

Stima automatica della
magnitudo minima rilevabile
dalla rete sismica ReSIICO

Quaderni di Geofisica

136



Quaderni di Geofisica

Direttore Responsabile

Silvia MATTONI

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



Stima automatica della magnitudo minima rilevabile dalla rete sismica ReSIICO

Automatic magnitude detection of seismic network ReSIICO

Simone Marzorati, Marco Cattaneo

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti)

Stima automatica della magnitudo minima rilevabile dalla rete sismica ReSIICO

La capacità di una rete sismica di rilevare segnali di terremoti dipende dalla geometria della rete, dalla strumentazione utilizzata e dal disturbo presente ad ogni stazione. Questa capacità non è costante poiché il numero delle stazioni sismiche funzionanti e le caratteristiche di radiazione delle sorgenti di rumore variano nel tempo e la geometria e la strumentazione della rete non sono omogenei nello spazio.

È stata implementata una procedura automatica per produrre quotidianamente delle mappe della magnitudo minima rilevabile dalla rete (*detection*), utilizzando il software PQLX per calcolare i livelli di disturbo e una relazione empirica per stimare l'ampiezza del segnale di un evento sismico alle stazioni.

Dopo la descrizione della procedura automatica e delle differenti mappe che vengono prodotte, sono mostrati alcuni esempi per paragonare i risultati alla sismicità effettivamente registrata. L'area dell'Alta Valtiberina è stata scelta per la densità di stazioni e per l'alto tasso di sismicità.

Il monitoraggio costante della *detection* della rete si è rivelata utile sia per controllare continuamente la capacità della rete ma anche per spiegare alcune disomogeneità del catalogo di terremoti che risulta dall'interpretazione dei segnali registrati dalla rete. Infatti, variazioni di sismicità tra il giorno e la notte o durante la presenza di disturbi vengono spiegate attraverso le mappe di *detection*.

The ability of a seismic network to detect signals of earthquakes depends on the geometry of the network, the instrumentation used and the noise present at each station. This ability is not constant, as the state of health of seismic stations and the radiation characteristics of the noise sources change in time and geometry and instrumentation of the network are not homogeneous in space.

*An automatic procedure to produce maps of the minimum magnitude detectable from the network (*detection*) was implemented, using the software PQLX to calculate the noise levels and an empirical relationship to estimate the signal amplitude of a seismic event to the stations.*

After the description of the automatic procedure and of the different maps that are produced, the results are compared to the seismicity actually recorded. The area of the Upper Tiber Valley was chosen for the density of stations and the high rate of seismicity. Continuous monitoring of the detection is useful to check the performance of the network but also to explain some features of the catalog of earthquakes that results from the interpretation of the signals recorded by the network. In fact, changes of seismicity rate between day and night or during the presence of disturbances are explained through the maps of detection.

Introduzione

Scopo del lavoro è presentare il prototipo della procedura di stima automatica del valore minimo di magnitudo rilevabile da una rete sismica, in particolar modo con riferimento al caso della Rete Sismica Integrata dell'Italia Centro Orientale (ReSIICO) [Monachesi et al., 2013]. Inoltre sono presentati alcuni esempi di applicazione nell'area della rete TABOO [Chiaraluce et al., 2014].

Per ReSIICO si intendono le stazioni sismiche i cui segnali

sono convogliati ed acquisiti nella Sede di Ancona dell'INGV, distinguibili in stazioni appartenenti in senso stretto alla Rete Sismica Nazionale (RSN) gestita dal Centro Nazionale Terremoti (CNT) e stazioni gestite direttamente dalla Sede di Ancona tra cui la rete TABOO.

La rete è composta da un centinaio di stazioni acquisite tutte in *real time*, le quali coprono una vasta porzione di territorio che comprende interamente le Regioni Marche ed Umbria oltre che a zone limitrofe di Emilia Romagna, Abruzzo, Toscana e Lazio (Figura 1).

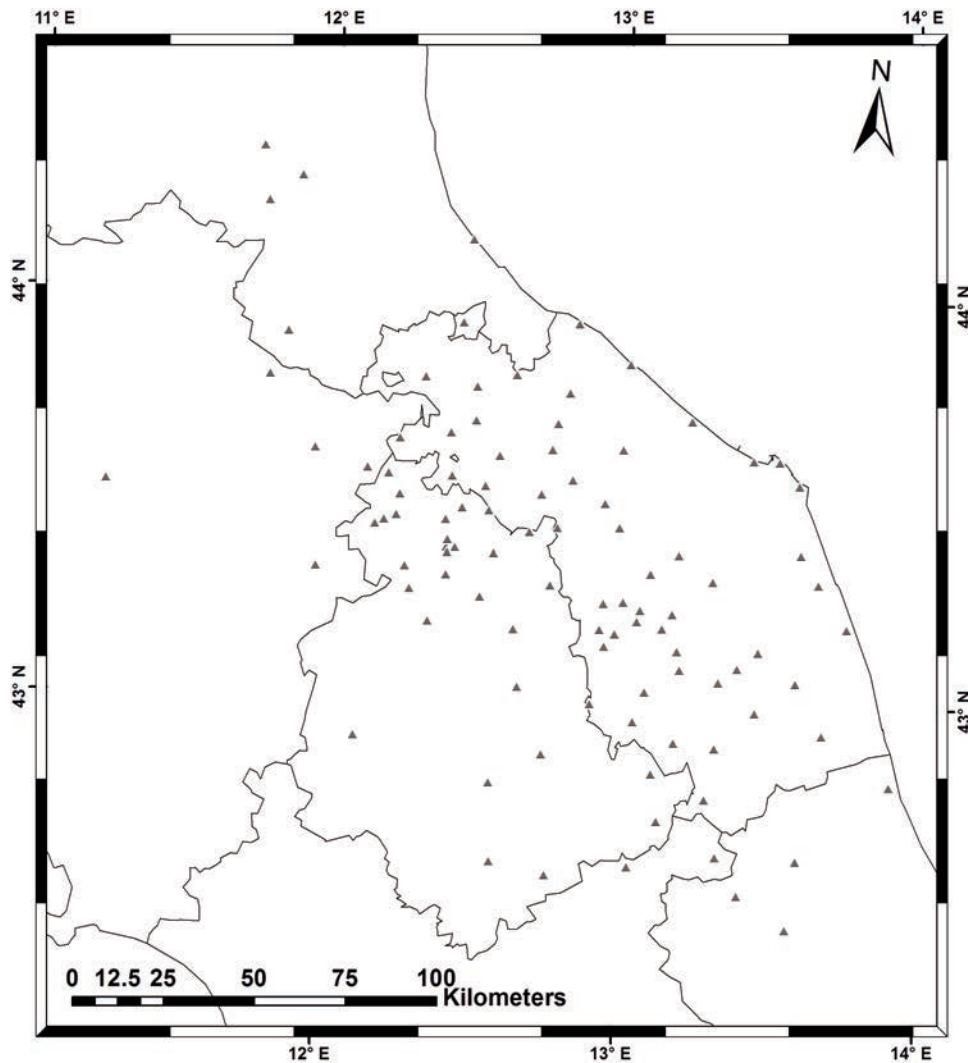


Figura 1 Rete sismica ReSIICO. Triangoli neri: stazioni sismiche utilizzate per la stima automatica della magnitudo minima rilevabile. Linee grigie: confini regionali.

Figure 1 Seismic network ReSIICO. Black triangles: seismic stations used for detection. Gray lines: regional boundaries.

Nel centro di acquisizione di Ancona sono attive procedure automatizzate che permettono il controllo del funzionamento di ogni singola stazione, il controllo di qualità del dato sismico e l'elaborazione automatica del segnale per analizzare in tempo reale la sismicità [Cattaneo et al., 2011; Monachesi et al., 2011; Marzorati et al., 2012; Monachesi et al., 2013].

Uno dei parametri che permettono di comprendere la qualità della rete sismica è la *detection*, la quale indica la minima magnitudo rilevabile dalla rete in un dato punto dello spazio in funzione della sua geometria e densità, della rumorosità delle stazioni e delle caratteristiche del mezzo in cui si propagano le onde sismiche.

Il controllo continuo della qualità delle stazioni permette di automatizzare processi che stimano la qualità della rete sismica in un dato momento, come ad esempio la *detection* della rete in un intervallo temporale scelto. Stimare quanto e dove la rete sismica è in grado di rilevare la sismicità in un

dato momento e archiviare questa informazione in una banca dati è utile per indagare le caratteristiche e la variabilità dei parametri dei cataloghi sismici che vengono prodotti con i dati registrati dalla rete stessa. Infatti, variazioni nei ratei di sismicità possono non essere collegati a fenomeni di tettonica attiva ma alla capacità attuale della rete (determinato dal numero di stazioni funzionanti in modo corretto) e alle condizioni ambientali di disturbo, le quali possono avere ciclicità periodiche date sia dalle attività antropiche che dagli agenti atmosferici. Questi aspetti diventano significativi soprattutto per reti molto sensibili, in grado di registrare fino alla microsismicità di fondo.

Nei paragrafi successivi verranno descritti i passaggi fondamentali della procedura automatica attiva nella Sede di Ancona dell'INGV, che elabora i dati di rumore sismico ambientale per restituire a video mappe di *detection* dell'area dell'Italia centro-orientale.

1. Operazioni di calcolo e parametrizzazione per la stima della magnitudo minima rilevabile

In questo lavoro viene spiegato come è stata calcolata la magnitudo minima rilevabile di un terremoto in qualsiasi punto dello spazio ricoperto dalla rete sismica.

Per magnitudo minima rilevabile si intende la più piccola magnitudo che è possibile intercettare in un prestabilito intervallo temporale per un particolare stato della rete sismica, determinato dalla rumorosità di ogni stazione nel periodo di analisi considerato e dal numero di stazioni in cui è rilevato un sufficiente rapporto segnale/disturbo (S/N), stabilito a priori. Il livello di rumore delle stazioni viene fatto coincidere con quello più probabile, calcolato in modo statistico,

in un dato intervallo di tempo, mentre i parametri degli eventi e la geometria di rete sono deterministici.

In primo luogo è necessario stimare quale ampiezza verrebbe registrata da una stazione sismica per i casi possibili rappresentati dalle coppie magnitudo-distanza. Una volta stimata, l'ampiezza dev'essere confrontata con il livello di disturbo di una stazione sismica in modo da determinare se un dato terremoto verrà registrato con un rapporto S/N sufficiente per essere riconosciuto come possibile evento. Se un certo numero di stazioni vicine soddisfano la condizione di superamento della soglia stabilita di S/N allora quel terremoto è dichiarato essere rilevato dalla rete. Tra tutti i terremoti in un determinato punto, rilevabili dalla rete, viene scelto quello di magnitudo inferiore per stabilire la *detection* della rete

per quel punto, ovvero la magnitudo minima rilevabile dalla rete in quel punto.

Lo spazio di indagine viene suddiviso in una griglia regolare tridimensionale ed ad ogni cella viene infine associato un valore di magnitudo di *detection*, in modo da ottenere mappe della capacità della rete di rilevare i terremoti.

