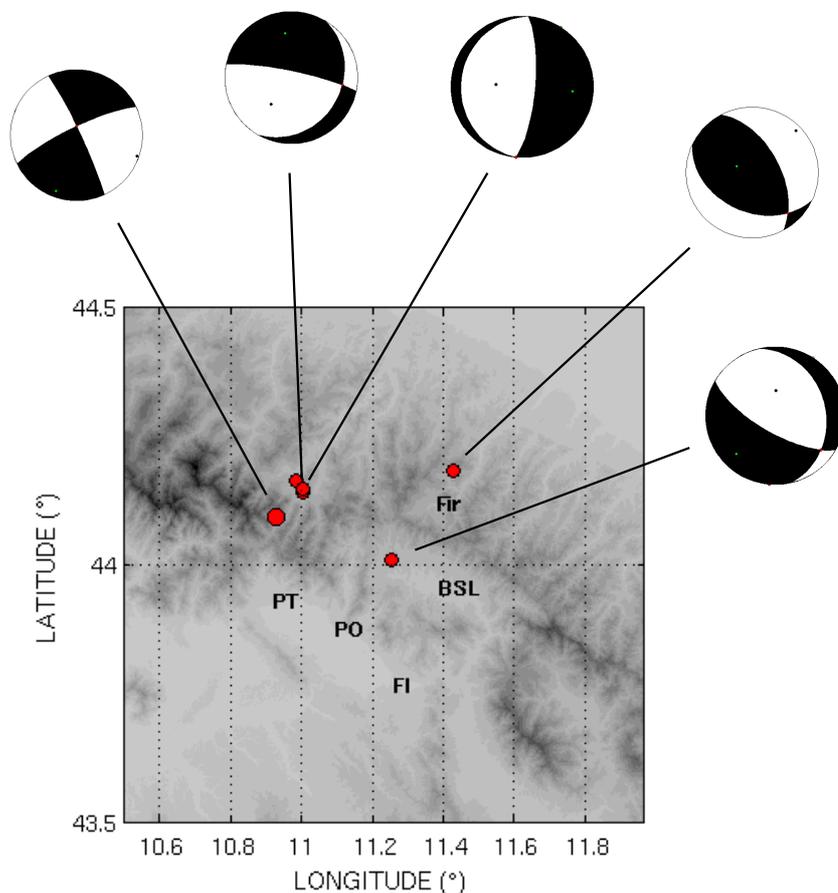


Fig. 4.2.3: Mappa dei meccanismi focali per alcuni dei terremoti più significativi occorsi durante lo svolgimento della Convenzione (Agosto 2011-Maggio 2012). I terremoti analizzati sono quelli indicati in grassetto in Tavola 4.1.1. Le soluzioni focali sono state calcolate dall'inversione delle polarità dei primi arrivi P, mediante il codice FPFIT (Reasenberg and Oppenheimer, 1985).

P4.3 – Mappe delle densità di localizzazione e del rilascio energetico.

La figura 4.3.1 illustra la mappa di densità epicentrale per il periodo 2005-attuale, definita dal numero di epicentri per unità di superficie. La mappa è dominata dalle sequenze sismiche del Mugello (2008-2009), di S. Sofia - Bagni di Romagna (2011), e di Monterezio (2010-2011). Inoltre, viene confermata l'osservazione precedentemente riportata circa il

marcato *offset* in direzione NE del fronte esterno dell'area sismogenetica in corrispondenza della linea Livorno - Sillaro (linea rossa in figura 4.3.1).

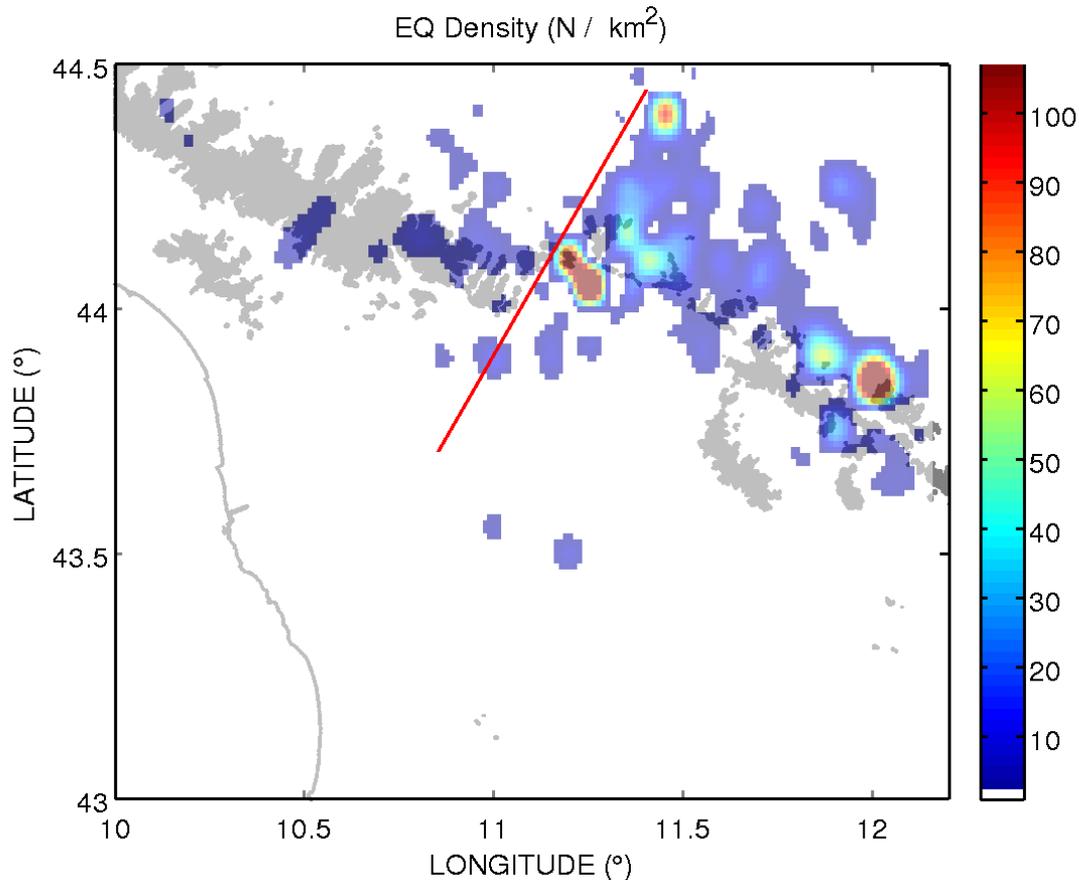


Fig. 4.3.1 : Mappa della densità spaziale degli epicentri (N.ro terremoti / km²) per il periodo 2005-attuale. La linea rossa individua la discontinuità geologica conosciuta come 'Linea Livorno-Sillaro'. Le zone ombreggiate indicano la linea di costa, e le aree la cui quota è maggiore di 1000 m s.l.m..

Per definire il rilascio energetico associato alla sismicità in esame, abbiamo poi calcolato l'energia sismica E (in Joule) di ciascun evento tramite la formula empirica (Lay and Wallace, 1995):

$$\log(E) = 4.8 + 1.5 M$$

dove M è la magnitudo del sisma. La Figura 4.3.2 illustra la mappa del rilascio energetico, definita dalla quantità di energia liberata per unità di superficie. Le zone di maggior rilascio sono sempre quelle associate alle principali sequenze sismiche sopra ricordate. Si nota, inoltre, come la zona corrispondente con l'offset nella distribuzione epicentrale (asse Pistoia-Bologna) sia caratterizzata da un rilascio minore rispetto a quanto invece

riscontrato nelle aree adiacenti. Questa evidenza potrebbe essere interpretata in termini di *gap* sismico, con conseguenti implicazioni per la valutazione della pericolosità locale. Alternativamente, l'ipotesi di una discontinuità strutturale nella placca subdotta (v. la prossima Sezione) potrebbe anche implicare un minore accumulo di sforzo in corrispondenza della zona di svincolo, con accomodamento di buona parte della deformazione mediante scivolamento asismico. Questi argomenti, ovviamente, rappresentano solo delle possibili ipotesi di lavoro, la cui verifica dovrà essere soggetta all'analisi di più ampie basi di dati ed all'integrazione di informazioni di carattere multidisciplinare.