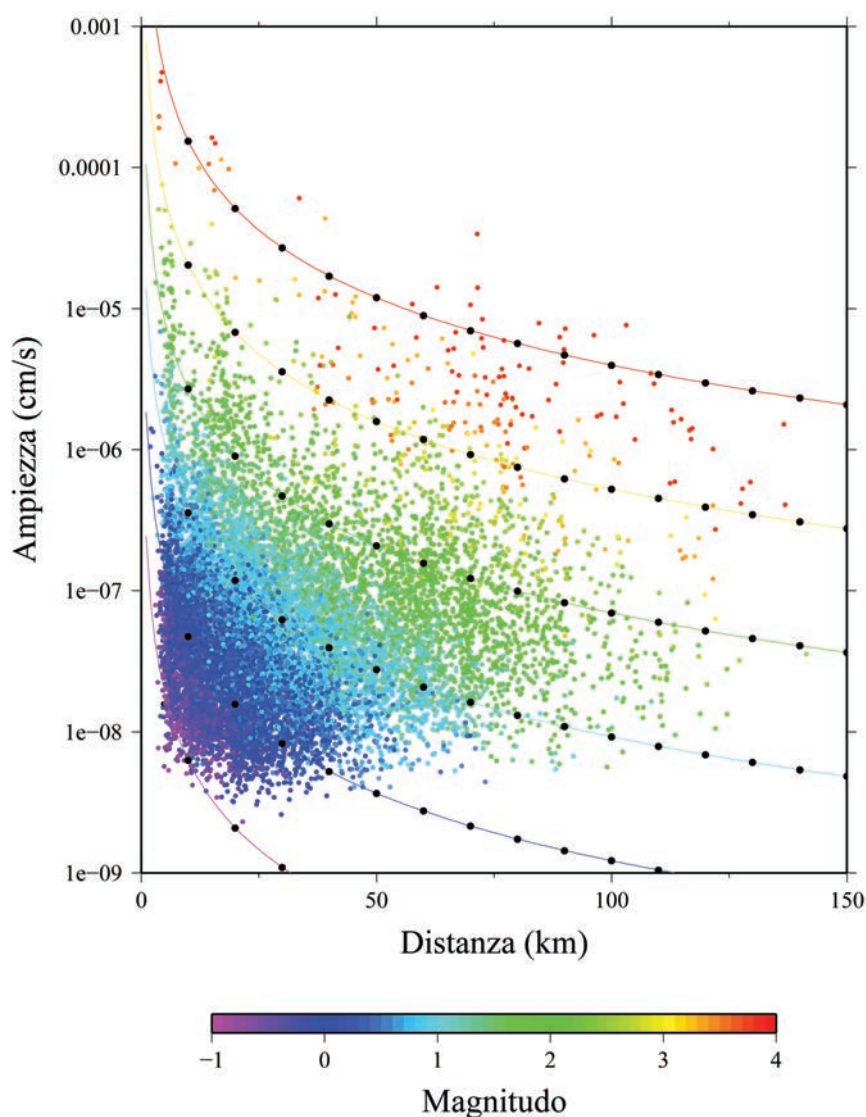


Figura 2 Dataset dei terremoti utilizzati e relazione tra ampiezza, distanza e magnitudo degli eventi. Curve a colori puntinate: classi di magnitudo da -1 a 4 con passo 1.

Figure 2 Dataset of earthquakes and empirical relationship between amplitude, distance and magnitude of events. Dotted colored curves: magnitude class from -1 to 4 with pass 1.

1.1 Stima dell'ampiezza del segnale sismico registrata alle stazioni

Per stimare l'ampiezza del segnale di un terremoto locale registrato da una stazione della rete ReSIICO, è stato scelto un approccio empirico, sfruttando la mole di dati già registrata dalla rete, in modo da ottenere risultati direttamente validi per il territorio d'indagine.

I dati degli eventi sismici registrati sono stati elaborati per determinare una relazione empirica tra ampiezza del segnale, magnitudo degli eventi e distanza degli eventi dalle stazioni sismiche. Ogni evento sismico utilizzato è stato interpretato manualmente da personale esperto, individuando fasi P ed S, per ottenere un'alta qualità dei parametri focali degli eventi.

Gli eventi sono stati selezionati in base alla distribuzione geografica ed al numero di fasi registrate, ottenendo un catalogo di 1568 eventi comprendente l'intervallo di magnitudo locale da -1.1 a 3.9 e distanze da 2 a 260 km.

In particolare, il catalogo permette di ricoprire con un significativo numero di eventi distanze nell'intervallo da 5 a 100 km per magnitudo anche inferiori allo 0 (Figura 2), ossia le condizioni più interessanti per stimare la magnitudo minima registrabile dalla rete.

La relazione empirica che stima l'ampiezza del segnale (A) risultante da valori di magnitudo locale (M_l) e distanza ipocentrale (D) è la seguente:

$$\log_{10}(A) = -5.73457 + 0.87813 M_l - 1.58948 \log_{10}(D) \quad (1)$$

L'ampiezza è stata calcolata come ampiezza spettrale media in una finestra basata sul *picking* delle onde S. Inoltre, è stata scelta una banda di frequenza predefinita (nella versione attuale fissata tra 2 e 15 Hz). Il calcolo dei parametri della relazione empirica è stato effettuato utilizzando una procedura di *stepwise regression* [Draper N.R. and H. Smith, 1998]. Questa ampiezza risulta coerente con le stime di rumore presentate successivamente ed è anche ben correlata con l'ampiezza utilizzata dalle procedure automatiche di *detection* degli eventi utilizzate nella Sede di Ancona, in cui le stime di *Short Time Average (STA)* and *Long Time Average (LTA)* sono calcolate nel medesimo intervallo di frequenza. Nella procedura di calcolo della *detection* teorica è comunque possibile implementare relazioni differenti da quella qui utilizzata, qualora nuove analisi producessero risultati significativamente differenti.

1.2 Stima dei livelli di rumore sismico delle stazioni

Ogni sensore sismico solidale con il terreno registra ovunque un rumore di fondo variabile, rappresentabile attraverso una descrizione statistica date le sue proprietà stocastiche.

Il rumore sismico può essere definito come tutto ciò che scegliamo di non descrivere [Scales and Snieder, 1998]. In que-

sto lavoro si intende rumore sismico tutta la porzione di segnale continuo non associabile ad un evento sismico locale, determinante quindi il livello di disturbo ad una stazione. Il livello di disturbo presente su una stazione ne determina la capacità di rilevare i terremoti. Infatti, l'ampiezza del disturbo in certi intervalli dello spettro del segnale può raggiungere o addirittura superare l'ampiezza del moto del terreno causata da un terremoto, degradandone interamente la forma d'onda, la quale non può essere riconosciuta come tale e quindi interpretata.

Il rumore di fondo registrato da una stazione sismica può essere di origine strumentale e dovuto agli stessi apparati che la compongono [Strollo et al., 2008], di origine elettromagnetica per la scarsa schermatura delle componenti, di origine antropica per le attività svolte nei dintorni del sito di registrazione (industrie, agricoltura, traffico veicolare, elettrodomestici,...) e di origine naturale per fenomeni diretti (vento, pioggia, ...) o indiretti (tempeste marine, fiumi, ...) [McNamara and Buland, 2004; Marzorati, 2007; Marzorati and Bindi, 2006].

Una descrizione completa delle caratteristiche del rumore di una stazione sismica necessita della raccolta ed elaborazione di segnale continuo per lunghi intervalli temporali, sia per catturare le variazioni periodiche sia per monitorare cambiamenti dovuti alla modifica delle condizioni ambientali, soprattutto dovute alle attività antropiche.

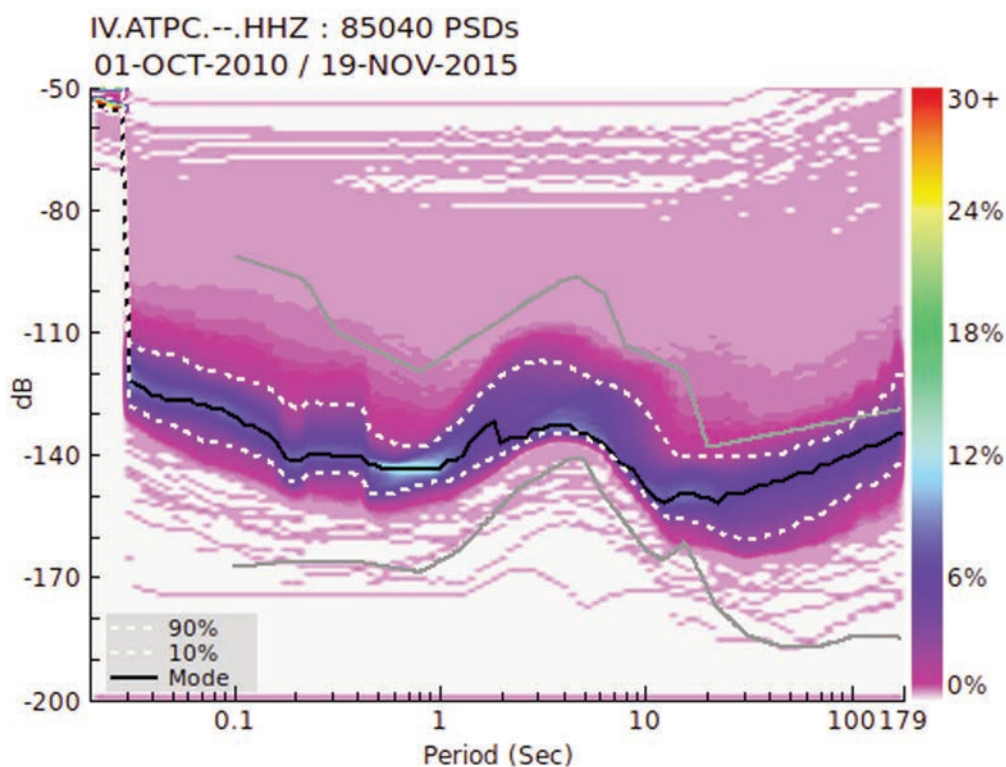


Figura 3 Esempio di Probability Density Function risultante dall'analisi del rumore continuo registrato ad una stazione sismica. Scala di colori: probabilità. Curva nera: moda. Curve tratteggiate bianche: 10° e 90° percentile. Linee Grigie: curve di riferimento [Peterson, 1993].
Figure 3 Example of Probability Density Function from continuous seismic noise recorded by a seismic station. Color bar: probability. Black curve: mode. White dotted lines: 10th and 90th percentile. Gray lines: reference lines.

Uno strumento utile per elaborare sistematicamente, archiviare e consultare i dati di rumore di lunghe serie temporali è il *software* PQLX, scaricabile liberamente dai siti <http://earthquake.usgs.gov> e <http://www.iris.edu>, attualmente non più supportato e sviluppato da quando Nanometrics Inc. (<http://www.nanometrics.ca>) ne ha comprato i diritti per creare la versione commerciale SQLX. PQLX è attivo nella Sede di Ancona dell'INGV dall'Ottobre 2010 ed elabora quotidianamente i dati continui dell'archivio in formato "miniSEED", dei segnali registrati dalle circa 100 stazioni sismiche acquisite. Lo scopo principale di questa analisi è fornire agli operatori che gestiscono la rete uno strumento rapido per indagare il funzionamento degli strumenti con la possibilità di compiere una diagnostica dei problemi prima di intervenire direttamente sulla stazione in sito. Inoltre, la lunga raccolta dati permette di utilizzare i risultati dell'intero *database* per descrivere le caratteristiche del rumore di ogni stazione.

Il lato *server* di PQLX analizza il segnale sismico continuo restituendo *Power Spectral Densities* (PSD) su finestre mobili di segnale di un'ora con sovrapposizione del 50%, seguendo l'algoritmo descritto in McNamara and Buland [2004]. La distribuzione dei valori di PSD per ogni periodo dell'intervallo spettrale analizzato compongono la Probability Density Function (PDF) del canale sismico analizzato, fornendo la probabilità che il segnale sismico si trovi in un certo livello del dominio spettrale nell'intervallo temporale analizzato (Figura 3). Dalla PDF di un canale è possibile calcolare il livello più probabile di disturbo, ovvero la moda, il livello medio, quello mediano e i livelli corrispondenti ai percentili della curva di probabilità. Tutti i dati sono organizzati automaticamente in un *database* relazionale MySQL.

Data la natura stocastica del rumore sismico, le caratteristiche stazionarie emergono statisticamente elaborando lunghe serie temporali. La moda delle PDF è un buon indicatore di queste caratteristiche e può descrivere con buona approssimazione il livello di disturbo di una stazione sismica. A volte la curva della moda non è regolare, indicando la bimodalità di alcune distribuzioni di rumore in alcuni intervalli dello spettro. Questa irregolarità può dipendere dalle sorgenti di rumore o da un incompleto *data set*.

Le variazioni del rumore sismico si rifletteranno direttamente sulla capacità di *detection* della rete. Quindi, per quantificare tale capacità e comprendere la potenzialità della rete, è opportuno calcolare la *detection* per varie situazioni, considerando sia l'intero intervallo temporale di analisi, sia intervalli di analisi ridotti, fino a calcolare lo stato della rete in tempo quasi reale. Per questo motivo, risulta utile la possibilità di interrogare il *database* contenuto in PQLX e la possibilità di estrarre direttamente i risultati statistici dell'intero intervallo temporale di analisi, dell'ultimo anno, dell'ultimo mese e dell'ultima settimana, utilizzando *programmi* forniti dal *software*. Inoltre è possibile interrogare il *database* per estrarre dati selezionati

fino alla singola PSD, come descritto nel paragrafo 2.1.

Per la *detection* della rete, è stato scelto di creare 4 mappe, relative a differenti intervalli temporali.

Per individuare la potenzialità complessiva della rete, nel caso tutte le stazioni stiano funzionando correttamente, viene creata la mappa di *detection* dell'intero intervallo temporale analizzato (identificato con "ALL" in PQLX), estraendo e selezionando dal *database* le mode delle PDF dei canali delle stazioni. Una seconda mappa è relativa all'intervallo temporale dell'ultima settimana analizzata a partire dal giorno attuale (identificata da "WEEK" in PQLX), utile a comprendere il funzionamento medio della rete attuale. L'estrazione dei livelli di rumore da PQLX utili al calcolo delle mappe "ALL" e "WEEK" può essere effettuata utilizzando il programma "exPDFstat" appartenente al pacchetto del *software*, oppure attraverso *query* SQL di selezione.

Le ulteriori due mappe di *detection* scelte per il prototipo di visualizzazione riguardano le variazioni dello stato della rete tra il giorno e la notte. Per ottenere queste due stime, è stato scelto di estrarre dal *database* di PQLX, con il programma "exPSDhour" le PSD notturne comprese tra le ore 0 e 4 UTC e le PSD diurne tra le 9 e le 15 UTC. Una volta estratte le PSD, viene calcolata la moda che rappresenta il livello notturno e diurno di disturbo della stazione.

Al calcolo finale della *detection* viene fornito un unico valore di disturbo che corrisponde al valore medio della moda tra 2 e 15 Hz.

Nel caso in cui i valori spettrali della moda oltrepassino il valore di -80 dB o siano inferiori a -180 dB la stazione è considerata come non funzionante, rispettivamente per un malfunzionamento o per la mancanza di dati.

1.3 Discretizzazione dello spazio di analisi

Oltre alla parametrizzazione dell'ampiezza del segnale e del livello di disturbo ad ogni stazione, lo spazio tridimensionale in cui viene calcolata la *detection* è suddiviso in un numero arbitrario di piani paralleli in profondità ogni tot km e con una maglia regolare di punti, in questo caso ogni 0.015° in pianta. Tale discretizzazione dello spazio è utilizzata per il *grid searching*.

Nel calcolo, ogni punto della griglia rappresenta l'ipocentro di terremoti di magnitudo locale da -1 a 3 con passo 0.1. Per ogni evento in un punto della griglia viene calcolata l'ampiezza del segnale ipotetico ad ogni stazione di cui si conosce il livello del disturbo. Il superamento della soglia S/N di 6 dB in coincidenza su 6 stazioni determina il risultato di evento rilevabile dalla rete. Di tutti gli eventi rilevabili dalla rete e generati in un punto della griglia, viene selezionato quello con magnitudo minore ed il valore corrispondente viene associato all'ipocentro analizzato.

L'unione di tutti gli ipocentri con associata una magnitudo di soglia compone la mappa di *detection*.

In figura 4 è mostrato l'esempio del risultato ottenuto utiliz-

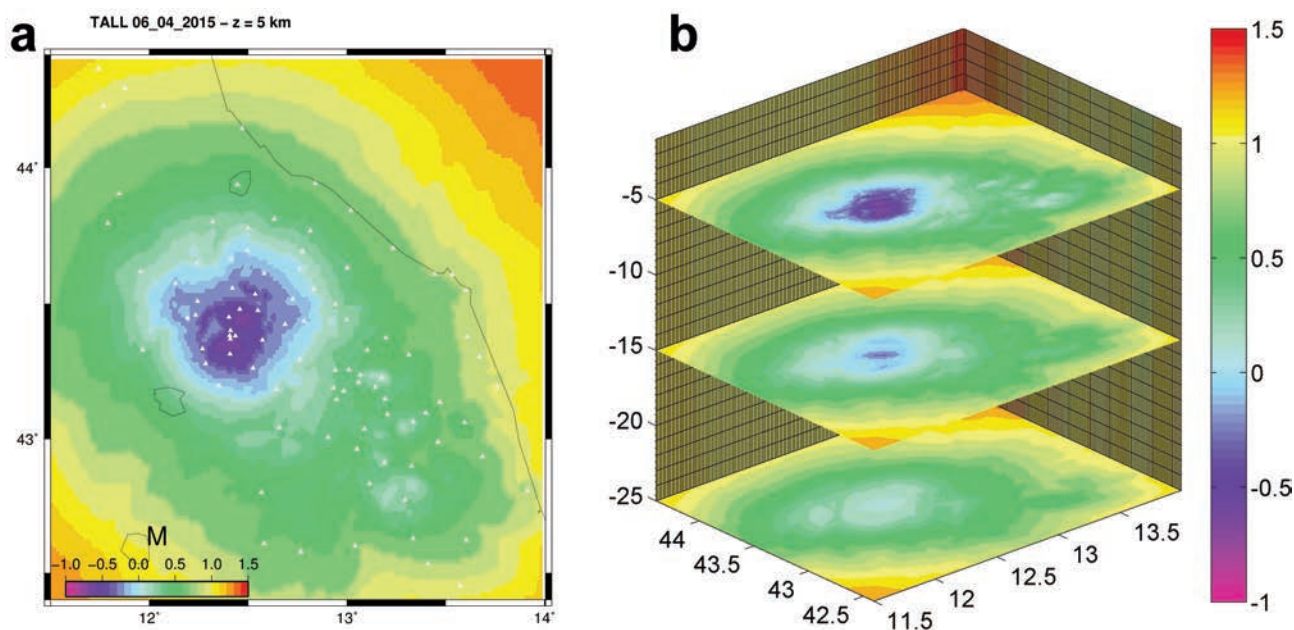


Figura 4 a) Mappa di detection relativa alla profondità di 5 km derivante dai dati di rumore nell'intervallo 2010-2015. b) Modello tridimensionale della detection; in evidenza le profondità 5, 15 e 25 km. Scala di colori: magnitudo minima di rilevamento.

Figure 4 a) Detection map for a deep of 5 km from seismic noise data between 2010 and 2015. b) 3D model of the detection; in plain view depths 5, 15 and 25 km. Color bar: magnitude of detection.

zando le ampiezze del segnale calcolate con l'eq.1 e le mode dei livelli di disturbo ottenuti dalla statistica del rumore per tutti i dati registrati dalla rete dall'ottobre 2010 al gennaio 2015. Il risultato è funzione sia della geometria della rete (maggior densità, maggior capacità di rilevare eventi) sia dai rapporti S/N di ogni stazione. Il miglior risultato si ottiene per l'area dell'Alta Valtiberina e per alcune zone dell'Appennino, sia per l'alta densità di stazioni in certe zone sia per il minor livello di disturbo delle aree montane rispetto alle aree a maggior urbanizzazione e industrializzazione delle grandi valli e dell'area costiera adriatica. Come ci si aspetta, il modello tridimensionale di *detection* indica una minor capacità di rilevazione degli eventi con la profondità, poichè la distanza dalle stazioni aumenta, ma è utile per comprendere quanto velocemente si degrada la *detection*. Mentre la maggior parte dello spazio di analisi indica una *detection* intorno a magnitudo 0.5 (verde), le zone a più alta risoluzione indicano la possibilità di rilevare eventi anche di magnitudo inferiore allo 0 almeno fino a profondità di 15 km per l'area al di sotto dell'Alta Valtiberina (blu).

2. Automatizzazione del calcolo

Una volta scelti i parametri e individuati gli *input* del calcolo della *detection*, è stata assemblata una procedura automatica per poter monitorare con continuità la capacità di rilevazione della rete.

La procedura avviene in 3 fasi. La prima fase comprende

l'estrazione dei livelli di disturbo dal *database* di PQLX, seguita dal calcolo dei valori di *detection*, basata sulla procedura descritta precedentemente. Infine la terza riguarda la creazione delle mappe di *detection* per la successiva visualizzazione a schermo tramite *web server*.

Le tre fasi vengono avviate da un *timer cron* su piattaforma Linux Ubuntu, mentre un'interfaccia *web* punta alle immagini delle mappe di *detection* che possono essere visualizzate a schermo tramite *browser internet*.

2.1 Estrazione dei livelli di disturbo dal *database* di PQLX

La prima operazione per calcolare automaticamente la mappa di *detection* della rete, con il metodo descritto nei paragrafi precedenti, è l'estrazione dei livelli di disturbo dal *database* MySQL nel quale PQLX organizza i risultati delle statistiche del rumore.

L'oggetto di input per il calcolo dei rapporti S/N rappresentato dal rumore può essere ad esempio la moda delle PDF relativa ad un certo intervallo temporale, oppure un'altra statistica, come la media o uno dei percentili; ipoteticamente si potrebbe calcolare il rapporto S/N anche dalle singole PSD di tutte le stazioni relative ad un'ora precisa. Quindi, conoscere la struttura generale e alcuni dettagli del *database* di PQLX può essere utile per selezionare i dati contenuti nell'archivio o per comprendere come alcune utilità comprese nel *software* estraggono i dati.

Quando viene configurato un nuovo *database* dal lato *server* di PQLX, il modello fisico in MySQL è composto da più *data-*

base relazionali. Il principale è nominato dal solo “nome_database” (ad es. “PQLXdb01”), dove sono contenute le chiavi primarie che identificano, tra le altre, le stazioni, i canali, i tipi di statistica, i file di risposta, le operazioni già svolte.

Da questo database è possibile estrarre la chiave primaria “chni_pk” dalla tabella “CHNI”, utile per l'estrazione successiva dei dati relativi alle statistiche dei livelli di rumore (Figura 5). La chiave “chni_pk” è identificata univocamente da 4 chiavi: l'id del codice della rete sismica (NTW), l'id del codice stazione (STN), l'id della località (LOC) e l'id del tipo di canale (CHN). Le prime tre chiavi sono contenute nel campo “IDS_PK” della tabella “IDS”, mentre gli identificativi della quarta nel campo “ids_pk” della tabella “loc”. La tabella “CHNI” contiene i 4 campi con le chiavi esterne “NTW_FK”, “STN_FK”, “LOC_FK”, “CHN_FK” che attraverso una query di selezione restituisce il “chni_pk” utile ad estrarre i dati di un particolare canale sismico dagli altri database collegati, contenenti i dati e i risultati statistici delle elaborazioni.

Mentre le PDF e le PSD sono contenute nel database “PQLXdb01DATA”, le statistiche sono contenute nel database “PQLXdb01STATS” (Figura 6). In entrambi sono contenute lunghe serie di tabelle ognuna legata ad un solo canale sismico tramite il nome tabella; ad esempio le tabelle contenenti le PDF si chiamano “pdfchni_pk” e quelle contenenti le PSD “psdchni_pk”, dove chni_pk è la chiave primaria che identifica il numero del canale sismico definito nel database principale. Ognuna di queste tabelle contiene

tutte le PSD calcolate per un canale che possono anche essere qualche decina di migliaia. Quindi nel database “PQLXdb01DATA” esistono anche le tabelle “psdchni_pkidx”, contenenti gli identificativi di ogni PSD associata ad una particolare ora e data.

Invece, nelle tabelle “statschni_pk” del database “PQLXdb01STATS” sono contenuti i valori delle curve statistiche desunte dalle PDF, ovvero la moda, la media, la mediana, i valori minimi, i valori massimi e i percentili (Figura 6). Ogni valore è associato ad un periodo dello spettro. La prima colonna di questa tabella identifica il tipo di PDF: ad esempio “1” indica la PDF “ALL”, relativa al tutto il dataset completo contenuto nel database. Quindi le tabelle di “PQLXdb01STATS” sono quelle dalle quali bisogna estrarre i valori per ottenere le statistiche dei livelli di rumore da inserire nel calcolo della detection.