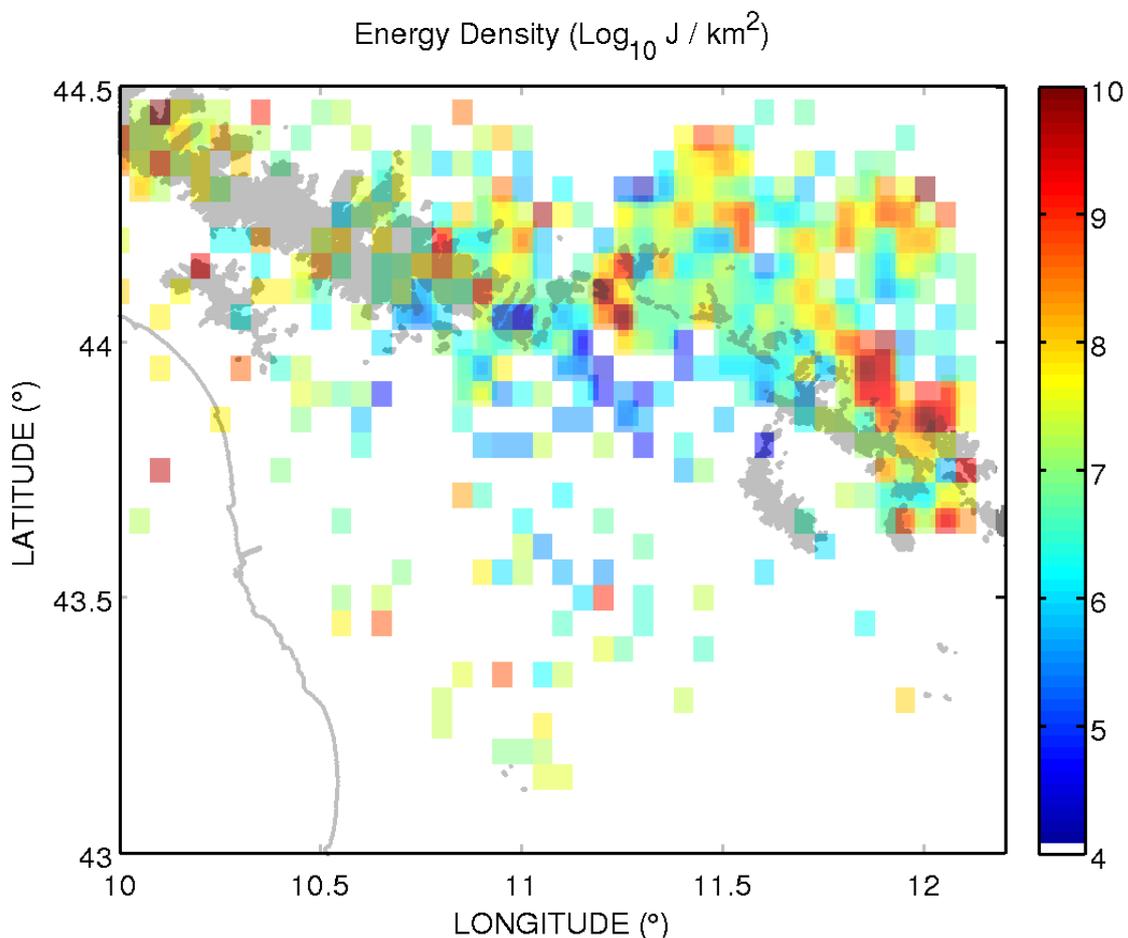


Fig. 4.3.2 - Mappa della densità di rilascio energetico ($\log(\text{energia}) / \text{km}^2$) per il periodo 2005-attuale. Le zone ombreggiate indicano la linea di costa, e le aree la cui quota è maggiore di 1000 m s.l.m..

Sintesi del quadro sismo-tettonico

In questa parte dello studio abbiamo utilizzato i cataloghi integrati delle reti locale e

nazionale per analizzare la sismicità recente (2005-attuale) dell'Appennino Centro Settentrionale, con particolare riferimento alle province di Firenze-Prato-Pistoia. L'utilizzo di un nuovo modello di velocità 1D ottenuto dall'inversione di decine di migliaia di tempi di arrivo, la rilocalizzazione di precisione utilizzando i tempi differenziali, e l'analisi dei meccanismi focali associati ai terremoti più significativi hanno permesso di ottenere una visione ben definita sulla distribuzione spaziale della sismicità e la geometria delle principali strutture attive. Per quanto la definizione di un modello sismotettonico esuli dalle finalità della presente relazione, possiamo comunque avanzare alcune ipotesi interpretative di stimolo per investigazioni successive.

In generale, l'Appennino Settentrionale è caratterizzato da una diffusa sismicità in entrambi i versanti dell'asse orogenetico. Studi precedenti (e.g., De Luca et al, 2009; Mantovani et al., 2011) individuano per la sismicità Appenninica due caratteri distintivi: (1) una sismicità superficiale da faglie normali lungo la zona interna della catena, e (2) una sismicità da faglie compressive lungo i versanti adriatico e padano. Come illustrato in Fig. 4.1.1, i nostri risultati confermano queste osservazioni precedenti. Il dominio interno (Tirrenico) è infatti caratterizzato da sismicità superficiale (< 20 km), generalmente associata ad un regime estensionale (v. Figg. 4.2.1 e 4.2.2). Sulla parte esterna della catena gli ipocentri sono invece distribuiti su uno spessore crostale maggiore, e associati ad un campo di sforzi compressivo (Fig. 4.2.1). Questo è il caso della sequenza sismica di Parma del 2008 e del terremoto di Monghidoro del 2003, entrambi avvenuti ad una profondità superiore ai 20 km (Piccinini et al., 2006). Tale schema, "dominio interno"- "catena"- "dominio esterno" è coerente anche con la modellazione termo-reologica (per es. Pauselli et al., 2010) e con le analisi termotettoniche (Pasquale et al., 2010).

Una delle caratteristiche più evidenti che emerge dalla distribuzione ipocentrale ottenuta nel nostro studio è una marcata discontinuità nella sismicità "caratteristica" muovendosi verso SE lungo la catena. Come mostrato in Fig. 4.1.1, l'inviluppo esterno della sismicità profonda è spostato verso NE in prossimità della parte centrale dell'area di studio. Lo stesso avviene per quanto riguarda la distribuzione della sismicità crostale superficiale, più frequente lungo il versante tirrenico, il cui inviluppo è spostato verso NE nell'area del Mugello. Tale spostamento avviene lungo una zona posta circa $N30^{\circ}E$ tra Bologna e Pistoia. Una discontinuità simile è evidenziata anche dall'esame degli elementi morfologici. La linea spartiacque principale, ad esempio, è chiaramente traslata in direzione NE in

corrispondenza della valle del Reno (Bartolini et al., 2003). Lo stesso vale per quanto riguarda l'ubicazione dei bacini estensionali che delimitano il fianco sud-occidentale dell'orogene. Infatti, il bacino del Mugello appare spostato alcune decine di chilometri verso NE rispetto all'allineamento atteso con i bacini della Garfagnana e della Lunigiana (vedi Fig. 4.4.1). Questa discontinuità morfologica e sismica coincide con la Linea Livorno-Sillaro (LLS), che è stata tradizionalmente interpretata come un sistema di faglie transpressive *strike/slip* sinistrorse (Bortolotti, 1966; Fazzini e Gelmini, 1982; Eva et al., 2005; Dellisanti et al., 2008).

Per quanto non vi sia ancora consenso circa i meccanismi di generazione della sismicità nell'Appennino Settentrionale, questi si collocano nel contesto della convergenza fra la placca Adriatica e quella Nord-Africana, con la conseguente formazione di un fronte compressivo al margine padano della catena. Al contrario, il campo di sforzi distensivi agente sul lato Tirrenico sarebbe da ricondursi a fenomeni di arretramento (*retreat*) e retro-piegamento (*roll-back*) della placca Adriatica già subdotta. La distribuzione spaziale della sismicità associata a questi processi segue un andamento caratteristico, riscontrabile su entrambi i lati della LLS ma con una traslazione laterale di 10-20 km. Possiamo quindi ipotizzare che la LLS sia l'espressione superficiale di una discontinuità che in realtà interessa l'intero spessore litosferico, probabile manifestazione di una segmentazione (*tearing*) della placca Adriatica subdotta, come già proposto da Royden et al. (1987). Se confermata, questa ipotesi recherebbe importanti implicazioni sulla valutazione della pericolosità sismica nell'area, dovendo infatti considerare l'esistenza di una importante zona di svincolo trasversale, a separare porzioni litosferiche con modalità indipendenti di aggiustamento della deformazione.

5. Obiettivo (5): Supporto tecnico/scientifico per l'attività di gestione dell'emergenza anche mediante la realizzazione della Rete Sismica Mobile (RSM), da allocare in area epicentrale finalizzata all'acquisizione di dati sismologici a seguito di un forte evento sismico.

Con l'occorrenza di un forte evento sismico, è opportuno procedere ad un tempestivo addensamento della copertura strumentale in area epicentrale mediante installazione di stazioni sismiche mobili (Rete Sismica Mobile; RSM). Questi interventi hanno lo scopo principale di migliorare il livello di detezione della sismicità e la precisione delle localizzazioni, in maniera tale da consentire una valutazione precisa circa l'evoluzione della sequenza in atto, e di delineare con precisione ubicazione e geometria delle strutture attive. Sulla base delle esperienze sinora maturate, questa sezione è quindi dedicata alla presentazione di alcune proposte per lo sviluppo di una rete sismica mobile regionale.

P5.1 – Proposta di un protocollo per la costituzione di una struttura di Rete Sismica Mobile da attivarsi in caso di evento sismico significativo.

Per la costituzione di una rete sismica mobile regionale, la Regione Toscana può contare sulle risorse del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (UNIFI) e della Prato Ricerche (FPR) che, congiuntamente, consistono di 14 stazioni mobili tutte equipaggiate con sensori a larga banda. Negli ultimi anni, questa strumentazione è stata impiegata principalmente per addensamenti locali delle reti permanenti a seguito di sequenze sismiche significative (Mugello 2008 e 2009, UNIFI; Montefeltro 2011 UNIFI e FPR; Emilia 2012, FPR), e nella stima degli effetti di amplificazione locale (Abruzzo 2009, UNIFI).

In tutte queste esperienze, i tempi di intervento sono stati estremamente rapidi, con installazioni completate anche nell'arco di 24 ore dall'attivazione.

Da ricordare, inoltre, la partecipazione ad esercitazioni di Protezione Civile, quali l'esercitazione 'Giotto' della Provincia di Firenze (Ottobre 2010), o la simulazione di un

evento di $M=5.8$ con epicentro nel comune di S. Sofia (FC) organizzata dalla Regione Emilia Romagna (Settembre 2011).

Da tutte queste esperienze, sono emerse alcune considerazioni che riteniamo utile elencare per ogni futuro sviluppo di una RSM regionale.

- a) **Allerta.** Le regole di attivazione sono funzione di molte variabili, che dipendono dalla copertura strumentale dell'area colpita dall'evento (e quindi dalla necessità di addensamento strumentale), dall'entità dell'evento, dall'apprensione indotta nella popolazione, e da altre eventuali caratteristiche ritenute di particolare rilevanza scientifica e/o di Protezione Civile (e.g., sequenze prolungate nel tempo, eventi di natura dubbia, ecc.). In accordo con quanto stabilito anche a livello nazionale, un forte terremoto ($M > 4$), o una sequenza con terremoti percepiti che duri per più di 4-5 giorni sono ritenuti elementi sufficienti per l'allerta della RSM. In questa fase, è necessario un primo contatto fra la RSM regionale e le altre reti mobili attive sul territorio (Università di Genova, INGV), per definire la disponibilità ad un possibile intervento e numero di strumenti disponibili;
- b) **Intervento.** Per assicurare l'efficacia dell'intervento, è fondamentale il coordinamento fra tutte le strutture che hanno assicurato la loro disponibilità, al fine di ottimizzare il posizionamento dei siti di misura evitando inutili e dispendiosi duplicati. Dove possibile, è sempre preferibile installare stazioni in telemetria digitale, permettendo così l'immediata integrazione delle nuove stazioni con il flusso dati della/e rete/i permanente/i.
- c) **Supporto all'informazione.** A prescindere dall'impiego di strumentazione mobile, uno degli aspetti più qualificanti dell'intervento nelle aree di maggior risentimento consiste nell'allestimento di presidi informativi. La diffusione di informazioni corrette e rigorose in periodi di emergenza riveste infatti un ruolo fondamentale per elevare il livello di consapevolezza delle popolazioni colpite, migliorandone al tempo stesso le capacità di risposta e reazione. Nella definizione di un protocollo di intervento della RSM, un elemento dovrebbe quindi riguardare la predisposizione di una struttura mobile, in cui personale esperto viene dedicato alla disseminazione delle informazioni al pubblico, agli operatori del soccorso e di protezione civile, alle

autorità di governo locale.

Considerazioni Conclusive

In questa Sezione si riporta la sintesi degli obiettivi raggiunti nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione.