Il software PQLX fornisce i programmi “exPDFstat” e “exPSDhour” per estrarre i dati dal database che restituiscono le selezioni, le quali possono essere salvate in file ASCII a colonne. Conoscendo i dettagli appena descritti del modello logico del database è possibile optare per soluzioni differenti che gestiscano le informazioni direttamente tra il database e il programma di elaborazione che utilizza le selezioni di dati, senza creare file sul filesystem della macchina. Per il prototipo della procedura automatica, dovendo implementare per semplicità script Fortran per il calcolo della detection già in uso, è stato scelto di sfruttare il timer cron su piattaforma Linux Ubuntu per avviare gli script in linguaggio PHP che a loro volta avviano

PQLXdb01

Tabella	Azione	Righe	Tipo	Collation	Dimensione	Overhead
chn	Mostra	-0	Vista	--	--	--
CHNI	Mostra	378	MyISAM latin1_swedish_ci		67.4 K B	--
CHNMETA	Mostra	0	MyISAM latin1_swedish_ci		1.0 K B	--
CONSTANT	Mostra	27	MyISAM latin1_swedish_ci		2.9 K B	--
DIRS	Mostra	101	MyISAM latin1_swedish_ci		9.1 K B	--
EVENTQ	Mostra	4,926	MyISAM latin1_swedish_ci		245.3 K B	3.8 K B
GLAP	Mostra	309,598	MyISAM latin1_swedish_ci		13.2 M B	2.0 K B
IDS	Mostra	116	MyISAM latin1_swedish_ci		11.9 K B	--
loc	Mostra	-0	Vista	--	--	--
LOG	Mostra	0	MyISAM utf8_general_ci		1.0 K B	--
ns	Mostra	-0	Vista	--	--	--
nalc	Mostra	-0	Vista	--	--	--
ntw	Mostra	-0	Vista	--	--	--
PDFCFG	Mostra	7	MyISAM latin1_swedish_ci		2.3 K B	--
PDFIDX	Mostra	2,646	InnoDB latin1_swedish_ci		192.0 K B	--
PDFWWW	Mostra	1	MyISAM latin1_swedish_ci		1.0 K B	--
PSDCFG	Mostra	391	MyISAM utf8_general_ci		46.1 K B	--
RESP	Mostra	372	MyISAM latin1_swedish_ci		32.8 K B	--
SCAN	Mostra	15,513	MyISAM latin1_swedish_ci		612.5 K B	--
STATS_DAY	Mostra	0	MyISAM latin1_swedish_ci		1.0 K B	--
stn	Mostra	-0	Vista	--	--	--
TRC	Mostra	19,264	MyISAM latin1_swedish_ci		2.4 M B	784 B
USER	Mostra	1	MyISAM utf8_general_ci		2.0 K B	--
USER_LOG	Mostra	10,224	MyISAM utf8_general_ci		234.8 K B	--
24 tabelle	Total	-363,565	InnoDB latin1_swedish_ci		18.0 M B	6.5 K B

Tabella CHNI

chni_pk	mediumint(9)
startT	timestamp
endT	timestamp
nTraces	int(10)
GapMax	mediumint(9)
GapMin	mediumint(8)
GapAvg	float
OlapMax	mediumint(8)
OlapMin	mediumint(8)
OlapAvg	float
MaxMax	int(11)
MaxAvg	float
MinMax	int(11)
MinMin	int(11)
MinAvg	float
MeanMax	float
MeanMin	float
MeanAvg	float
NTW_FK	mediumint(9)
STN_FK	mediumint(9)
LOC_FK	mediumint(9)
CHN_FK	mediumint(9)

Tabella PDFIDX

pdf_pk	pdfcfg_fk	chni_fk	dayS	dayE	ttIPSD
170813	6	82	2014-01-01	2014-10-03	12625
170814	6	219	2014-01-01	2014-10-03	11585
170815	6	284	2014-01-01	2014-10-03	12262
170816	6	104	2014-01-27	2014-10-03	5675
170817	6	273	2014-01-27	2014-10-03	5780
170818	6	261	2014-01-02	2014-10-03	8212
170819	6	246	2014-01-02	2014-10-03	8213
170820	6	324	2014-01-02	2014-10-03	8216
170821	6	83	2014-01-01	2014-10-03	12686

Tabella LOC

ids_pk	type	name
3	LOC	--
109	LOC	01
72	LOC	05
35	LOC	15
14	LOC	18
74	LOC	21
69	LOC	25

Tabella IDS

IDS_PK	type	name
1	NTW	IV
2	STN	CRE
3	LOC	--
4	CHN	HHN
5	STN	FEMA
6	CHN	HNN
7	STN	TRTR
8	CHN	HNE
9	STN	PE3
10	CHN	EHZ

Figura 5 Esempio di struttura di database di PQLX. A destra, in evidenza le tabelle principali che identificano i canali sismici. Figure 5 Example of PQLX database structure. Right: highlight of principal tables to identify seismic channels.

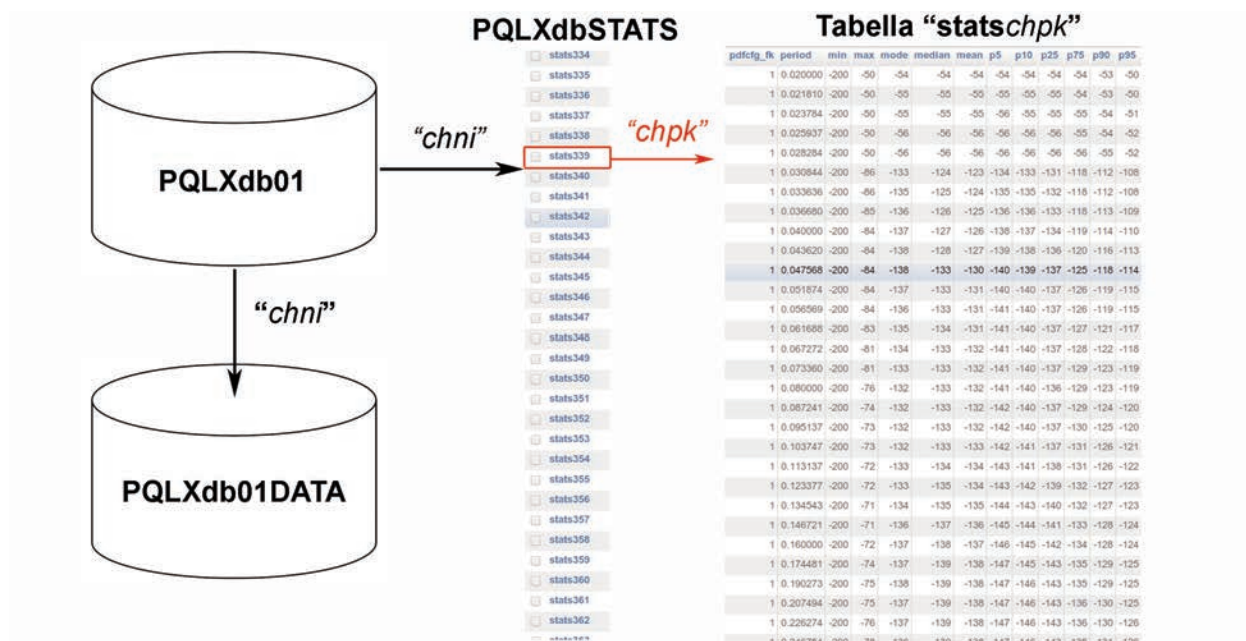


Figura 6 Relazione tra il database principale (PQLXdb01) e i database contenenti i risultati (PQLXdb01DATA e PQLXdb01STATS). Per il PQLXdb01STATS è visualizzato un esempio di elenco di tabelle del database e a fianco un esempio dei valori di una tabella “statschpk” contenente le statistiche relative ad un particolare canale sismico.

Figure 6 Relationship between main database (PQLXdb01) and databases that include results (PQLXdb01DATA e PQLXdb01STATS). An example of table list is highlighted for PQLXdb01STATS database with an example of values in “statschpk” table, including statistics about a single seismic channel.

“exPDFstat” e “exPSDhour” per ogni canale sismico della rete estraendo le statistiche relative all’intero database considerato, all’ultima settimana di dati a partire dal giorno attuale, alle ore notturne ed alle ore diurne del giorno precedente, identificandole rispettivamente con i nomi ALL, WEEK, NOCT e DIUR. Il timer è impostato per funzionare una volta al giorno.

2.2 Calcolo della detection

Dopo che sono stati generati i file ASCII contenenti le statistiche dei livelli di rumore, viene avviata una procedura in linguaggio Fortran la cui prima operazione è leggere le colonne di valori relativi ai periodi in secondi (s) e ai rispettivi livelli di rumore (in dB relativi a $(m/s^2)^2/Hz$). Il programma, convertendo i periodi in frequenze, seleziona i valori spettrali in un intervallo di frequenze “fmin” e “fmax” determinato in fase di configurazione della procedura; in questo caso è stato scelto l’intervallo 2-15 Hz, dovendo ipotizzare eventi locali e cercando di tagliare il più possibile l’energia a bassa frequenza derivante dallo stato del mare che in alcuni momenti supera in ampiezza quella dei terremoti più piccoli ed è maggiore dei disturbi a frequenze più alte. Da tutti i valori della curva di rumore compresi nell’intervallo viene calcolata una media aritmetica “amed”, il cui valore in dB è trasformato in m/s:

$$amp = 10^{(amed/20)} / 2\pi fmed \tag{2}$$

dove “amp” è l’ampiezza che sintetizza il valore di disturbo alla stazione e “fmed” è la frequenza media dell’intervallo spettrale scelto, calcolata come:

$$fmed = (fmin + fmax) / 2 \tag{3}$$

Un secondo programma Fortran gestisce tutte le ampiezze calcolate dai dati di disturbo per utilizzarle nel *grid searching* da cui risulteranno i valori di magnitudo di *detection*. Il programma analizza ogni punto geografico della griglia, applica una magnitudo alla volta, partendo dalla minore, calcolando la distanza stazione per stazione per ottenere un valore di ampiezza registrato dal canale sismico se la distanza ipocentrale è inferiore a 200 km. Ogni valore di ampiezza delle tre componenti della stazione (verticale, nord-sud, est-ovest), derivante dall’evento ipotetico, viene diviso per il valore di ampiezza del disturbo per determinare il valore di S/N che è confrontato con la soglia di *detection*, in questo caso stabilita a 6; se almeno una delle tre componenti supera la soglia, allora la stazione è valutata essere in grado di rilevare il terremoto della magnitudo attuale. Se, scorrendo tutte le stazioni, almeno 6 stazioni superano la soglia, allora la magnitudo dell’evento analizzato viene associato al punto della griglia selezionato dal *grid searching*. Alla fine del *grid searching*, tutti i punti della griglia avranno una magnitudo di *detection* associata. La mappatura viene salvata in un file ASCII a tre colonne: latitudine, longitudine magnitudo di *detection*.

Per la successiva visualizzazione, vengono create 6 mappe. Due mappe sono relative all'intervallo temporale ALL e WEEK, mentre altre due all'intervallo temporale DIUR e NOCT.

Inoltre, per comprendere le differenze tra la *detection* dell'ultima settimana (WEEK) rispetto a quella di tutto il periodo temporale analizzato (ALL), oltre che per capire le differenze tra il giorno (DIUR) e la notte (NOCT), ai valori dei primi vengono sottratti i valori dei secondi, ottenendo le ultime due mappe (W-A e D-N). Ad esempio, in condizioni normali e se le sorgenti di rumore derivano da attività antropiche, alle frequenze di analisi (2-15 Hz) i disturbi diurni sono maggiori dei disturbi notturni. In tutti i punti in cui la differenza DIURN-NOCT sarà positiva, la mappa delle differenze indicherà quanto la rete è meno efficiente, perdendo una parte

della capacità di rilevare le più basse magnitudo. Al contrario, differenze negative indicheranno che ci sono aree in cui la rete in quel momento è più performante. Inoltre si ha una stima quantitativa, in termini di magnitudo, della maggior o minor efficienza della rete nelle varie aree.

2.3 Creazione delle mappe di *detection*

I file di *output* creati dal calcolo della *detection* sono letti da uno script *shell bash* contenente i comandi di configurazione e disegno delle mappe, generate utilizzando il *software* GMT (*Global Mapping Tool*).

GMT permette di disegnare mappe specificando i parametri di ogni elemento della mappa tramite righe di comando. Ad esempio, la mappa di *detection* ad una determinata profondità viene rappresentata da un'immagine raster interpolando

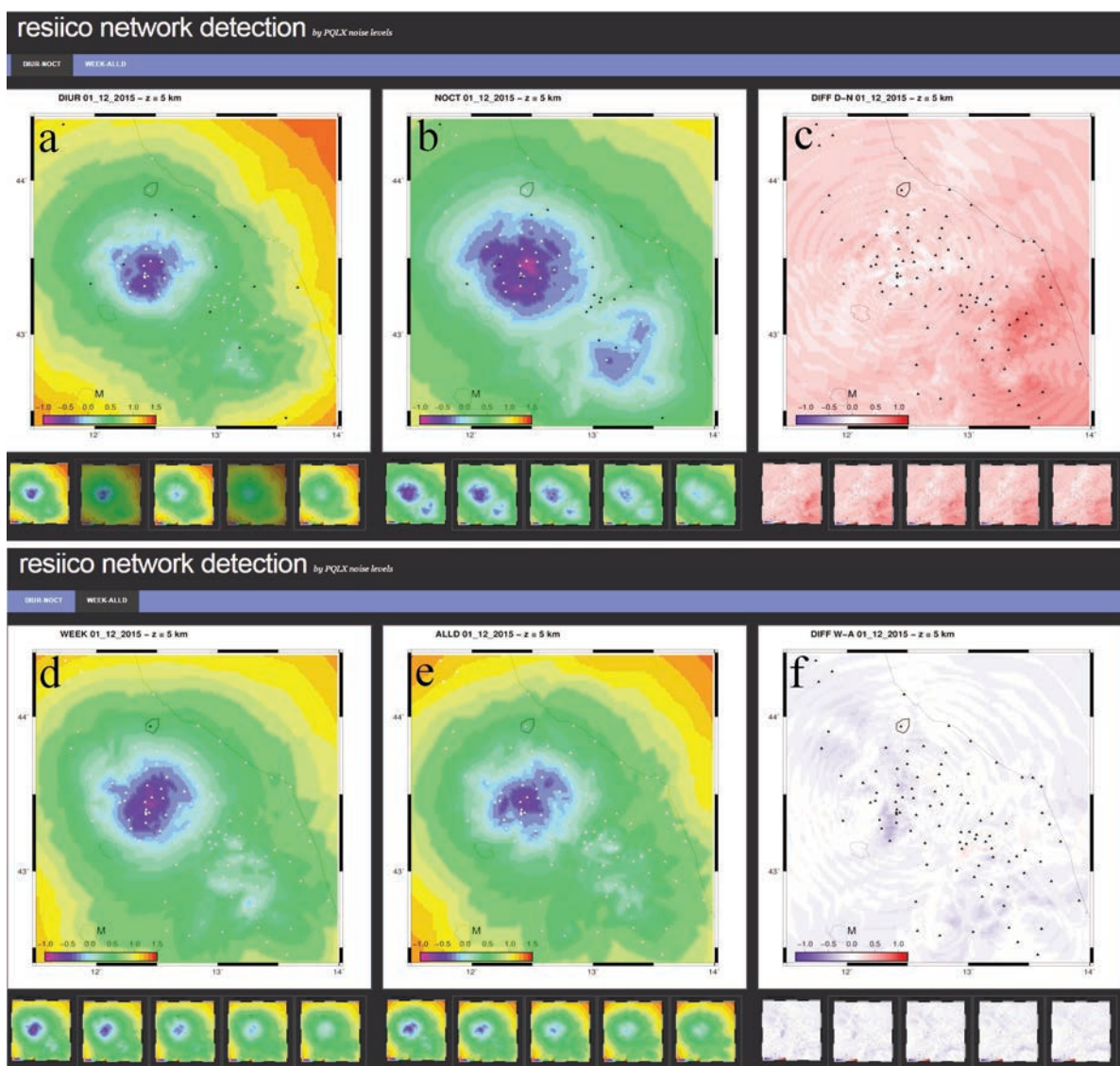


Figura 7 Monitor delle mappe di *detection* visualizzati in sala. In alto: monitor DIUR-NOCT. In basso: monitor WEEK-ALL. a) Pannello ore diurne. b) Pannello ore notturne. c) Pannello differenza giorno-notte. d) Pannello ultima settimana. e) Pannello intero intervallo temporale. f) Differenza ultima settimana-intero intervallo.

Figure 7 Monitor of *detection* maps that appears in the monitoring room. Up: DIUR-NOCT monitor. Bottom: WEEK-ALL monitor. a) Diurnal hours panel. b) Nocturnal hours panel. c) Diurnal-nocturnal difference panel. d) Last week panel. e) Whole temporal range panel. f) Last week-whole range difference panel.

tramite triangolazione dei punti della griglia con il comando “pscontour” che gestisce i file ASCII a tre colonne, utilizzando una scala di colori determinata con il comando “makecpt”. Anche altri elementi grafici, come linee e punti vengono gestiti da riga di comando leggendo file contenenti sempre coordinate e valori associati.

Infine, tramite il comando “convert” si trasforma l’immagine creata da formato *postscript* in formato *png*.

3. Visualizzazione delle mappe nella sala di monitoraggio

Per visualizzare le mappe di output del calcolo della *detection* vengono utilizzate delle pagine statiche HTML corredate da un foglio di stile CSS (Figura 7).

La pagina è composta principalmente da 3 riquadri che visualizzano le due mappe di confronto e la differenza tra le due. Ad esempio, la visualizzazione a monitor mostrata in Figura 7 comprende la mappa di *detection* per le ore diurne (DIUR) a sinistra, quella relativa alle ore notturne (NOCT) al centro e la differenza a destra (D-N) per lo strato di profondità pari a 5 km. Per ogni riquadro è possibile passare alla visualizzazione delle mappe relative agli strati a differenti profondità, da 5 a 25 km, digitando sulle miniatura dei pannelli inferiori da cui già si intuisce il grado di attenuazione della capacità di *detection*.

Dal menu della pagina è possibile passare alla visualizzazione della *detection* generale della rete relativa all’ultima settimana di segnale (WEEK) e alla *detection* totale (ALL) ottenuta dall’intero *database* di rumore continuo. La differenza tra le due mappe indica l’attuale performance della rete rispetto alla sua capacità media. Quindi è possibile individuare zone in cui la rete ha una capacità migliore o peggiore date le condizioni attuali.

Un esempio pratico della capacità di monitorare lo stato della rete da parte della procedura è visualizzato in Figura 8. Considerando il vento come una delle possibili fonti di disturbo delle stazioni, sono stati selezionati due giorni di analisi: il 3 e il 6 marzo 2015, rispettivamente un giorno di vento calmo e uno di vento forte (Figura 8a e 8b). Il 6 marzo risulta essere uno dei giorni più ventosi del 2015. Osservando i risultati sulle mappe di *detection* (Figura 8c e 8d), la differenza tra i due giorni è sensibile. Mentre per il giorno 3 lo stato della rete è molto buono, il giorno 6 si osserva una generale riduzione della capacità della rete di rilevare i terremoti più piccoli. Questa situazione è evidente nella riduzione degli areali a parità di magnitudo nei due giorni; le zone in cui è possibile registrare magnitudo inferiori a 0 quasi scompaiono e i bordi della rete mediamente passano da una capacità di rilevare terremoti di magnitudo 0.5 (verde) a magnitudo 1.0 (giallo) o più. La mancanza di più stazioni nel calcolo della *detection* del giorno 6 (triango-

li neri) non giustifica questa riduzione di capacità della rete, soprattutto nell’area dell’Alta Valtiberina in cui il numero di stazioni funzionanti tra il giorno 3 e 6 è quasi identico e la rete in quell’area è molto densa. Inoltre, il giorno 6 alcune stazioni sono state escluse sia per l’alto livello di disturbo sia per problemi nella trasmissione e quindi per ampi *gap* nei dati. Questa seconda causa è comunque un probabile sintomo dell’intensa azione delle raffiche di vento sulle antenne di trasmissione posizionate in alta quota sulla catena montana appenninica.

4. Variabilità della *detection*

L’utilizzo di una lunga serie di dati elaborati con PQLX permette di estrarre rapidamente anche dati relativi a parametri differenti rispetto a quelli presentati nel paragrafo 3. Infatti, come mostrato in Figura 9, è possibile produrre mappe di *detection* che rappresentino le potenzialità generali della rete, evidenziando gli stati estremi ma verosimili. Nella Figura 9 sono mostrate le mappe dello strato del modello a 10 km di profondità, il quale rappresenta già un livello cautelativo per individuare un limite di *detection*, essendo gran parte della sismicità dell’area al di sopra di tale profondità.

Estraendo per ogni stazione il livello di rumore del 90° percentile della PDF per l’intero *database* (PALL), viene prodotta una mappa di *detection* che rispecchia con buona approssimazione il caso peggiore. Infatti, il 90° percentile rappresenta il livello al di sotto del quale è presente il 90% dei dati di rumore, con esclusione dei livelli spettrali meno probabili, originati da eventi sismici o malfunzionamenti sporadici come *spike*, derive del segnale, tarature di calibrazione, ecc. Quindi, se tutte le stazioni fossero altamente disturbate nello stesso momento, si otterrebbe una situazione come quella rappresentata dalla mappa in Figura 9a2. Questo stato della rete probabilmente si avvicina molto alla magnitudo di completezza del catalogo che può produrre la rete archiviando tutti i terremoti che è in grado di rilevare.

Come si nota nella mappa, la zona a miglior capacità è a magnitudo tra 0.0 e 0.5, mentre ai bordi della rete raggiunge e in alcuni casi oltrepassa magnitudo 1.5.

Si può operare allo stesso modo per disegnare lo stato della rete nelle ore notturne e diurne non utilizzando i dati di un particolare giorno, ma estraendo i risultati delle statistiche associate alle ore notturne e diurne di tutti i dati dell’intero periodo di analisi (nell’esempio, circa 4 anni). In questo caso, nelle mappe b1 e b2 di Figura 9, si osserva lo stato più probabile della rete in funzione dei disturbi notturni (b1) e diurni (b2). Associando tutte le stazioni al loro livello più probabile di disturbo notturno, si ottiene una stima della migliore capacità generale della rete per l’intervallo delle alte frequenze. In questo caso, un’ampia porzione interna dell’Italia centrale è in grado di rilevare terremoti con magnitudo inferiore

re a 0.0, soprattutto nelle zone dell'Alta Tiberina e dei Monti Sibillini; la parte restante interna alla rete rileverebbe ovunque terremoti fino a magnitudo 0.5.

La situazione, risultante dall'associazione di tutte le stazioni al loro livello più probabile nelle ore diurne, riduce le zone con capacità di rilevare magnitudo inferiori a 0.0 anche se permane l'area dell'Alta Tiberina. I bordi della rete, durante il giorno, perdono una parte della loro capacità di rilevare i terremoti fino a magnitudo 1.0.

5. Discussione ed esempi di utilizzo delle mappe di *detection*: il caso dell'Alta Valtiberina

L'utilità delle mappe di *detection* calcolate in questo lavoro è sia di progettazione dello sviluppo della rete sismica, sia di controllo del suo funzionamento, sia di comprensione del catalogo di terremoti che la rete produce.