Obiettivo (1): *Sviluppo di criteri e metodologie operative per l'implementazione dei sistemi di monitoraggio dell'attività sismica nella Provincia di Firenze, Prato e Pistoia.*

Questo obiettivo (punto "a" del programma di attività dell'accordo di collaborazione) ha riguardato la verifica delle prestazioni della rete nelle sue caratteristiche attuali, e lo sviluppo di attività propedeutiche alla installazione delle nuove stazioni. I risultati ottenuti permettono di trarre le seguenti considerazioni conclusive:

1. Dall'analisi delle distribuzioni *a priori* degli errori di localizzazione, la rete nella sua configurazione attuale presenta la migliore precisione di localizzazione per sorgenti ubicate nel bacino intermontano del Mugello. L'aggiunta di uno o combinazioni di due siti fra quelli candidati comporta ovviamente una modificazione nella distribuzione degli errori di localizzazione. Fra le varie possibili combinazioni, una soluzione soddisfacente è offerta dall'aggiunta di siti che vanno ad aumentare l'apertura della rete lungo la direzione NW-SE, consentendo quindi un miglioramento delle localizzazioni per eventi con origine nella bassa Val di Sieve e nell'Appennino Pistoiese. Con tale premessa, le combinazioni migliori appaiono quindi essere le S3-S9 e S13-S9 (v. Figg. 1.1.5 [e,f]).
2. Per tutti i siti candidati, le misure di rumore ambientale possono essere considerate soddisfacenti. Gli spettri misurati, infatti, sono generalmente compresi all'interno dei modelli superiore ed inferiore di rumore terrestre (Peterson, 1993). Fa eccezione il sito S5, nel Comune di Serravalle Pistoiese, per il quale sono stati osservati spettri di rumore decisamente troppo elevati per essere ritenuti accettabili. Ciò è probabilmente attribuibile alla presenza dell'autostrada A11 e della linea ferroviaria Pistoia-Lucca che, per quanto distanti diversi chilometri dal sito, sono evidentemente una sorgente di disturbo sufficientemente intensa da provocare l'elevato livello di

rumore osservato.

Obiettivo (2): Miglioramento delle procedure sismologiche dedicate alla localizzazione ed alla stima della magnitudo dei terremoti registrati dalla rete sismica.

Le attività svolte nell'ambito di questo obiettivo (punto "b" del programma di attività dell'accordo di collaborazione) sono state rivolte al miglioramento delle procedure di analisi dei dati del monitoraggio, al fine di ottenere una migliore precisione nella stima delle Magnitudo e delle localizzazioni ipocentrali:

1. Per quanto concerne le magnitudo, è stato effettuato un confronto sistematico fra i cataloghi RSTNO ed RSNC al fine di verificare la consistenza delle stime di M_L della rete locale con quanto riportato dal catalogo nazionale. I risultati hanno evidenziato che **le magnitudo RSTNO mostrano uno scarto aleatorio nell'ordine di +/- 0.5** rispetto a quanto riportato nel catalogo nazionale. Una stazione (SCAP) ha associato un errore sistematico di circa +0.5, che adesso può facilmente essere corretto per eliminarne l'effetto sulla stima globale delle magnitudo. Per il sito BIBN, invece, la distribuzione degli errori è più complessa, e mostra una dipendenza dall'ampiezza. Ciò può essere attribuito ad un (improbabile) effetto di non-linearità nella risposta del sensore, o ad un effetto di sito che provoca una amplificazione delle basse frequenze (< 5-10 Hz), banda in cui si concentra progressivamente l'energia all'aumentare della magnitudo.
2. Una seconda attività ha riguardato la creazione di un catalogo unificato RSTNO-RSNC per il periodo 2005-2010, che abbiamo successivamente impiegato per l'inversione di un **nuovo modello di velocità** unidimensionale di minimo *misfit*. La qualità di questo modello è testimoniata dal ridotto valore dello scarto quadratico medio (RMS) delle rilocalizzazioni, stabilizzato attorno a valori di 0.35s.
3. Sulla base di questo modello, si è quindi implementata una **procedura per il calcolo delle localizzazioni ipocentrali basata sull'inversione non-lineare dei tempi di tragitto**. Il vantaggio di questa procedura consiste principalmente nella definizione rigorosa ed esaustiva delle incertezze associate alla stima delle coordinate ipocentrali, un aspetto che riveste cruciale importanza per la gestione dell'emergenza

nei momenti immediatamente successivi l'accadimento di un forte terremoto.

Obiettivo (3): Sviluppo e miglioramento delle procedure per l'acquisizione e la trasmissione dei dati delle stazioni componenti la rete sismica.

Le attività svolte nell'ambito di tale obiettivo (punto "c" del programma di attività dell'accordo di collaborazione) hanno portato all'individuazione della migliore configurazione di rete in termini sia di modalità di trasmissione dei dati in telemetria, sia di geometria di rete. In particolare:

1. le prove eseguite per determinare la fattibilità logistica e finanziaria per i vari tipi di telemetria ha portato a strutturare il sistema di acquisizione/trasmissione dei dati su tre direttrici indipendenti (trasmissione in continuo su CDA e UMTS, trasmissione a richiesta *dial-up* tramite GSM) in modo da garantire la necessaria ridondanza delle procedure, funzionale nel caso di momentanea interruzione di un particolare sottosistema;
2. tale scelta ha guidato, insieme alle necessità derivanti dalla geometria di rete, la scelta dei due nuovi siti, per i quali si sono ricercate a) buone condizioni di rumore di fondo (vedi Allegato 1), b) disponibilità di un'area protetta e non accessibile al pubblico (terreno privato in concessione gratuita per il sito S9, alloggiamento già dedicato a strumentazione sismica per il sito S13, facente parte della ex-rete ENEA di monitoraggio della centrale del Brasimone), c) buona copertura del segnale UMTS.
3. l'installazione della strumentazione si è conclusa nei primi mesi del 2012 nel sito S9 (Rufina) e nel sito S13 (Monte La Croce), dopo i relativi periodi di prova. Le **due nuove stazioni, totalmente e definitivamente integrate nel sistema, sono state registrate nel registro internazionale delle stazioni sismiche (IRSS) rispettivamente con i codici "RUF1" e "MTCR"**;
4. la centralizzazione del segnale di tali due stazioni presso le sedi dell'Università e della Regione Toscana è garantita mediante la **pubblicazione su pagina web dedicata**, accessibile solo mediante l'indirizzo esatto, delle tracce tipo *helicorder*

delle due stazioni, riprodotte in tempo reale ad intervalli di due minuti. Forme d'onda e dati parametrici delle diverse stazioni della rete sono inoltre rese disponibili sul database della Rete Sismica della Toscana Nord-Orientale, accessibile all'indirizzo <http://dbrstno.pratoricerche.it/>.

La base dati raccolta dalla rete nella sua nuova configurazione non è ancora sufficiente a stimare il miglioramento nella soglia di completezza del catalogo e nei livelli di detezione. Tuttavia, esempi di applicazione a terremoti di piccola magnitudo (<2) hanno già mostrato le ottime capacità risolutive della rete nella discriminazione e localizzazione di eventi locali di bassa energia.

La realizzazione di un sistema automatico di detezione / localizzazione, e l'invio di messaggi di allerta in tempo quasi-reale è attualmente in fase di verifica. L'efficienza ed accuratezza di tali sistemi, tuttavia, dipende criticamente dal numero di punti di misura in registrazione continua. Nella sua configurazione attuale, la RSTNO conta 5 siti in acquisizione continua (3 pre-esistenti ed i 2 di nuova realizzazione), che riteniamo ancora insufficienti per la messa in esercizio di un sistema di allerta non supervisionato. L'implementazione di quest'ultimo aspetto è quindi soggetta ad ulteriori ammodernamenti della rete, finalizzati ad incrementare il numero di strumenti con centralizzazione digitale del segnale in tempo reale.

Obiettivo (4): Interpretazione dei dati ai fini dello studio della sismicità.

Le attività svolte nell'ambito di tale obiettivo (punto "d" del programma di attività dell'accordo di collaborazione) hanno condotto all'integrazione dei bollettini prodotti da FPR con quelli prodotti dall'INGV – CNT, con la creazione di un database omogeneo per il periodo 2005-2010. I prodotti derivati consistono in:

1. **mappa delle localizzazioni**, mediante integrazione dei due cataloghi RSTNO e RSNC e della sismicità recente (2011-attuale) per ulteriore verifica del modello di velocità adottato;
2. per gli eventi principali occorsi nel periodo 2005-2010 sono stati determinati i **meccanismi focali**, riportati in una apposita mappa;

3. **mappa di densità epicentrale** per il periodo 2005-attuale, dove è riportato il numero di eventi per unità di superficie e la **mappa del rilascio energetico**, definita dalla quantità di energia liberata per unità di superficie;
4. **sintesi del quadro sismo-tettonico**, mediante l'analisi della sismicità recente (2005-attuale) dell'Appennino Settentrionale, che conferma la descrizione schematica in termini di domini interno (distensivo) ed esterno (compressivo). In ogni caso, i dati evidenziano che tale schema appare traslato lungo la Linea Livorno-Sillaro. Un possibile modello interpretativo prevede l'esistenza di una discontinuità litosferica in corrispondenza di tale lineazione, probabile espressione di un fenomeno di 'tearing' nella placca Adriatica in subduzione. Se confermata dalla successiva analisi di una più ampia base dati, questa interpretazione potrebbe avere significative implicazioni nella determinazione del contesto sismotettonico dell'area in esame, e nella stima della pericolosità sismica associata.

Obiettivo (5): *Supporto tecnico/scientifico per l'attività di gestione dell'emergenza anche mediante la realizzazione della Rete Sismica Mobile (RSM), da allocare in area epicentrale finalizzata all'acquisizione di dati sismologici a seguito di un forte evento sismico.*

Questo obiettivo (punto "e" del programma di attività dell'accordo di collaborazione) è consistito nella definizione degli aspetti prioritari per la gestione degli interventi delle reti mobili attive sul territorio regionale. In particolare, si sono individuati i seguenti punti caratterizzanti:

- Definizione delle regole di allerta ed intervento delle RSM, in condivisione anche con quanto già stabilito dalle altre strutture distribuite sul territorio nazionale. Si è stabilita la necessità di un coordinamento fra la RSM regionale e le altre strutture operative sul territorio (*in primis*, la rete mobile dell'INGV - Centro Nazionale Terremoti), in modo da ottimizzare la geometria delle installazioni strumentali evitando inutili e dispendiosi duplicati;

-

- Le attività di ricerca siti per l'installazione delle stazioni fisse di monitoraggio hanno prodotto un prezioso elenco di postazioni che potranno essere agevolmente utilizzate per rapide installazioni temporanee della RSM.
- La procedura di analisi dei dati prodotti dalle RSM, da condursi secondo le modalità ordinarie, non può tuttavia prescindere dalla integrazione con quanto prodotto dalle altre reti temporanee e/o permanenti operative nell'area oggetto di studio. In tal senso, risulterebbe auspicabile la definizione di un formato omogeneo per l'archiviazione delle forme d'onda acquisite nelle missioni temporanee della RSM, e la predisposizione di un apposito database comune accessibile tramite interfaccia web. Per questi aspetti, un possibile esempio è offerto dal database EIDA (*European Integrated waveform Data Archive*), sviluppato nell'ambito del progetto EU 'NERIES' (<http://www.neries-eu.org/?subpage=/projectweb/portalproject/EIDA.html>; ultimo accesso Settembre 2012). L'utilizzo di una simile architettura di assimilazione-condivisione delle informazioni permetterebbe la rapida integrazione dei segnali acquisiti da tutte le reti presenti sul territorio in una base dati di formato omogeneo (nello specifico, lo standard *MiniSEED*), interrogabile ed accessibile tramite una interfaccia *web* di facile consultazione.