Le mappe sono utili per comprendere alcune caratteristiche della variabilità dei ratei di sismicità nel tempo e nello spazio,

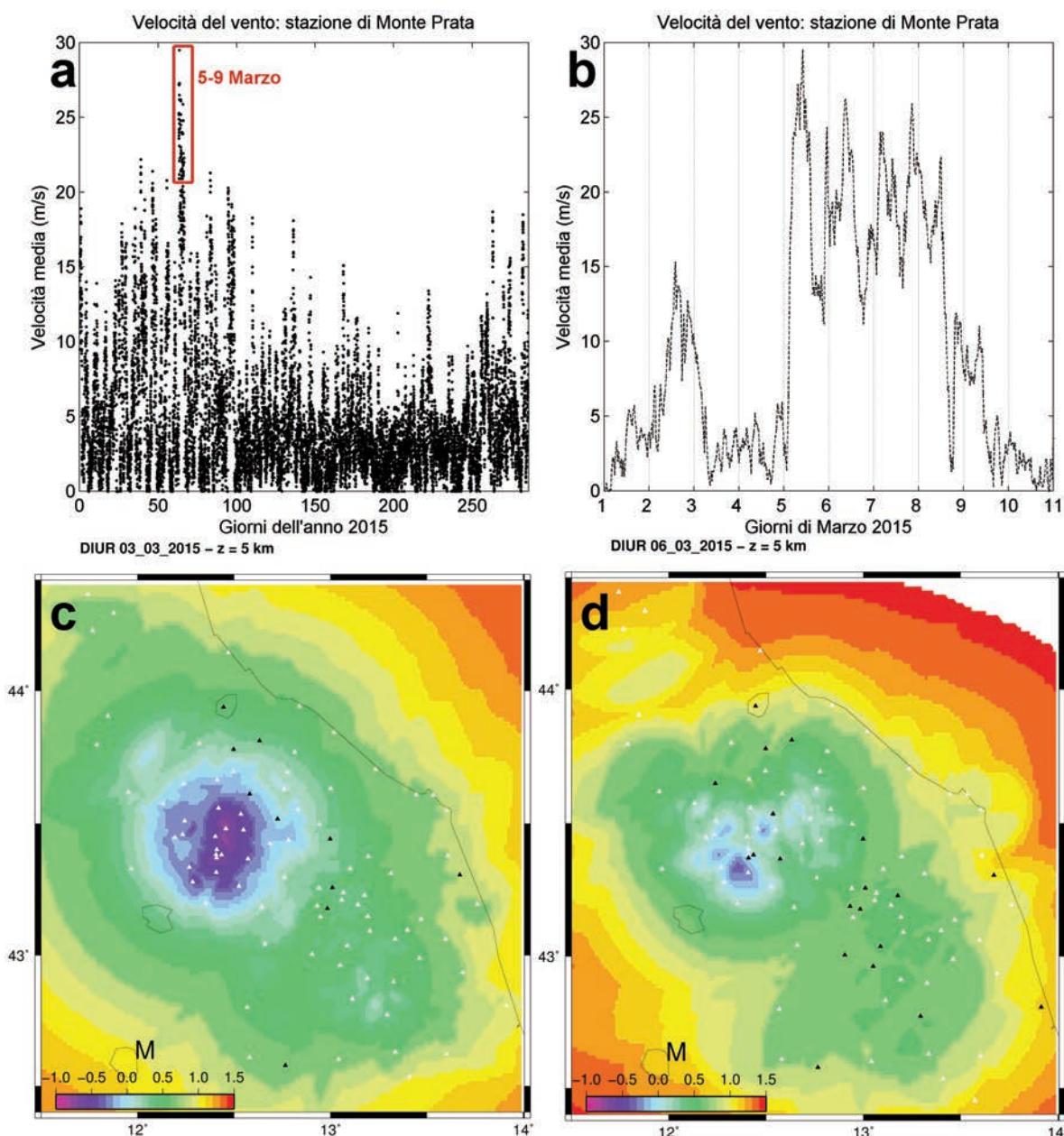


Figura 8 a) Velocità media del vento nel corso del 2015 in località Monte Prata (Monti Sibillini). b) Velocità media del vento dall'1 al 10 Marzo 2015, contenenti la finestra con i maggiori valori del 2015, evidenziata in a). c) Mappa di *detection* a 5 km di profondità relativa al giorno 3 Marzo 2015, con vento calmo. d) Mappa di *detection* a 5 km di profondità relativa al giorno 6 Marzo 2015, con vento forte. I dati di vento sono stati forniti per g.c. dal Dott. Francesco Boccanera (Protezione Civile Regione Marche).

Figure 8 a) mean velocity of wind in year 2015 at Prata Mountain (Sibillini Mountains). b) Mean velocity of wind from 1th to 10th March 2015, including the window with greater values of the year 2015. c) Detection map for depth 5 km of the 3 March 2015, flat wind. d) Detection map for depth 5 km of the 6 March 2015, intense wind. Wind data for gentle courtesy of Dr. Francesco Boccanera (Regione Marche Civil Defense).

in modo da escludere un'origine naturale nell'aumento o diminuzione del numero di eventi in alcuni intervalli temporali. Inoltre sono utili per comprendere la completezza di un catalogo, individuando i luoghi e i momenti in cui la rete non è in grado di rilevare i terremoti di magnitudo inferiore ad una soglia.

Per riportare un esempio di questi aspetti, è stata scelta l'area dell'Alta Valtiberina in cui la rete ha un'alta capacità di rilevazione associata ad un alto tasso di microsismicità dell'area.

Sono stati selezionati gli eventi sismici compresi tra l'anno 2010 e l'anno 2013 ad una profondità compresa tra i 4 e i 6 km nell'area dell'Alta Valtiberina, per poter confrontare la sismicità registrata con le mappe di *detection* a 5 km di profondità. La Figura 10 illustra alcune caratteristiche del catalogo di eventi selezionati. Gli eventi sono racchiusi in un intervallo di magnitudo M_L da -1.36 a 3.9. La magnitudo di completezza M_C , ottenuta con il programma Zmap [Wiemer, 2001] e calcolo delle incertezze con metodo Shi

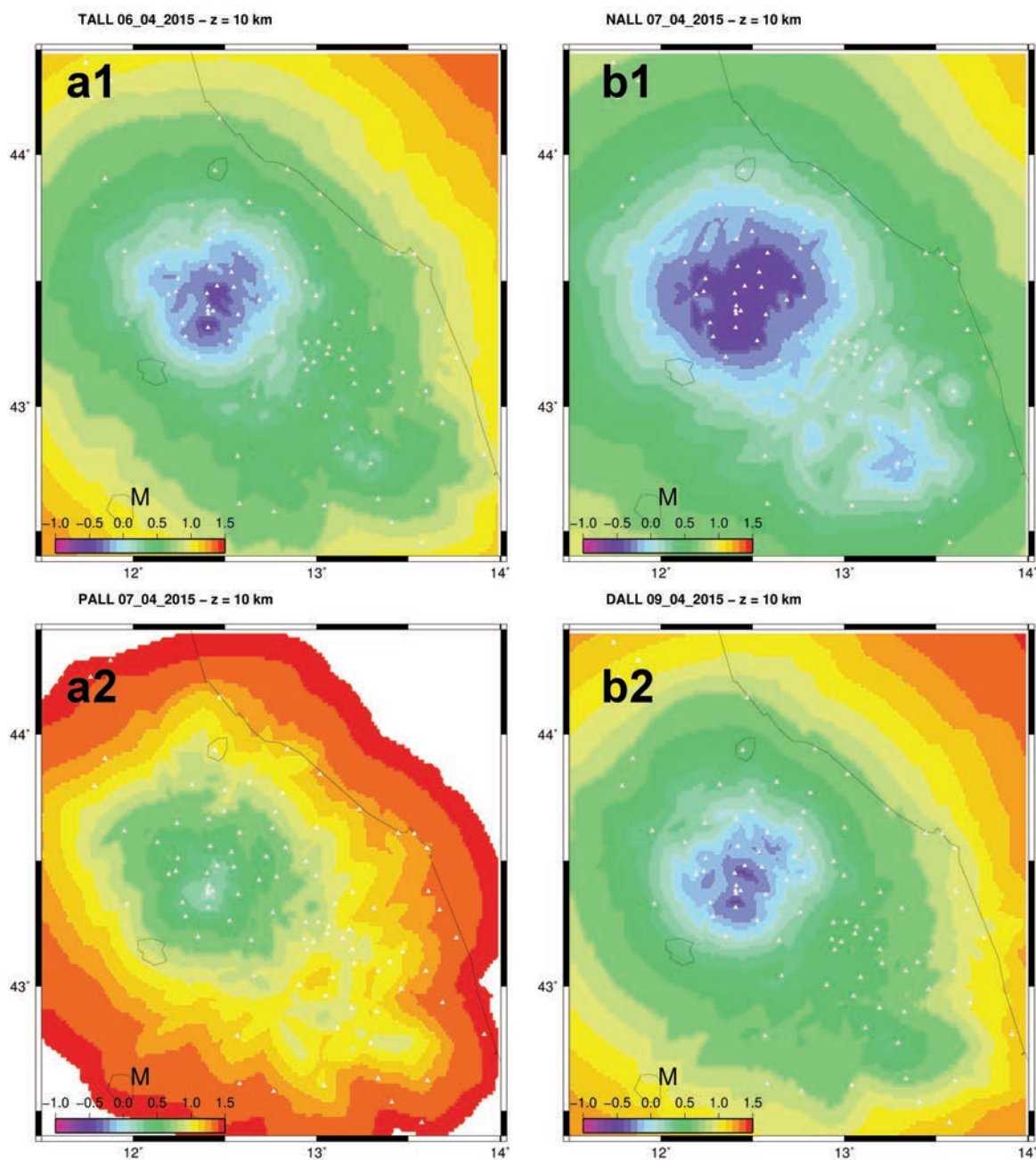


Figura 9 Mappe di detection utilizzando tutto il database di PQLX raccolto dal 2010 (circa 4 anni). a1) TALL: mappa ottenuta a partire dalle mode del rumore. a2) PALL: mappa ottenuta a partire dai 90° percentili del rumore. b1) NALL: mappa ottenuta a partire dalle mode del rumore delle ore notturne. b2) DALL: mappa ottenuta a partire dalle mode del rumore delle ore diurne.
Figure 9 Detection map using whole PQLX database from 2010 (about 4 years). a1) TALL: map obtained from mode of the noise. a2) PALL: map obtained from 90th percentile of the noise. b1) NALL: map obtained from mode of the noise selecting nocturnal hours. b2) DALL: map obtained from mode of the noise selecting diurnal hours.

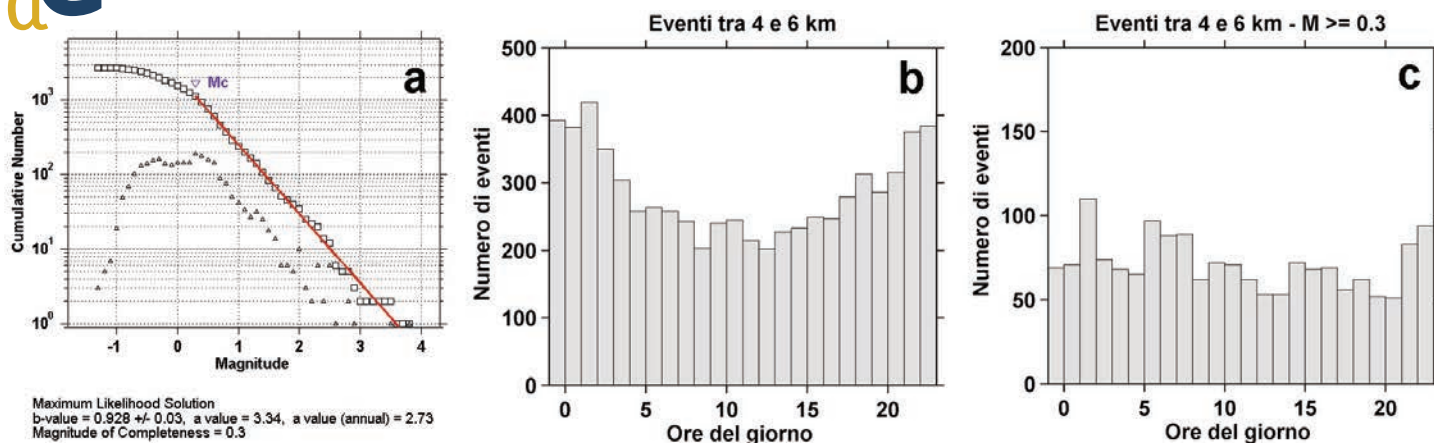


Figura 10 Catalogo di eventi registrati nell'area dell'Alta Valtiberina tra 4 e 6 km di profondità tra il 2010 e il 2013. a) Stima della magnitudo di completezza M_C . b) Istogramma degli eventi registrati nelle varie ore del giorno. c) Istogramma degli eventi di magnitudo $M_L \geq 0.3$ registrati nelle varie ore del giorno.