Riferimenti Bibliografici

Bartolini, C., N. D'Agostino and F. Dramis, 2003. Topography, exhumation, and drainage network evolution of the Apennines. *Episodes*, 26, 3, 212-216.

Boccaletti, M., F. Calamita, G. Deiana, R. Gelati, F. Massari, G. Moratti and F. Ricci Lucchi, 1990. Migrating foredeep-thrust belt system in the northern Apennines and southern Alps. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 77, 3-14.

Bortolotti, V., 1966. La tettonica trasversale dell'Appennino I. – La linea Livorno – Sillaro. *Boll. Soc. Geol. It.*, 85, 529-540.

Carmignani, L., R. Carosi, A. Di Pisa, M. Gattiglio, G. Musumeci, G. Oggiano and P.C. Pertusati, 1994. The Hercynian chain in Sardinia (Italy). *Geodinamica Acta*, 7, 1, 31-47.

Castello, B., G. Selvaggi, C. Chiarabba, A. Amato, 2006. CSI Catalogo della sismicità italiana 1981- 2002, versione 1.1. INGV-CNT, Roma <http://csi.rm.ingv.it/>

Chiarabba, C., P. De Gori and F. Speranza, 2009. Deep geometry and rheology of an orogenic wedge developing above a continental subduction zone: Seismological evidence from the northern-central Apennines (Italy). *Lithosphere*, 1, 2, 95–104.

DISS Working Group, 2010. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss>.

Duchi, V., G. Venturelli, I. Boccasavia, F. Bonicolini, C. Ferrari and D. Poli, 2005. Studio geochimico dei fluidi dell'Appennino Tosco-Emiliano-Romagnolo. *Boll. Soc. Geol. It.*, 124, 475-491.

Faccenna, C., F. Funiciello, D. Giardini and F.P. Lucente, 2001. Episodic back-arc extension during restricted mantle convection in the Central Mediterranean. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 187, 105-116.

Giacomuzzi, G., C. Chiarabba and P. De Gori, 2011. Linking the Alps and Apennines subduction systems: New constraints revealed by high-resolution teleseismic tomography. *Earth Plan. Sc. Lett.*, 301, 3-4, 531-543.

Gogus, O. H. and R. N. Pysklywec, 2008. Mantle lithosphere delamination driving plateau

uplift and synconvergent extension in eastern Anatolia. *Geology*, 36, 723–726.

Guillaume, B., F. Funiciello, C. Faccenna, J. Martinod and V. Olivetti, 2010. Spreading pulses of the Tyrrhenian Sea during the narrowing of the Calabrian slab. *Geology*, 38, 819–822.

Hacker, B.R., S. M. Peacock, G. A. Abers and S. D. Holloway, 2003. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. Geophys. Res.*, 108, 2030, doi:10.1029/2001JB001129.

Kennett, B.L.N. and T. Furumura, 2010. Tears or thinning? Subduction structures in the Pacific plate beneath the Japanese Islands. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 180, 52–58.

Kissling, E., W.L. Ellsworth, D. Eberhart-Phillips and U. Kradolfer, 1994. Initial reference models in local earthquake tomography, *J. Geophys. Res.*, 99, 19635–19646.

Lahr, J.C. and J.A. Snoke, 2003. The HYPOELLIPSE earthquake location program. *International Geophysics*, 81, 1617–1618.

Levin, V., J. Park, F.P. Lucente, L. Margheriti, and S. Pondrelli, 2007. End of subduction in northern Apennines confirmed by observations of quasi-Love waves from the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L04304, doi:10.1029/2006GL028860.

Lomax, A., J. Virieux, P. Volant and C. Berge, 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations. In: *Advances in Seismic Event Location*, Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, pp. 101–134.

Lomax, A., A. Michelini and A. Curtis, 2009. Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods. In: *Complexity In Encyclopedia of Complexity and System Science*, Part 5, Mayers, R.A. (ed.), Springer, New York, pp. 2449–2473.

Lucente, F.P., C. Chiarabba, G. B. Cimini, and D. Giardini, 1999. Tomographic constraints on the geodynamic evolution of the Italian region, *J. Geophys. Res.*, 104, 20307–20327.

Lucente, F.P., L. Margheriti, C. Piromallo and G. Barruol, 2006. Seismic anisotropy reveals the long route of the slab through the western-central Mediterranean mantle. *Earth Plan. Sc. Lett.*, 241, 517–529.

Malinverno, A., and W.B.F. Ryan, 1986. Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in

the Apennines as a result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, 5, 227-245.

Mantovani, E., Viti, M., Babbucci, D., Cenni, N., Tamburelli, C., Vannucchi, A., Falciani, F., Fianchisti, G., Baglione, M., D'Intinosante, V., Fabbroni, P., 2011. Sismotettonica dell'Appennino settentrionale Implicazioni per la pericolosità sismica della Toscana. Centro Stampa Giunta Regione Toscana.

McNamara, D.E. and R.P. Buland, 2004. Ambient Noise Levels in the Continental United States. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 4, 1517-1527.

Metropolis, N., A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller and E. Teller, 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.*, 1, 1087-1092.

Miller, M.S. and N. Piana Agostinetti, 2011. Erosion of the continental lithosphere at the cusps of the Calabrian arc: Evidence from S receiver functions analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23301, doi:10.1029/2011GL049455.

Mosegaard, K. and Tarantola, A., 1995. Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems. *J. Geophys. Res.*, 100, 12431-12447.

Moser, T.J., T. van Eck and G. Nolet, 1992. Hypocenter determination in strongly heterogeneous earth models using the shortest path method. *J. Geophys. Res.*, 97, 6563-6572.

Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of R.T.R.*, 30, 25-33.

Pasquale, V., P. Chiozzi and M. Verdoya, 2010. Tectonothermal processes and mechanical strength in a recent orogenic belt: Northern Apennines. *J. Geophys. Res.*, 115, B03301, doi:10.1029/2009JB006631.

Pauselli, C., G. Ranalli, C. Federico, 2010. Rheology of the Northern Apennines: Lateral variations of lithospheric strength. *Tectonophysics*, 484, 1-4, 27-35.

Peterson, J., 1993. Observations and modeling of seismic background noise. Open-File Report, 93-322, US Geological Survey, Albuquerque, NM.

Piccinini, D., C. Chiarabba, P. Augliera, and the Monghidoro Earthquake Group (M.E.G.), 2006. Compression along the northern Apennines? Evidence from the Mw 5.3 Monghidoro earthquake. *Terra Nova*, 18, 89-94.

Piccinini, D., N. Piana Agostinetti, P. Roselli, M. Ibs-von Seht and T. Braun, 2009. Analysis of small magnitude seismic sequences along the Northern Apennines (Italy). *Tectonophysics*, 476, 1-2, 136-144.

Pintore, S. and L. Salvaterra, 2007. Il Progetto TN-1. *Rapporti Tecnici INGV*, 40, 38 pp. (<http://istituto.ingv.it/1-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/archivio/>)

Piromallo, C. and A. Morelli, 2003. P wave tomography of the mantle under the Alpine Mediterranean area. *J. Geophys. Res.* 108, B2, 2065, doi:10.1029/2002JB001757.

Plomerová, J., L. Margheriti, J. Park, V. Babuška, S. Pondrelli, L. Vecsey, D. Piccinini, V. Levin, P. Baccheschi and S. Salimbeni, 2006. Seismic anisotropy beneath the Northern Apennines (Italy): Mantle flow or lithosphere fabric? *Earth Plan. Sc. Lett.*, 247, 1-2, 157-170.

Podvin, P. and I. Lecomte, 1991. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. *Geophys. J. Int.*, 105, 271-284.

Pondrelli, S., S. Salimbeni, A. Morelli, G. Ekström, L. Postpischl, G. Vannucci and E. Boschi, 2011. European-Mediterranean Regional Centroid Moment Tensor Catalog: solutions for 2005-2008, *Phys. Earth Planet. Int.*, 185, 3-4, 74-81.

Rao, S., L. Salvaterra and C. Acerra, 2010. Software per l'installazione e la configurazione della stazione sismica GAIA2. *Rapporti Tecnici INGV*, 130, 52 pp. (<http://istituto.ingv.it/1-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>)

Reasenberg, P.A. and D. Oppenheimer, 1985. FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. *U.S. Geol. Surv., Open-File Rep.*, 85-739.

Rosenbaum, G., M. Gasparon, F.P. Lucente, A. Peccerillo and M.S. Miller, 2008. Kinematics of slab tear faults during subduction segmentation and implications for Italian magmatism. *Tectonics*, 27, TC2008, doi:10.1029/2007TC002143.

Royden, L., E. Patacca and P. Scandone, 1987. Segmentation and configuration of subducted lithosphere in Italy; an important control on thrust-belt and foredeep-basin evolution. *Geology*, 15, 8, 714-717.

Salimbeni, S., S. Pondrelli, L. Margheriti, J. Park and V. Levin, 2008. SKS splitting measurements beneath Northern Apennines region: A case of oblique trench-retreat. *Tectonophysics*, 462, 1-4, 68-82.

Salvaterra, L., S. Pintore and L. Badiali, 2008. Rete sismologica basata su stazioni GAIA. Rapporti Tecnici INGV, 68, 28 pp. (<http://istituto.ingv.it/1-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>)

Tarantola, A. and B. Valette, 1982. Inverse problems = quest for information, *J. Geophys.*, 50, 159-170.

Tarantola, A., 1987. *Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*, Elsevier, Amsterdam, 613pp.

Thomson, S.N., M.T. Brandon, P.W. Reiners, M. Zattin, P.J. Isaacson and M.L. Balestrieri, 2010. Thermochronologic evidence for orogen-parallel variability in wedge kinematics during extending convergent orogenesis of the northern Apennines, Italy. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 122, 1160-1179.

Tropeano, M., L. Sabato and P. Pieri, 2002. Filling and cannibalization of a foredeep: the Bradanic Trough (Southern Italy). In: *Sediment Flux to Basins: Causes, Controls and Consequences*, Jones S.J. and L.E. Frostick (eds), Geol. Soc. London, Spec. Publ., 191, 55-79.

Ventura, G., F.R. Cinti, F. Di Luccio and N.A. Pino, 2007. Mantle wedge dynamics versus crustal seismicity in the Apennines (Italy). *Geochem. Geophys. Geosy.*, 8, Q02013, doi:10.1029/2006GC001421.

Waldhauser F. and W.L. Ellsworth, 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1353-1368.

Crediti

SeisComp è un software per l'acquisizione, analisi e distribuzione di dati sismologici sviluppato dal GEOFON Program presso l'Helmholtz Centre di Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences e gempa GmbH (<http://www.seiscomp3.org/>).

Earthworm è un progetto software open-source per la condivisione, distribuzione ed analisi di segnali sismici inizialmente diretto da Alex Bittenbinder e Barbara Bogaert, e finanziato dall' U.S. Geological Survey. Attualmente, lo sviluppo dei codici è curato dalla *Earthworm Community* (<http://folkworm.ceri.memphis.edu/ew-doc/>).