Figure 10 Seismic events recorded in Alto Valtiberina area between 4 and 6 km of depth from 2010 to 2013. A) Assessment of magnitude of completeness M_C . b) Histogram of events recorded during hours of the day. c) Histogram of $M_L \geq 0.3$ events recorded during hours of the day.

and Bolt [1982], risulta essere 0.3 (Figura 10a). Analizzando il catalogo e suddividendo gli eventi secondo le ore del giorno, si ottiene un chiaro andamento che indica un maggior numero di eventi registrati nelle ore notturne (Figura 10b). Eliminando dal catalogo gli eventi al di sotto della $M_C = 0.3$, l'andamento scompare e l'accadimento degli eventi lungo le ore del giorno diviene casuale, indicando la probabile causa dell'andamento notte-giorno nella capacità della rete di rilevare tutti i terremoti al di sotto di una certa magnitudo. Infatti, come indica la Figura 10a, in quest'area e nell'intervallo di tempo scelto, la rete ha registrato eventi di magnitudo fino a $M_L = -1.36$ ma probabilmente perdendo alcuni eventi di $M_L < 0.3$.

Per valutare la bontà della relazione tra i dati sperimentali e i risultati delle mappe di *detection*, bisogna tenere in considerazione che le mappe derivano e sono influenzate dal modello di rumore delle stazioni che viene assunto. Infatti, assumendo un modello di rumore di lungo periodo (anni di dati) si otterranno soglie di magnitudo che sono il riflesso di una situazione in cui tutte le stazioni stanno funzionando e la rumorosità ha una probabilità simile su tutte. Quindi, è possibile paragonare le soglie di magnitudo così ottenute con un catalogo di eventi il più completo possibile. Al contrario, riducendo la stima delle soglie di magnitudo per intervalli temporali più corti, si ottiene una stato della rete più corrispondente al suo funzionamento in un determinato momento, potendo raccogliere in tal modo l'informazione relativa agli estremi della capacità di rilevamento.

In Figura 11a e Figura 11b sono mostrate le mappe di *detection* a 5 km di profondità sul lungo periodo, rispettivamente per il modello più probabile di rumore (mode delle PDF) e per il modello del caso peggiore in cui si assume che tutte le stazioni sono al loro massimo di rumorosità nello stesso momento (90° percentile delle PDF). A queste mappe sono stati sovrapposti

gli eventi di Figura 10. Le scale di colori della magnitudo di *detection* e quella degli eventi registrati sono paragonabili. La prima informazione che si ottiene è l'effettiva capacità della rete di rilevare terremoti di piccola magnitudo nelle aree indicate dalla mappa di *detection* in Figura 11a. Infatti, la gran parte dei terremoti tra magnitudo -0.6 e 0.0 ricade nell'analoga area di *detection* (colori blu-azzurro). In secondo luogo, tale area di *detection* è più estesa rispetto al *cluster* centrale di eventi, intorno al quale c'è assenza quasi totale di sismicità: quindi, dalla mappa di *detection* si può dedurre che, se ci fossero eventi di magnitudo tra -0.6 e 0.0, la rete sarebbe in grado di registrarli nelle aree disegnate di blu e azzurro. Questa informazione rende più confidenti nel valutare l'effettiva mancanza di sismicità in queste porzioni dello spazio: la rete non registra eventi perchè in realtà non avvengono. Nel riquadro in basso di Figura 11b è riportata una sezione di tutti gli eventi registrati in quest'area a tutte le profondità: a 5 km di profondità viene intersecata la sismicità associata in letteratura alla presenza della Faglia Alto Tiberina e alle strutture estensionali del tetto della faglia [Chiaraluce et al., 2007]. Uno dei temi di studio di quest'area è la funzione di scollamento della faglia tra una crosta duttile e asismica al di sotto e una crosta fragile e sismica al di sopra. La porzione sud occidentale della Figura 11a rappresenta l'area al di sotto della faglia, dove di fatto gli eventi sismici sono praticamente assenti, pur avendo la rete un'alta capacità di rilevamento a quelle profondità. In questo caso è possibile affermare che al di sotto della faglia non c'è sismicità, a parte alcuni sporadici eventi che potrebbero essere associati a problemi di localizzazione. Anche nella porzione orientale della Figura 11a non è presente un alto tasso di sismicità indicando probabilmente che la sismicità nell'intervallo temporale considerato è confinata nella porzione estensionale, senza arrivare a interessare le aree, che si ipotizzano compressive, della catena umbro-marchigiana più a est.

L'apparente sovrastima nella Figura 11a, ovvero la presenza di terremoti di magnitudo inferiore a quella indicata dalla magnitudo di *detection* (eventi viola e bianchi) si spiega valutando come è stata calcolata la mappa di *detection* in questo caso. Infatti, utilizzando le mode dei livelli di rumore per l'intero *database* (anni di misure), si ottiene una stima che rappresenta una configurazione a lungo termine e di funzionamento completo in cui emerge la capacità *standard* e più probabile della rete di registrare la sismicità fino ad una certa soglia senza perdere sismicità. Non è lo stato migliore della rete ma quello più probabile se funzionano tutte le stazioni, perciò è un buon indicatore del funzionamento medio della rete, delle sue potenzialità e risulta utile per lo sviluppo e la progettazione della rete. Questo vale oltremodo per la mappa di *detection* in Figura 11b, ottenuta assumendo un modello di rumore delle stazioni pari al 90° percentile delle PDF, quindi assumendo uno stato peggiorativo della rete. In questo caso, i valori di magnitudo risultanti dovrebbero indicare con buona confidenza che al di sopra di queste soglie la rete non perde sismicità. Infatti, la Figura 11b mostra valori di *detection* che, in senso lato per l'intera area, si avvicinano e non scendono significativamente al di sotto della magnitudo di completezza di Figura 10a ($M_C = 0.3$).

Nell'esempio di Figura 11 sono stati rilevati terremoti di magnitudo inferiore (fino a -1.36) rispetto alle soglie di *detection*, in quanto si è detto che esse tendono verso la magnitudo di completezza, quindi non è impossibile registrare al di sotto di tali valori di magnitudo ma probabil-

mente si perde della sismicità. In ogni caso, è possibile intercettare questa informazione utilizzando mappe di *detection* che assumono stati della rete che descrivano i casi migliori. Questo può esser fatto considerando le mappe di *detection* derivanti dal modello di rumore ottenuto analizzando le sole ore notturne. In Figura 12a è mostrata sullo sfondo la mappa di *detection* relativa alle ore notturne di tutti gli anni considerati. Tale mappa indica che è possibile rilevare (aree viola) la sismicità a magnitudo comprese tra -0.6 e -0.8. Proprio in queste aree ricadono gli eventi registrati in quell'intervallo di magnitudo (pallini viola). Il modello di rumore utilizzato e il lungo intervallo temporale di analisi, che permette di inserire tutte le stazioni, produce mappe di *detection* risultanti da un buon stato di funzionamento della rete e che rappresentano magnitudo inferiori alla magnitudo di completezza. In questo caso la mappa indica la potenzialità della rete nei momenti migliori e quindi i valori si avvicinano alla minima magnitudo rilevabile. In quanto l'analisi su lunghi intervalli temporali in ogni caso media i risultati, per replicare valori che si avvicinano ancor di più alla minima magnitudo rilevabile dalla rete in una certa zona, è stata considerata come esempio la mappa di *detection* relativa alla sola notte del giorno 12 Ottobre 2014 (Figura 12b). Questa immagine si colora anche di sfumature bianche che indicano magnitudo *detection* di almeno -1.0, spiegando la presenza degli eventi colorati in bianco che comprendono terremoti di magnitudo inferiore a -0.8. Sporadici eventi di magnitudo inferiore alle soglie di *detection* appaiono ancora nella figura, probabil-

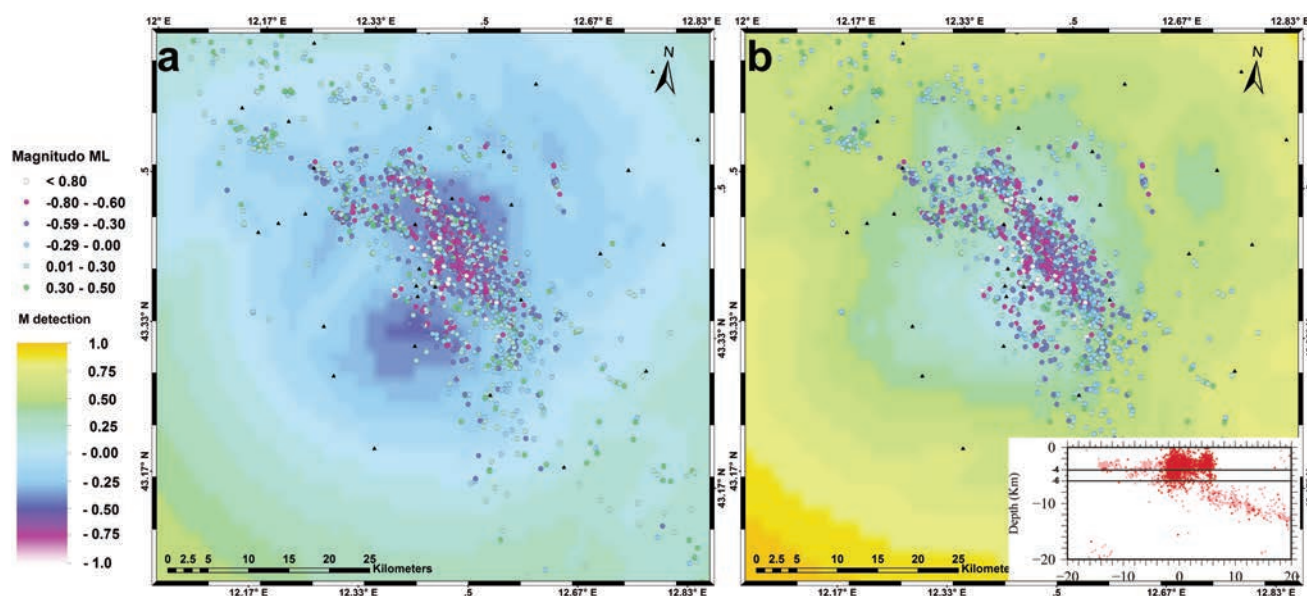


Figura 11 Sismicità e detection in Alta Valtiberina. Cerchi colorati: terremoti tra 4 e 6 km di profondità. Sfondo: mappa di detection a 5 km di profondità per l'intero intervallo temporale. Riquadro in basso a destra: sezione della sismicità visualizzata in mappa e selezione in profondità degli eventi sismici. Triangoli neri: stazioni sismiche. a) Detection relativa alle mode del rumore. b) Detection relativa al 90° percentile del rumore.

Figure 11 Seismicity and detection in Upper Tiber Valley. Colored circle: earthquakes between depth 4 and 6 km. Background: detection map at depth 5 km related to whole time interval. Right-bottom panel: profile of the seismicity and depth selection of seismic events. Black triangles: seismic stations. a) Detection calculated from mode of noise PDF. b) Detection calculated from 90° percentile of noise PDF.

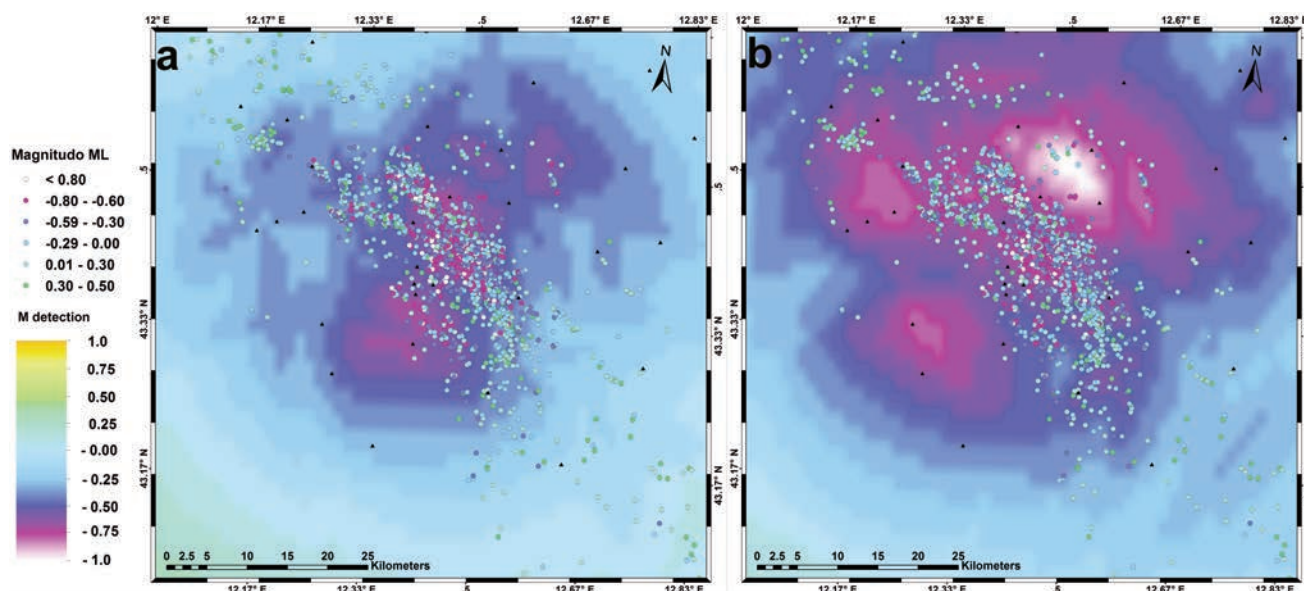


Figura 12 Sismicità e detection in Alta Valtiberina. Cerchi colorati: terremoti tra 4 e 6 km di profondità. Sfondo: mappa di detection a 5 km di profondità, valida per le ore notturne del 12 ottobre 2014. Triangoli neri: stazioni sismiche.

Figure 12 Seismicity and detection in Upper Tiber Valley. Colored circle: earthquakes between depth 4 and 6 km. Background: detection map at depth 5 km, valid for October 12th 2014. Black triangles: seismic stations.

mente poiché l'interprete ha riconosciuto visivamente eventi non rilevabili dal sistema di *trigger* ma appena precedenti o successivi ad eventi riconosciuti automaticamente. Quindi, riducendo l'intervallo temporale di valutazione a momenti precisi, come le ore notturne, è possibile spiegare attraverso le mappe di *detection* caratteristiche del catalogo di eventi come quello di Figura 10. Nel catalogo, il numero di terremoti notturni sono maggiori di quelli diurni in quanto le condizioni di rumore diurne non permettono di registrare la sismicità al di sotto di una certa soglia, influenzando sulla composizione del catalogo che risulta avere una M_C pari a 0.3 e oltre la quale tale andamento sparisce. L'analisi tramite le mappe di *detection* presentate permette di dimostrare che il fenomeno di Figura 10b non è un fenomeno naturale ma è dovuto alla variabilità dei livelli di rumore delle singole stazioni che generalmente sono più elevati nelle ore diurne che notturne. Perciò, conoscendo in dettaglio le caratteristiche della rete, è possibile stimare in precedenza quello che poi effettivamente la rete è in grado di registrare come terremoti, trattando il dato sismico nella stessa maniera utilizzata per la mappe di *detection* durante le procedure di *trigger* degli eventi.

Quindi, a seconda della geometria di rete utilizzata, il numero di stazioni funzionanti, il modello di rumore assunto, con i valori di *detection* calcolati seguendo la procedura proposta in questo lavoro non si vuole rappresentare una soglia univoca ma, sfruttando la flessibilità del metodo, lo scopo è raccogliere ed intercettare più informazioni possibili sulla potenzialità di registrare la minima magnitudo rilevabile per particolari stati della rete.

6. Conclusioni

È stato sperimentato un prototipo di procedura automatica di stima della minima magnitudo rilevabile dalla rete sismica ReSIICO per valutare e monitorare le sue prestazioni.

L'approccio utilizzato è di tipo empirico. Sono stati utilizzati i dati dei terremoti registrati dalla rete per fornire una relazione tra ampiezza del segnale di un evento e sua magnitudo e distanza. Inoltre sono stati utilizzati, per la stima del livello del disturbo, i dati reali di rumore continuo registrato dalla rete negli ultimi anni.

Particolarità della procedura è l'utilizzo dei dati di analisi del software PQLX, il quale è in grado automaticamente di organizzare in un *database* le analisi spettrali di lunghe serie temporali. Interrogando il *database* è possibile estrarre i parametri statistici dei livelli di rumore associati ad ogni stazione sismica della rete, selezionando i dati in base a differenti intervalli temporali.

Utilizzando i dati relativi ai livelli più probabili calcolati sull'intero *database*, sui dati dell'ultima settimana e su quelli relativi alle ore diurne e notturne, è possibile avere un quadro sintetico della stato della rete ogni giorno.

Il monitoraggio della *detection* attivato con la procedura automatica presentata è utile per seguire direttamente la capacità della rete nel momento attuale e rispetto alla sua capacità potenziale. Quest'ultima è catturata utilizzando i livelli di rumore di tutto il *database* di PQLX a disposizione ed è messa a confronto con i valori ottenuti nella settimana corrente. La procedura cattura anche la differenza quotidiana tra il giorno e la notte, ma è in grado di rilevare i momenti

di crisi della rete che fuoriescono dai risultati attesi. Questo può avvenire a causa di una parte di stazioni mal funzionanti, oppure per eventi meteorologici severi (ad esempio, vento forte su tutta l'area della rete).

La comparazione tra le mappe di *detection* e gli eventi sismici registrati dalla rete ReSIICO dal 2010 al 2013 ha permesso di valutare il diverso utilizzo delle stime di magnitudo di *detection* e ha dimostrato l'utilità dei risultati nel comprendere alcune caratteristiche delle variazioni spaziali e temporali di sismicità all'interno della rete. Infatti, mentre da una parte le valutazioni dei valori di *detection* ottenute su lunghi periodi temporali si avvicinano ai valori di magnitudo di completezza, le stime per particolari momenti intercettano la capacità della rete di rilevare la magnitudo minima possibile, come ad esempio durante le ore notturne.

Uno sviluppo tecnico futuro della procedura è l'organizzazione dei grigliati della *detection* in un *database* per poter estrarre e recuperare più velocemente i risultati delle stime, per ora solo archiviati in file ASCII. Mentre dal punto di vista metodologico sono necessarie ulteriori analisi per studiare la relazione tra probabilità dei livelli di rumore e magnitudo di completezza.

7. Ringraziamenti

Si ringrazia il Dott. Francesco Boccanera per aver fornito i dati relativi alla velocità del vento estratti dall'archivio del Centro Funzionale della Protezione Civile della Regione Marche.

Le figure delle mappe di *detection* sono state prodotte utilizzando GMT[®] [Wessel and Smith, 1995] e ArcGis[®]. La figura 3 è stata prodotta con il software PQLX [McNamara and Boaz, 2005].

La Figura 10 è stata generata dai *tools* di ZMAP [Wiemer, 2001] in ambiente Matlab[®].

Bibliografia

Cattaneo M., D'Alema E., Frapiccini M., Marzorati S., Monachesi G., (2011). *Acquisizione presso la sede di Ancona*. Riassunti estesi del I° workshop tecnico "Monitoraggio sismico del territorio nazionale: stato dell'arte e sviluppo delle reti di monitoraggio sismico", a cura di Cattaneo M. e Milena M., Miscellanea INGV, n° 10.

Chiaraluce L., Chiarabba C., Collettini C., Piccinini D., Cocco M., (2007). *Architecture and mechanics of an active low-angle normal fault: Alto Tiberina Fault, northern Apennines, Italy*. J. Geophys. Res., 112, B10310, doi:10.1029/2007JB005015.

Chiaraluce L., Amato A., Carannante S., Castelli V.,

Cattaneo M., Cocco M., Collettini C., D'Alema E., Di Stefano R., Latorre D., Marzorati S., Mirabella F., Monachesi G., Piccinini D., Nardi A., Piersanti A., Stramondo S., Valoroso L., (2014). *The Alto Tiberina Near Fault Observatory (northern Apennines, Italy)*. Annals of Geophysics, 57, 3, doi:10.4401/ag-6426.

Draper N.R. and H. Smith, (1998). *Applied Regression Analysis*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, pp. 307-312.

Marzorati S., (2007). *Fenomenologia del Noise Sismico Ambientale: dalla conoscenza del segnale alle applicazioni empiriche*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Milano-Bicocca (URL: <http://www.earth-prints.org/handle/2122/7960>).

Marzorati S. and Bindi D., (2006). *Ambient noise levels in north central Italy*. Geochem. Geophys. Geosyst., 7, 9, pp.14, Q09010, doi:10.1029/2006GC001256.

Marzorati S., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Frapiccini M., Ladina C., Monachesi G., (2012). *Emergenza sismica 2012 in Emilia Romagna: attività sperimentali di supporto alla rete sismica mobile INGV svolte dal personale della sede di Ancona*. Rapporti Tecnici INGV, n° 236, pp. 38.

McNamara D.E. and Boaz R.I., (2005). *Seismic Noise Analysis System, Power Spectral Density Probability Density Function: Stand-Alone Software Package*. United States Geological Survey Open File Report, NO. 2005-1438, pp. 30.

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

Monachesi G., Cattaneo M., D'Alema E., Frapiccini M., Marzorati S., Ferretti M., (2011). *Sistemi di controllo in uso al centro di acquisizione della sede di Ancona*. Riassunti estesi del I° workshop tecnico "Monitoraggio sismico del territorio nazionale: stato dell'arte e sviluppo delle reti di monitoraggio sismico", a cura di Cattaneo M. e Milena M., Miscellanea INGV, n° 10.

Monachesi G., Cattaneo M., Ladina C., Marzorati S., Frapiccini M., Carannante S., Ferretti M., Sebastianelli M., Delladio A., Selvaggi G., (2013). *Esperienze di monitoraggio integrato: il caso della Rete Sismometrica dell'Italia Centro Orientale, di quella Accelerometrica Marchigiana e dei suoi servizi*. Quaderni di Geofisica, n° 106, pp. 30.

Peterson J., (1993). *Observations and modeling of seismic background noise*. U.S. Geol. Surv. Open-File Rep., pp. 93-322.

Scales J. A. and Snieder R., (1998). *What is noise?*. Geophysics, 63, 4, pp. 1122-1124.

Shi Y. and Bolt B.A., (1982). *The standard error of the magnitude-frequency b-value*. Bull. Seismol. Soc. Am., 72, pp. 1677-1687.



- Strollo A., Parolai S., Jaeckel K.-H., Marzorati S., Bindi D., (2008). *Suitability of Short-Period Sensors for Retrieving Reliable H/V Peaks for Frequencies Less Than 1 Hertz*. Bull. Seismol. Soc. Amer., 98, 2, pp. 671-681, doi: 10.1785/0120070055.
- Wessel P. and Smith W.H.F., (1995). *New version of the Generic Mapping Tools released*. EOS Trans. AGU, 76, 329.
- Wiemer S., (2001). *A Software Package to analyze Seismicity: ZMAP*. Seismological Research Letters, 72, 2, pp. 374-383.

Indice

Introduzione	4
1. Operazioni di calcolo e parametrizzazione per la stima della magnitudo minima rilevabile	6
1.1 Stima dell'ampiezza del segnale sismico registrata alle stazioni	6
1.2 Stima dei livelli di rumore sismico delle stazioni	7
1.3 Discretizzazione dello spazio di analisi	8
2. Automatizzazione del calcolo	9
2.1 Estrazione dei livelli di disturbo dal <i>database</i> di PQLX	9
2.2 Calcolo della <i>detection</i>	11
2.3 Creazione delle mappe di <i>detection</i>	12
3. Visualizzazione delle mappe nella sala di monitoraggio	13
4. Variabilità della <i>detection</i>	13
5. Discussione ed esempi di utilizzo delle mappe di <i>detection</i>: il caso dell'Alta Valtiberina	14
6. Conclusioni	18
7. Ringraziamenti	19
Bibliografia	19

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2016 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia