



Concessione di stoccaggio di gas naturale
“Minerbio stoccaggio” (BO)
Struttura Preposta al Monitoraggio
Anno di esercizio 2019
Relazione Trimestrale N.1



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Progetto: SPERIMENTAZIONE ILG MINERBIO STOCCAGGIO

(Codice progetto: 913; Codice CUP: D81I18000300004)

UR-Milano / UR-Bologna

Maggio 2019

INDICE

1. Introduzione	1
2. Monitoraggio sismico	2
2.1. Domini di rilevazione e rete di monitoraggio sismico integrata (RSIMS)	2
2.2. Analisi di rumore sismico ambientale	6
2.3. Sismicità registrata	16
2.4. Conclusioni	20
3. Monitoraggio delle deformazioni del suolo da stazioni GPS in continuo.....	21
3.1. Aggiornamento della soluzione geodetica	21
3.1.1. Analisi della qualità del dato	22
3.1.2. Elaborazione dei dati e serie temporale di spostamento.....	23
3.2. Conclusioni	27
4. Monitoraggio delle pressioni di poro	27
Bibliografia.....	28

1. Introduzione

La concessione di stoccaggio di gas naturale “Minerbio Stoccaggio”, assegnata dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) a STOGIT S.p.A. (da qui in poi denominato “Concessionario”), interessa un’area di 68.6 km² situata in provincia di Bologna, principalmente nel territorio comunale di Minerbio (MiSE-DGS-UNMIG, 2017). La concessione, ubicata circa 18 km a nord-est di Bologna, viene a trovarsi in una zona caratterizzata da intensa attività antropica, legata sia ad attività produttive che alla presenza di importanti vie di comunicazione. Il giacimento di stoccaggio, situato ad una profondità media di 1270 m, appartiene alla categoria dei giacimenti a gas esauriti (*Depleted Field*) ossia sfruttato in passato durante la fase di produzione primaria protrattasi sino al 1971 e, dal 1975, convertito all’attività di stoccaggio (Fig. 1).

Il monitoraggio della sismicità dell’area, unitamente a quello delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro, viene effettuato dal Concessionario per la verifica delle condizioni di sicurezza di esercizio dei giacimenti anche in riferimento alle indicazioni contenute nel documento MiSE “Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell’ambito delle attività antropiche” (MiSE-DGS-UNMIG, 2014), da qui in poi denominato “ILG”. Quest’ultimo prescrive in particolare l’individuazione di una struttura preposta al monitoraggio (denominata “SPM”) e lo svolgimento di un’attività di sperimentazione del monitoraggio di attività antropiche come, ad esempio, lo stoccaggio di gas naturale in sotterraneo. In data 5/5/2016, il “Protocollo Operativo – Attività di Sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione *Minerbio Stoccaggio*”, sottoscritto da MiSE, Regione Emilia Romagna (RER) e Concessionario, individua l’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) come SPM (RER, 2016a; 2016b). Il Protocollo Operativo, avviato ufficialmente in data 11/7/2016 per la durata di due anni, viene poi attuato mediante la stipula di una convenzione della durata di un anno tra Comune di Minerbio e INGV, avviata ufficialmente in data 17/5/2018 (INGV, 2018a).

L’attività precedente l’attivazione di quest’ultima convenzione è stata rendicontata nel rapporto “Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). SPM - Monitoraggio Sismico – Anno di esercizio 2017 – Relazione N.01” (INGV-MI, 2017a), nel documento di sintesi inviato da INGV a MiSE, RER e Concessionario in data 27/7/2017 (INGV-MI, 2017b) e nel documento “Sintesi attività svolta nel periodo Luglio-Dicembre 2017 nell’ambito del Protocollo Operativo” (INGV-MI, 2018).

A partire da Gennaio 2018, l’attività svolta dalla SPM viene rendicontata mediante relazioni trimestrali corredate da allegati tecnici che illustrano le singole attività di monitoraggio. L’attività condotta nel primo trimestre 2018 è stata dunque sintetizzata nella Relazione Trimestrale N.1 (INGV, 2018b) e in particolare, gli allegati A e B della suddetta relazione illustrano dettagliatamente il monitoraggio sismico (INGV, 2018c) e il monitoraggio delle deformazioni del suolo da stazioni GPS in continuo (INGV, 2018d). I trimestri successivi sono invece stati rendicontati nelle Relazioni Trimestrali N.2 (INGV, 2018e), N.3 (INGV, 2018f) e N.4 (INGV, 2019). Il presente rapporto descrive l’attività di monitoraggio sismico relativa al periodo Gennaio – Marzo 2019 e aggiorna al 30 Marzo 2019 la soluzione geodetica presentata nell’allegato B della Relazione Trimestrale N.1 (INGV, 2018d) e aggiornata nella Relazione Trimestrale N.3 (INGV, 2018f).

Figura 1. Concessione di stoccaggio di gas naturale “Minerbio Stoccaggio” (rettangolo blu) e proiezione in superficie del contatto gas-acqua (GWC) originario del *reservoir* (linea gialla). Il contatto GWC è localizzato a 1370 m di profondità e corrisponde ad un’area di circa 8 km². Vengono mostrati i confini dei comuni interessati dalla concessione di stoccaggio. La linea chiara in alto a destra indica il confine tra le provincie di Bologna e Ferrara.



2. Monitoraggio sismico

2.1. Domini di rilevazione e rete di monitoraggio sismico integrata (RSIMS)

I domini di rilevazione per il monitoraggio sismico sono stati definiti nei precedenti rendiconti del Protocollo Operativo (INGV-MI, 2017a; INGV, 2018c) sulla base di una dettagliata analisi dell'assetto geostrutturale dell'area e considerando la geometria del *reservoir* in termini di profondità ed estensione della superficie del contatto GWC (INGV-MI, 2017a). Le Fig. 2 e 3 mostrano rispettivamente le proiezioni dei domini di rilevazione in superficie e lungo la sezione C-C' della Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Boccaletti et al., 2004).

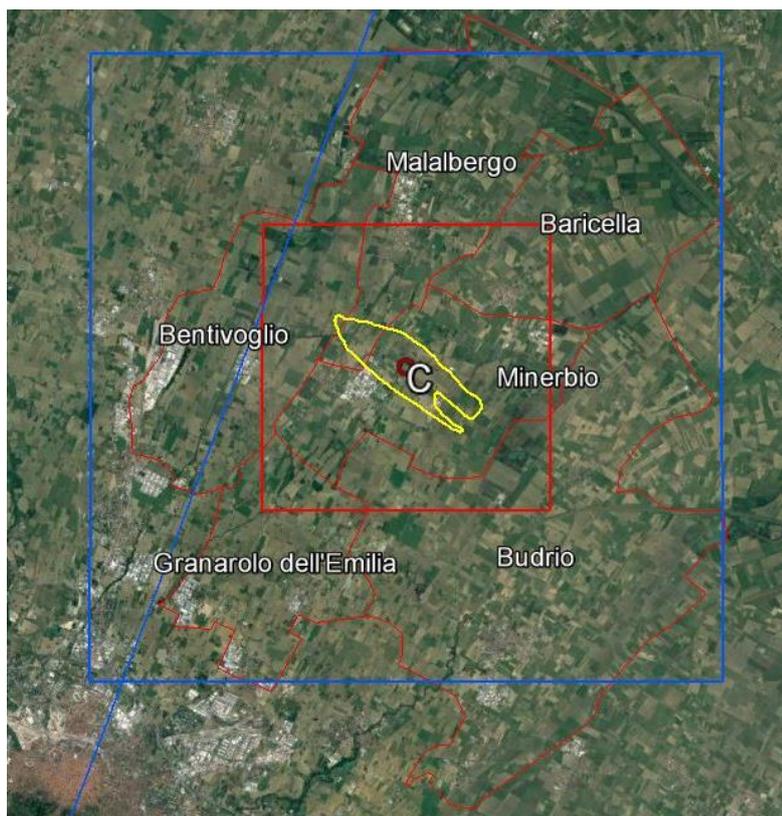


Figura 2. Proiezione in superficie dei domini di rilevazione interno (DI) ed esteso (DE) (box rosso e box blu, rispettivamente). DI e DE hanno dimensioni di $(10 \times 10 \times 5) \text{ km}^3$ e $(22 \times 22 \times 11) \text{ km}^3$ rispettivamente. Vengono mostrati la proiezione in superficie del contatto GWC, i confini dei comuni interessati dalla concessione "Minerbio Stoccaggio" e la posizione di C, il punto centrale delle proiezioni in superficie dei domini di rilevazione, di coordinate: 44.623 N; 11.490 E. La linea blu che affianca il lato ovest del dominio interno corrisponde alla traccia della sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004)., Le dimensioni lineari del contatto GWC, situato a 1370 m di profondità, sono di circa 2 e 6 km nelle direzioni NE-SO e NO-SE, rispettivamente.

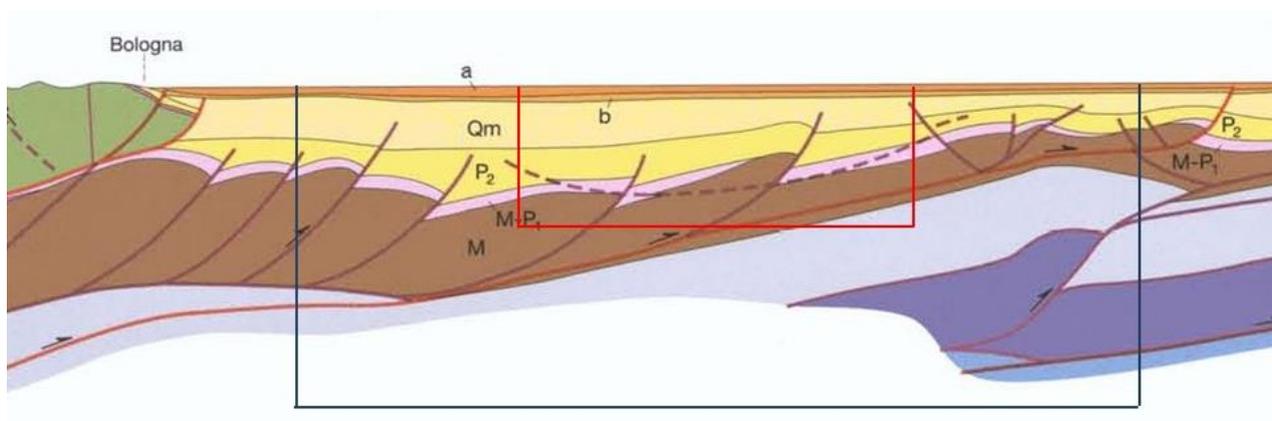


Figura 3. Proiezioni dei domini di rilevazione sulla sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004). Linea rossa: dominio interno; linea blu: dominio esteso. Le profondità dei domini DI e DE sono di 5 e 11 km, rispettivamente

La rete per il monitoraggio della microsismicità è stata completata in data 20/4/2018 con l'installazione delle ultime due stazioni della Rete Microsismica Minerbio Stoccaggio (RMMS). In tal modo, la RMMS risulta essere costituita da 4 stazioni in superficie (MI01; MI02; MI03; MI06) e 4 stazioni in pozzetto (MI04; MI05; MI08; MI10) equipaggiate con sensori velocimetrici a corto periodo. Il sensore da pozzo di MI04 è installato a 100 m di profondità mentre quelli di MI05, MI08 e MI10 sono installati ad una profondità di 150 m. MI04 è dotata anche di un accelerometro, installato in superficie. La RMMS così realizzata corrisponde alla configurazione di rete RP2018 illustrata nell'allegato A della Relazione Trimestrale N.1 (INGV, 2018c). La RMMS comprende 5 stazioni all'interno della proiezione in superficie di DI, installate a distanze comprese tra 0.9 e 3.9 km da C (punto centrale delle proiezioni in superficie dei domini di rilevazione) e 3 stazioni all'interno della proiezione in superficie della parte di DE non inclusa in DI, installate a distanze comprese tra 7.2 e 8.2 km da C (Fig.4).

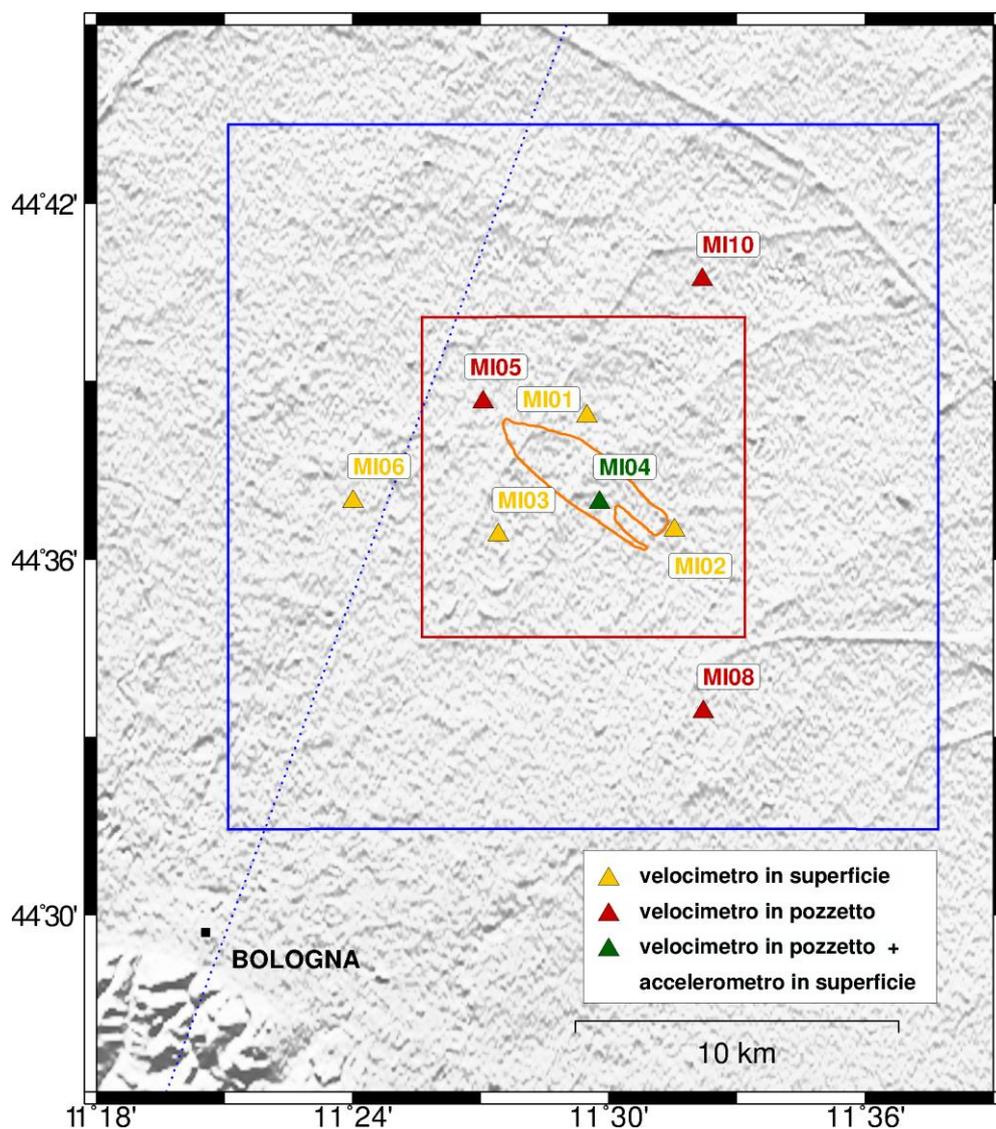


Figura 4. Configurazione della Rete Microsismica “Minerbio Stoccaggio”. I sensori velocimetrici in pozzetto sono installati alle profondità di 100 m (MI04) e di 150 m (MI05, MI08 e MI10). Vengono indicate le proiezioni in superficie della linea di contatto GWC (linea arancione), del Dominio Interno di rilevazione (figura quadrata rossa) e del Dominio Esteso di rilevazione (figura quadrata blu). La linea blu tratteggiata corrisponde alla sezione C-C' della Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Boccaletti et al., 2004).

Come indicato in MiSE-DGS-UNMIG (2014), la RMMS viene integrata dalle stazioni delle reti regionali operanti nell'area. A tal fine sono state considerate 12 stazioni della Rete Sismica Nazionale (RSN) (INGV-CNT (2018a) e 2 stazioni del Progetto AlpArray (AlpArray, 2016; INGV, 2016). Ad eccezione della stazione AlpArray A307A, collocata all'interno della proiezione in superficie di DI ad una distanza di 6.0 km da C, le stazioni che integrano la RMMS sono installate a distanze comprese fra 25 e 55 km circa da C. Complessivamente sono installati 8 sensori velocimetrici a corto periodo (NDIM, CAVE, RAVA, SERM, IMOL, ZCCA, MTRZ, BRIS) e 10 accelerometri (NDIM, SERM, FERS, MODE, CMPO, FAEN, BRIS, IMOL, MTRZ, ZCCA). 6 siti sono equipaggiati mediante doppio sensore (SERM, IMOL, MTRZ, ZCCA, BRIS, NDIM) e fra questi, SERM e IMOL sono dotati di sensore velocimetrico installato in pozzetto (a 135 e 175 m di profondità, rispettivamente). Le due stazioni AlpArray sono equipaggiate con sensori velocimetrici broad-band. La disposizione della Rete Sismica Integrata Minerbio Stoccaggio (RSIMS) viene mostrata in Fig. 5 mentre in Tab. 1 vengono riportate le caratteristiche strumentali. Le stazioni della RSN, del progetto AlpArray e della RMMS sono contrassegnate dalle sigle "IV"; "Z3" e "MI", rispettivamente.

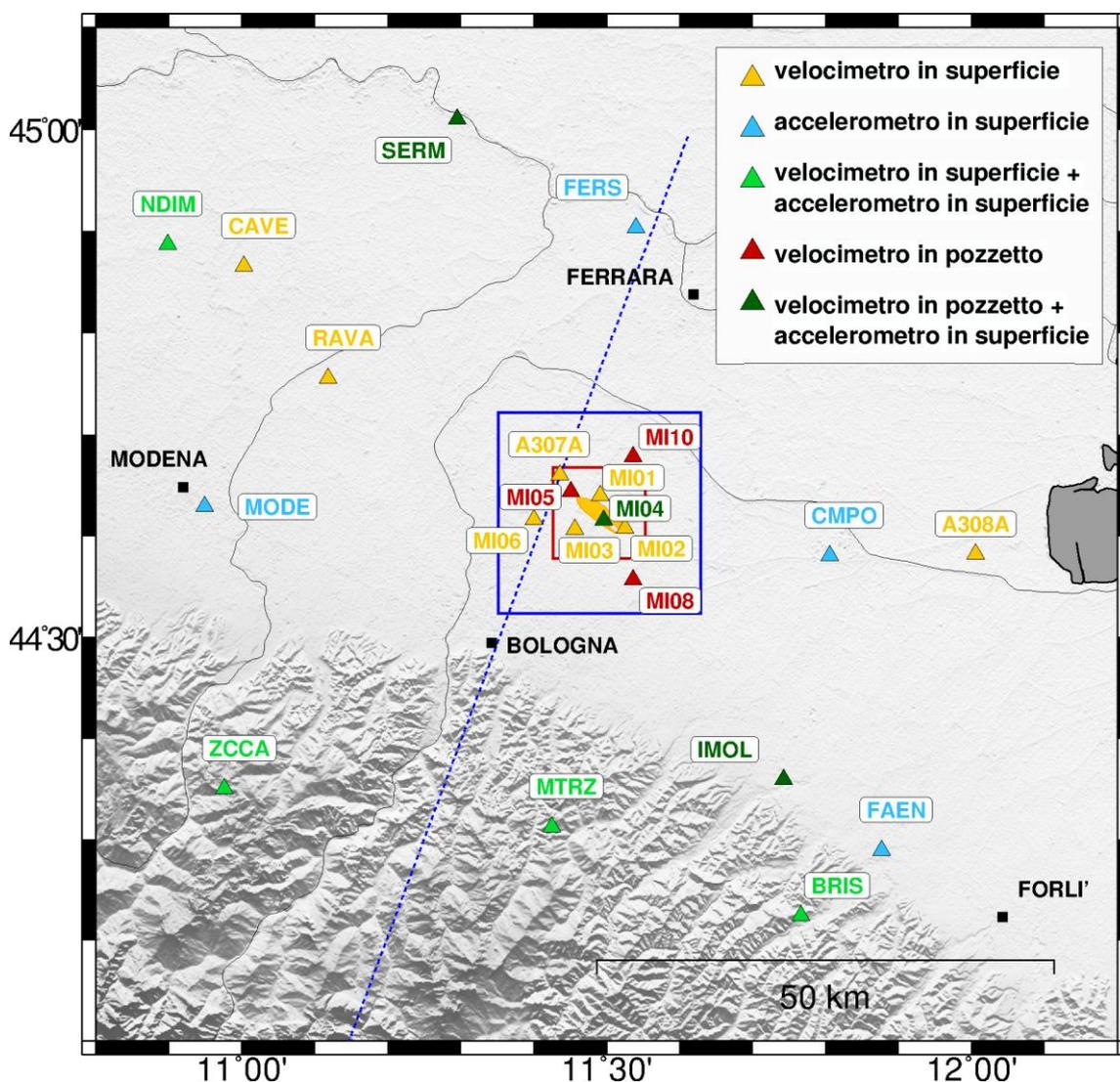


Figura 5. Stazioni della Rete Sismica Integrata Minerbio Stoccaggio (RSIMS). I sensori velocimetrici in pozzetto sono installati a profondità variabili tra 100 e 200 m (cfr. Tab. 1). Vengono indicate le proiezioni in superficie della linea di contatto GWC (linea gialla), del Dominio Interno di rilevazione (figura quadrata rossa) e del Dominio Esteso di rilevazione (figura quadrata blu). La linea blu tratteggiata corrisponde alla sezione C-C' della Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Boccaletti et al., 2004).

Rete	Sigla Stazione	Lat. N (°)	Lon. E (°)	Quota (m)	Profondità (m)	Località	Distanza (km)	Azimuth (°)	Acquisitore	Sensore 1	Sensore 2
MI	MI01	44.64014	11.49142	9	0	Minerbio - Fondo Fiumicello	1.9	3	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_
MI	MI02	44.60820	11.52558	9	0	Minerbio - San Martino in Soverzano	3.3	120	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_
MI	MI03	44.60666	11.45678	15	0	Minerbio – Spettolera	3.2	235	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S-MKIII	_
MI	MI04	44.61596	11.49631	11	100	Minerbio – Tintoria	0.9	147	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-BH	SARA SA10 2G
MI	MI05	44.64411	11.45093	9	150	Bentivoglio – Saletto	3.9	307	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10 BHV	_
MI	MI06	44.61623	11.40021	17	0	Bentivoglio – Santa Maria in Duno	7.2	264	Solgeo Dymas 24 Master	SARA S02	LE3D-1S-MKIII
MI	MI08	44.55698	11.53678	18	150	Budrio – Riccardina	8.2	153	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10 BHV	_
MI	MI10	44.67853	11.53648	7	150	Malalbergo- Boschi	7.2	31	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10 BHV	_
IV	BRIS	44.22454	11.76657	260	0	Brisighella	49.5	153	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G
IV	CAVE	44.86580	11.00310	18	0	Cavezzo	47.1	305	GAIA2	TRILLIUM-120S	_
IV	CMPO	44.58080	11.80560	2	0	Campotto Po	25.5	100	GAIA2	_	EPISENSOR-2G
IV	FAEN	44.28950	11.87700	41	0	Faenza	48.2	140	GAIA2	_	EPISENSOR-2G
IV	FERS	44.90350	11.54060	3	0	Ferrara	31.4	7	GAIA2	_	EPISENSOR-2G
IV	IMOL	44.35955	11.74248	27	175	Imola	35.5	145	GAIA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G
IV	MODE	44.62972	10.94917	41	0	Modena	42.9	271	GAIA2	_	EPISENSOR-2G
IV	MTRZ	44.31280	11.42480	570	0	Monterenzio	34.9	188	TRIDENT	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G
IV	NDIM	44.88730	10.89870	19	0	Novi di Modena	55.3	302	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G
IV	RAVA	44.75587	11.11880	15	0	Ravarino	32.9	297	GAIA2	LE3D-5S	_
IV	SERM	45.00997	11.29582	7	135	Sermide	45.7	340	GAIA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G
IV	ZCCA	44.35085	10.97650	700	0	Zocca	50.8	234	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G
Z3	A307A	44.66076	11.43631	9	0	Bentivoglio	6.0	315	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_
Z3	A308A	44.58249	12.00568	-2	0	Longastrino	41.2	96	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_

Tabella 1. Rete Sismica Integrata Minerbio Stoccaggio (RSIMS): stazioni della Rete Microsismica Minerbio Stoccaggio gestita dal Concessionario (sigla “MI”), installate all’interno della proiezione superficiale del Dominio Esteso di rilevazione; stazioni della Rete Sismica Nazionale (sigla “IV”) e stazioni del progetto AlpArray (sigla “Z3”). Le stazioni IV e Z3 sono installate in un’area di (110 x 110) km² centrata attorno alla posizione del giacimento “Minerbio Stoccaggio”. In particolare vengono riportate la quota dei sensori e la profondità dei sensori velocimetrici, il tipo di acquisitore e i sensori installati, la distanza e l’azimuth rispetto al punto C di Fig.2. Si noti che gli accelerometri sono tutti installati in superficie. Il 27/06/2018, il sensore 1 della stazione MI04 è stato sostituito con un sensore velocimetrico caratterizzato dalla medesima frequenza propria (1 Hz) modello SARA SS10BHV. Nel periodo 17/01/2019 – 07/02/2019, questo sensore è stato sostituito temporaneamente da uno strumento Lennartz LE3D-BH. Fra il 17/09/2018 e il 17/01/2019 invece, lo strumento ha mostrato un malfunzionamento nella registrazione della componente verticale del moto.

A partire da Marzo 2018 i segnali registrati dalle stazioni riportate in Tab.1 vengono acquisiti in tempo reale su server dedicato presso INGV-MI. L’acquisizione in tempo reale viene realizzata mediante il software Seedlink (IRIS, 2018a) utilizzato dai più importanti centri di ricerca sismologica e ampiamente collaudato da INGV. Presso INGV-MI è stato creato e configurato il nodo master dedicato all’acquisizione dati Seedlink, nel quale confluiscono direttamente i dati delle stazioni della RSN e di AlpArray che compongono la RSIMS (cfr. Tab.1) e i dati provenienti dal nodo Seedlink, realizzato presso il Concessionario, che raccoglie i segnali trasmessi dalle stazioni della RMMS. Questo tipo di configurazione permette di implementare facilmente la RMMS con eventuali nuove stazioni. L’attività svolta nel primo semestre 2018 ha inoltre consentito di completare il popolamento dell’archivio delle forme d’onda registrate in continuo da tutte le stazioni della rete, anche relativamente ai periodi precedenti la realizzazione del collegamento in tempo reale. Attualmente, l’archivio risulta completo a partire da Maggio 2015 e costantemente aggiornato in tempo reale a partire da Marzo 2018. I dati registrati in continuo dalle stazioni della RSIMS sono archiviati nel formato miniSEED (IRIS, 2018b), affermatosi da tempo in ambito scientifico come formato standard per la trasmissione in tempo reale dei dati sismici.

Sul server di acquisizione sono stati installati il software PQLX (USGS, 2018), che consente di effettuare in tempo reale una prima analisi di qualità delle forme d'onda acquisite, e un sistema di riconoscimento automatico di segnali transienti in coincidenza temporale (trigger off-line), per l'individuazione di eventuali eventi sismici (Cattaneo et al., 2011). A partire dalle registrazioni in continuo, in corrispondenza di ogni evento riconosciuto il sistema di trigger produce una serie di tracce "tagliate" appartenenti alle stazioni che sono risultate in coincidenza rispetto all'evento stesso. Mediante un ulteriore software (SacPicker - Spallarossa et al., 2011), ogni evento riconosciuto viene poi rivisto manualmente per definirne l'eventuale natura sismica e calcolarne la magnitudo e i parametri di localizzazione.

A scopo di monitoraggio preventivo, a valle del sistema di acquisizione è stato comunque installato e configurato anche il software Earthworm (Earthworm Central, 2016) che consente: il riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale; la localizzazione degli eventi e il calcolo della magnitudo.

2.2. Analisi di rumore sismico ambientale

Nel periodo Gennaio-Marzo 2019 è proseguita l'analisi della qualità delle forme d'onda registrate dalle stazioni della RSIMS mediante la stima del rumore sismico ambientale. A tal fine è stato impiegato il software PQLX (USGS, 2018), che utilizzando l'algoritmo sviluppato da McNamara e Buland (2004) per calcolare lo spettro di potenza (PSD) del segnale registrato in continuo, analizza finestre della durata di un'ora, con sovrapposizione del 50%, ottenendo in tal modo 48 curve di PSD per ogni giorno di registrazione. Le finestre vengono sovrapposte allo scopo di diminuire la varianza della stima. Le Probability Density Functions (PDF) di PSD possono poi essere stimate scegliendo il periodo di funzionamento della stazione. In questo rapporto le PDF vengono calcolate per il periodo Gennaio - Marzo 2019 considerando separatamente le stime orarie diurne e quelle notturne. Le PDF così ottenute vengono poi confrontate con le curve standard di riferimento NHNM (New High Noise Model) e NLNM (New Low Noise Model) ricavate da Peterson (1993). Per il periodo preso in considerazione sono state ottenute circa 4400 curve PSD per ciascuna stazione; in generale, l'andamento delle PDF calcolate per il primo trimestre del 2019 è del tutto in linea con i risultati ottenuti nel 2018 (INGV, 2018c; 2018e; 2018f; 2019). Le PDF di PSD, calcolate con le componenti verticali del moto, sono mostrate nelle figure da 6 a 13. Ogni figura è suddivisa in 6 pannelli, realizzati utilizzando gli strumenti di analisi messi a disposizione da PQLX. A partire dalla PDF ottenuta per tutto il periodo analizzato (pannello A0) viene operata una selezione delle PSD che hanno contribuito alla PDF stessa (pannello A0 – riquadri colorati in rosso e in giallo) allo scopo di visualizzare le tracce corrispondenti (pannello B0), le PDF corrispondenti (pannelli A1 e A2) e i corrispondenti intervalli temporali (pannelli B1 e B2). Nei pannelli B1 e B2 vengono riportati in ascissa i giorni giuliani e in ordinata il tempo GMT. I segmenti verticali indicano gli intervalli temporali corrispondenti alle PSD selezionate. I pannelli A1 e B1 si riferiscono alla selezione indicata dal riquadro colorato in rosso, corrispondente alle PSD più rumorose, mentre i pannelli A2 e B2 si riferiscono alla selezione indicata dal riquadro colorato in giallo, corrispondente alle PSD meno rumorose. Il pannello B0 si riferisce alle serie temporali selezionate dal riquadro rosso. Di seguito viene riportata l'analisi di dettaglio relativa ad ogni singola stazione.

MI01

Nel pannello A0 risulta ben visibile la presenza di uno sdoppiamento della PDF per frequenze maggiori di 1.0 Hz. Selezionando il ramo superiore (rettangolo rosso) si nota che le relative PSD (cfr. pannello A1) sono generate nelle ore diurne, mediamente dalle 06:00 GMT alle 18:00 GMT (cfr. pannello B1). Il ramo inferiore, selezionato con il rettangolo giallo indicato nel pannello A0, è invece relativo alle PSD generate mediamente nelle ore notturne e durante i giorni festivi (cfr. pannello B2). Come si può notare, i pannelli B1 e B2 sono tra loro complementari. Mediamente, per frequenze > 1 Hz i livelli di rumore osservati durante le ore diurne si attestano attorno a circa -100 dB, con una variazione di circa 15 dB rispetto ai livelli di rumore che si osservano durante la notte.

MI02

Come per MI01, anche in questo caso si può osservare uno sdoppiamento della PDF per frequenze maggiori di 1.0 Hz. I livelli medi di rumore osservati durante le ore diurne si attestano attorno a circa -105 dB, con una variazione giorno/notte di circa 15 dB.

MI03

La stazione MI03 si conferma più rumorosa delle precedenti: questa caratteristica risulta ben visibile osservando il ramo inferiore della PDF per frequenze > 1Hz (cfr. pannello A0). Le corrispondenti curve di PSD, che si riferiscono alle ore notturne (cfr. pannello B2), risultano infatti mediamente superiori alle curve NHNM di Peterson (1993). Per questa stazione, i livelli di rumore osservati durante il giorno per frequenze > 1Hz si attestano attorno a circa -100 dB, mentre la differenza giorno/notte è di circa 10 dB.

MI04

L'analisi della PDF ottenuta con le componenti orizzontali delle registrazioni di questa stazione, equipaggiata con sensore in pozzetto a 100 m di profondità, evidenzia la presenza del tipico sdoppiamento della PDF per frequenze maggiori di 1.0 Hz, dovuto alla variazione giorno/notte del livello medio di rumore sismico ambientale. La stazione è caratterizzata da un livello medio di rumore piuttosto elevato che, per frequenze > 1 Hz si attesta attorno a -110 dB, e mostra una variazione di circa 20 dB rispetto ai livelli di rumore osservati durante la notte. Come si vede, la componente verticale, caratterizzata da un livello medio di rumore più elevato (-100 dB), mostra ancora una anomalia di funzionamento che tuttavia si limita al periodo che va dal giorno giuliano 001 al giorno giuliano 038. Nel periodo 17/01/2019 – 07/02/2019, il sensore è stato infatti sostituito temporaneamente da uno strumento Lennartz LE3D-BH, non perfettamente funzionante e solo a partire dal 07/02/2019 è stato possibile reinstallare il sensore modello SARA SS10BHV funzionante.

MI05

Il sensore della stazione MI05 è installato in pozzetto ad una profondità di 150 m. Le differenze giorno/notte delle curve PDF sono decisamente meno evidenti (5 dB circa) rispetto a quelle osservate con le stazioni poste in superficie. Durante le ore diurne, per frequenze > 1 Hz il livello di rumore osservato si attesta mediamente attorno a -110 dB.

MI06

La stazione, equipaggiata con sensore posto in superficie, risulta decisamente rumorosa, con livelli di rumore che mediamente risultano superiori alla curva NHNM di circa 15 dB attorno a 2 Hz. Nella banda di frequenza 1-5 Hz, le curve di PSD mostrano un particolare aumento del livello di rumore, con una variazione giorno/notte piuttosto limitata (circa 5 dB), ben evidenziata dalle selezioni 1 e 2 operate sulla PDF complessiva (cfr. Fig.11). Una terza selezione, indicata sul pannello A0 di Fig. 11 dalla freccia verde, evidenzia un consistente livello di rumore presente anche nelle ore notturne in tutte le giornate lavorative (cfr. Fig. 11, pannelli A3 e B3).

MI08

La stazione MI08, equipaggiata con sensore in pozzetto a 150 m di profondità, risulta più silenziosa delle precedenti, con una differenza tra i livelli di rumore osservati durante il giorno e durante la notte di circa 10 dB per frequenze > 1Hz. Isolando la parte più energizzata dalla PDF, nel medesimo intervallo di frequenza si misurano livelli di PSD attorno a -120 dB, leggermente inferiori rispetto a quelli delle curve di riferimento NHNM.

MI10

La stazione MI10, equipaggiata con sensore in pozzetto a 150 m di profondità, presenta dei livelli di rumore molto simili a quelli della stazione MI08. Non risulta evidente una chiara differenza tra i livelli di rumore giorno/notte e, per frequenze comprese tra 1 e 3 Hz, le PSD sono mediamente inferiori alla curva di riferimento NHNM di una quantità variabile tra 10 e 25 dB.

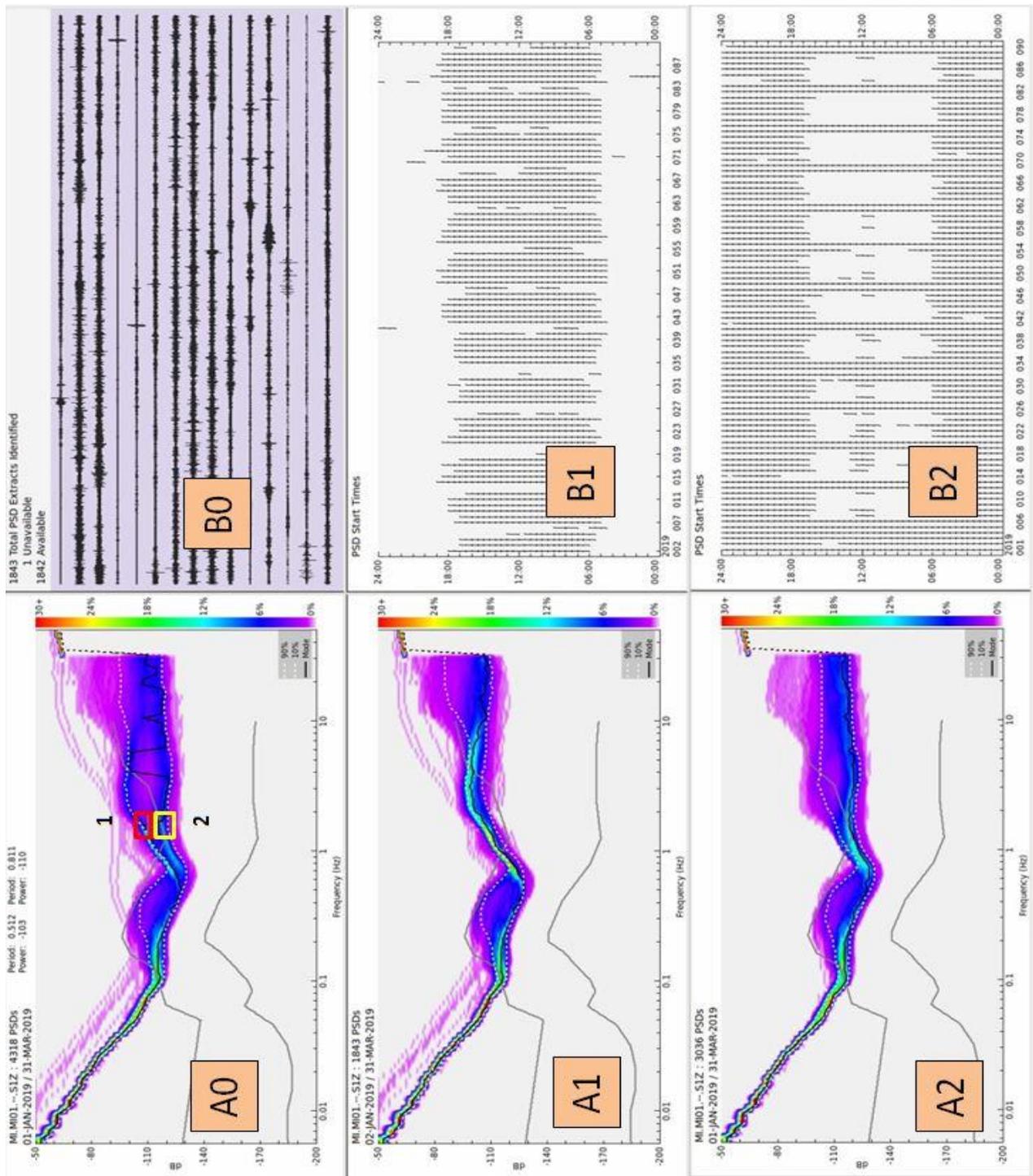


Fig. 6. Pannelli A0, A1 e A2: densità di probabilità (PDF) dello spettro di potenza (PSD) del rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 30/3/2019 dalla stazione MI01 (componente verticale del moto). I pannelli A1 e A2 mostrano le PDF corrispondenti alle selezioni 1 (box rosso) e 2 (box giallo), rispettivamente, operate sulla PDF complessiva, mostrata nel pannello A0. I valori spettrali, rappresentati in funzione del periodo, si riferiscono allo spettro di potenza (PSD), misurato in $(m/s^2)^2/Hz$ ed espresso in dB, di un segnale di accelerazione della durata di un'ora. Per calcolare il PSD vengono utilizzate finestre di segnale con sovrapposizione del 50%. La scala di colore (in ordine crescente dal viola al rosso) rappresenta la percentuale dei campioni di PSD osservati nel periodo di tempo esaminato. Le linee grigie rappresentano le curve NHNM (New High Noise Model) e NLNM (New Low Noise Model), in alto e in basso rispettivamente, ottenute da Peterson (1993). Le linee chiare tratteggiate rappresentano il 10° e il 90° percentile della funzione di distribuzione. Nel pannello B0 vengono mostrate le serie temporali corrispondenti alla selezione 1. Gli intervalli orari corrispondenti alle selezioni 1 e 2 sono indicati come segmenti verticali nei pannelli B1 e B2 rispettivamente. L'ascissa e l'ordinata di entrambi i pannelli riportano rispettivamente il giorno giuliano e il tempo GMT.

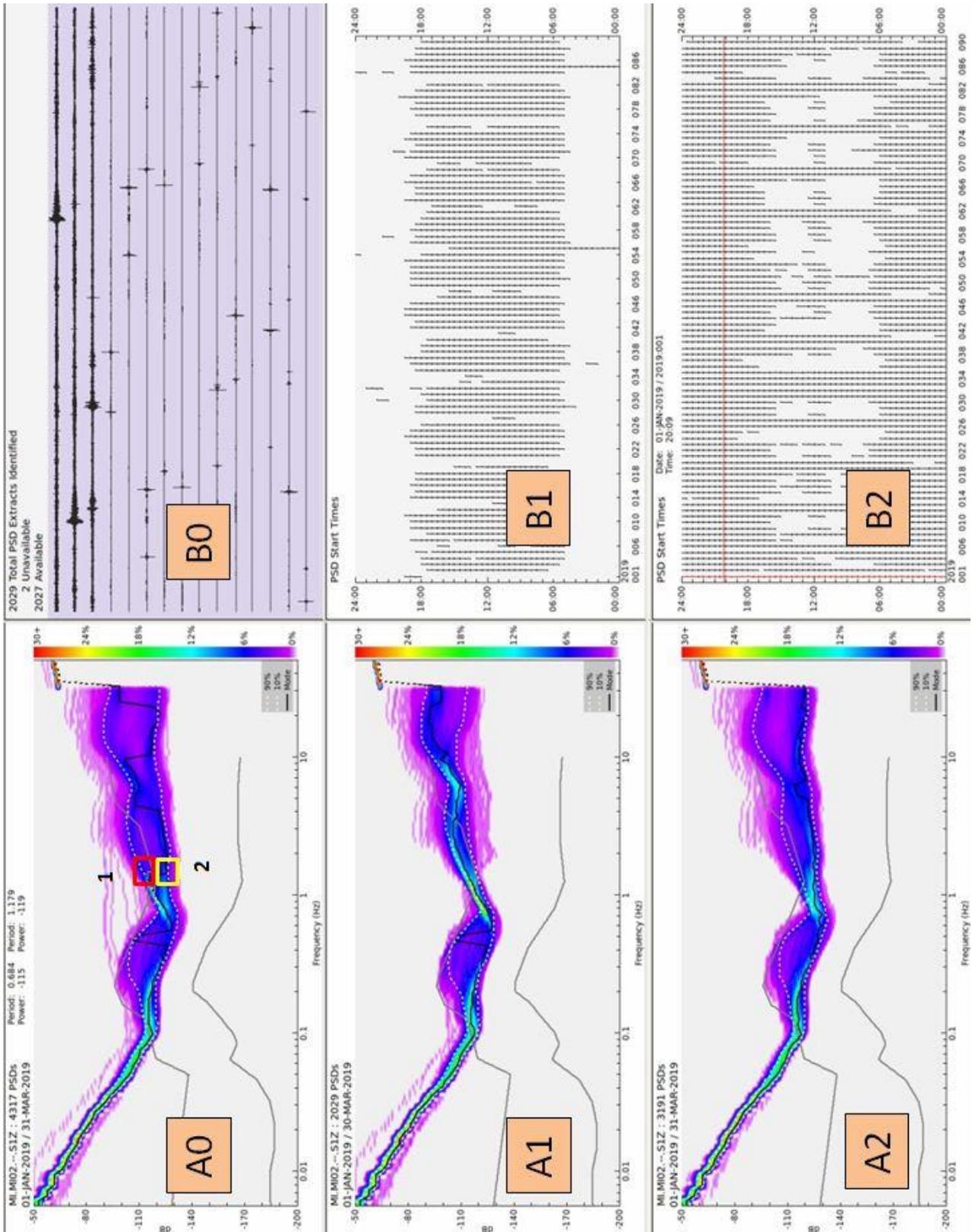


Fig. 7. Come in Fig. 6 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 dalla stazione MI02 (componente verticale del moto).

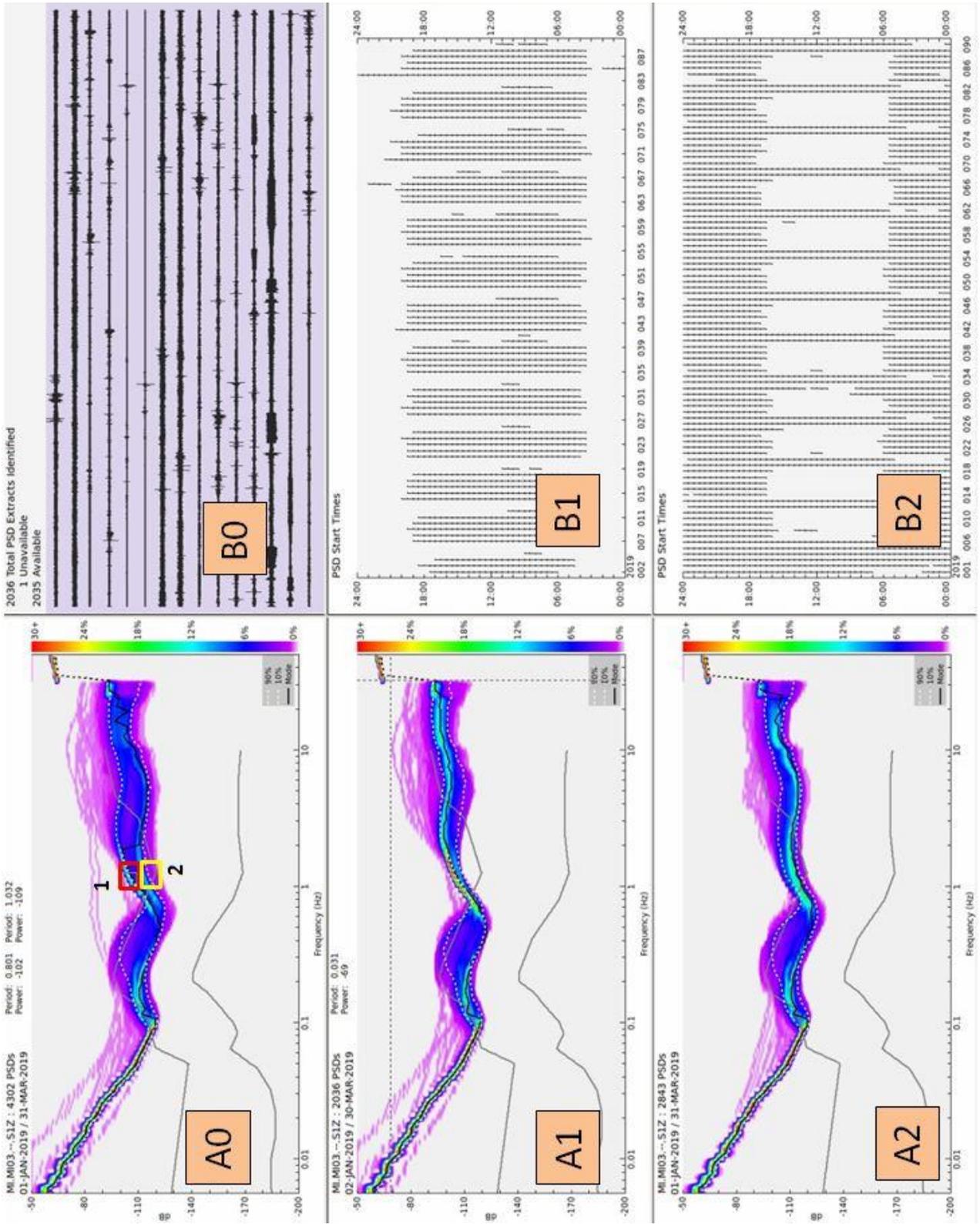


Fig. 8. Come in Fig. 6 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 dalla stazione MI03 (componente verticale del moto).

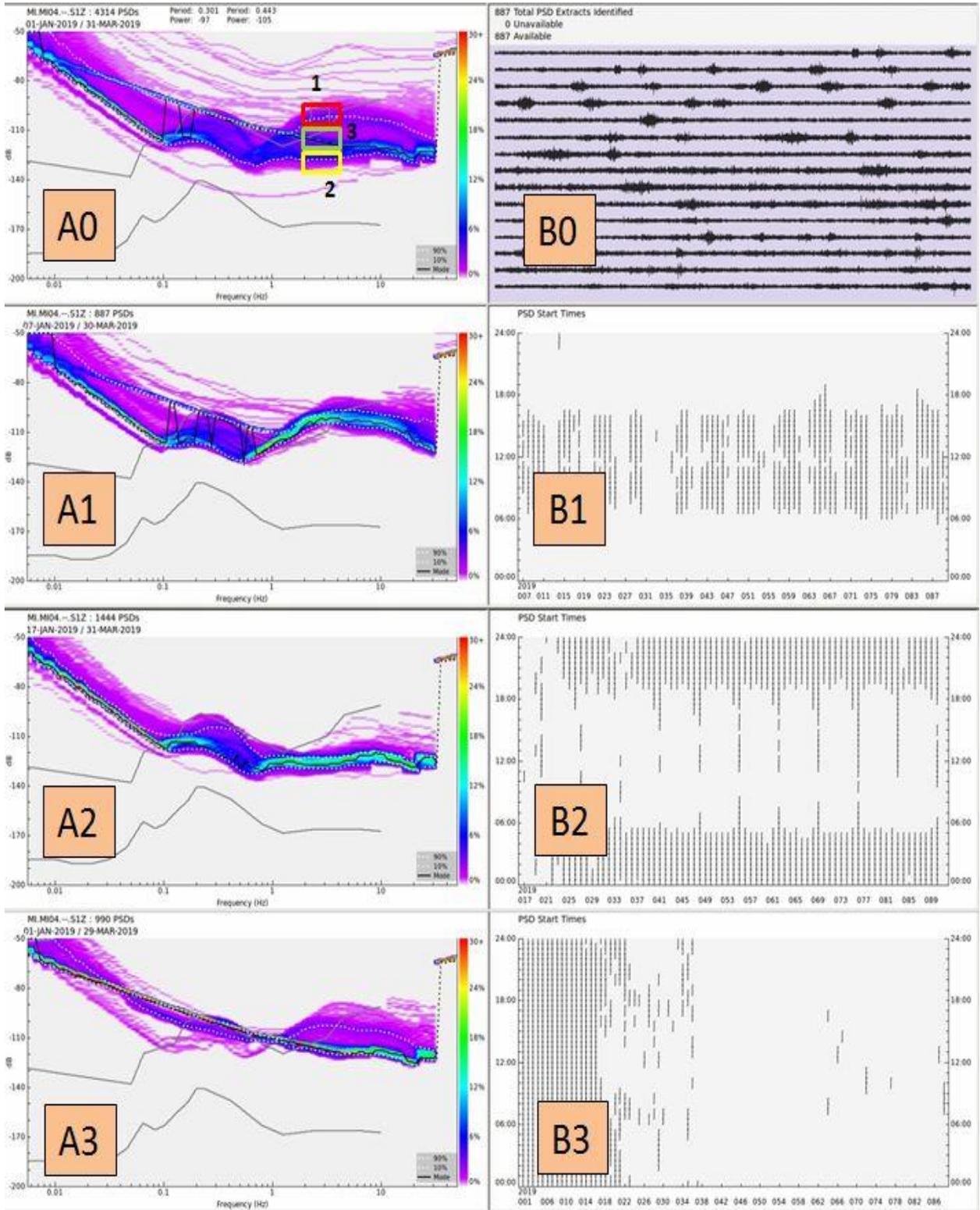


Fig. 9. Pannelli A0, A1, A2, B0, B1, B2: come in Fig. 6 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 dalla stazione MI04 (componente verticale del moto), con le selezioni 1 e 2 indicate dai riquadri rosso e giallo rispettivamente. Pannelli A3 e B3: selezione 3 operata sulla PDF complessiva, mostrata nel pannello A0 (riquadro verde).

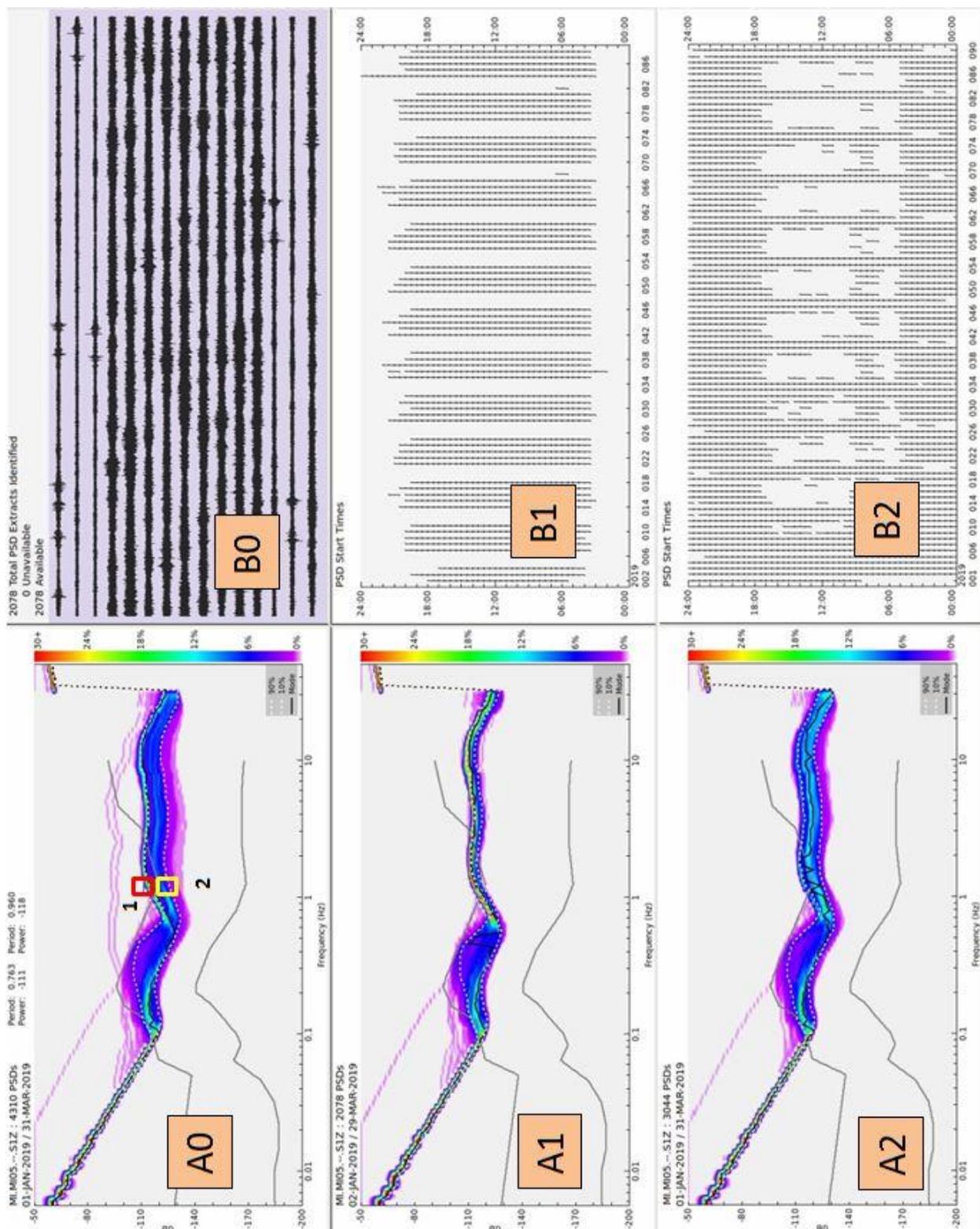


Fig. 10. Come in Fig. 6 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 dalla stazione MI05 (componente verticale del moto).

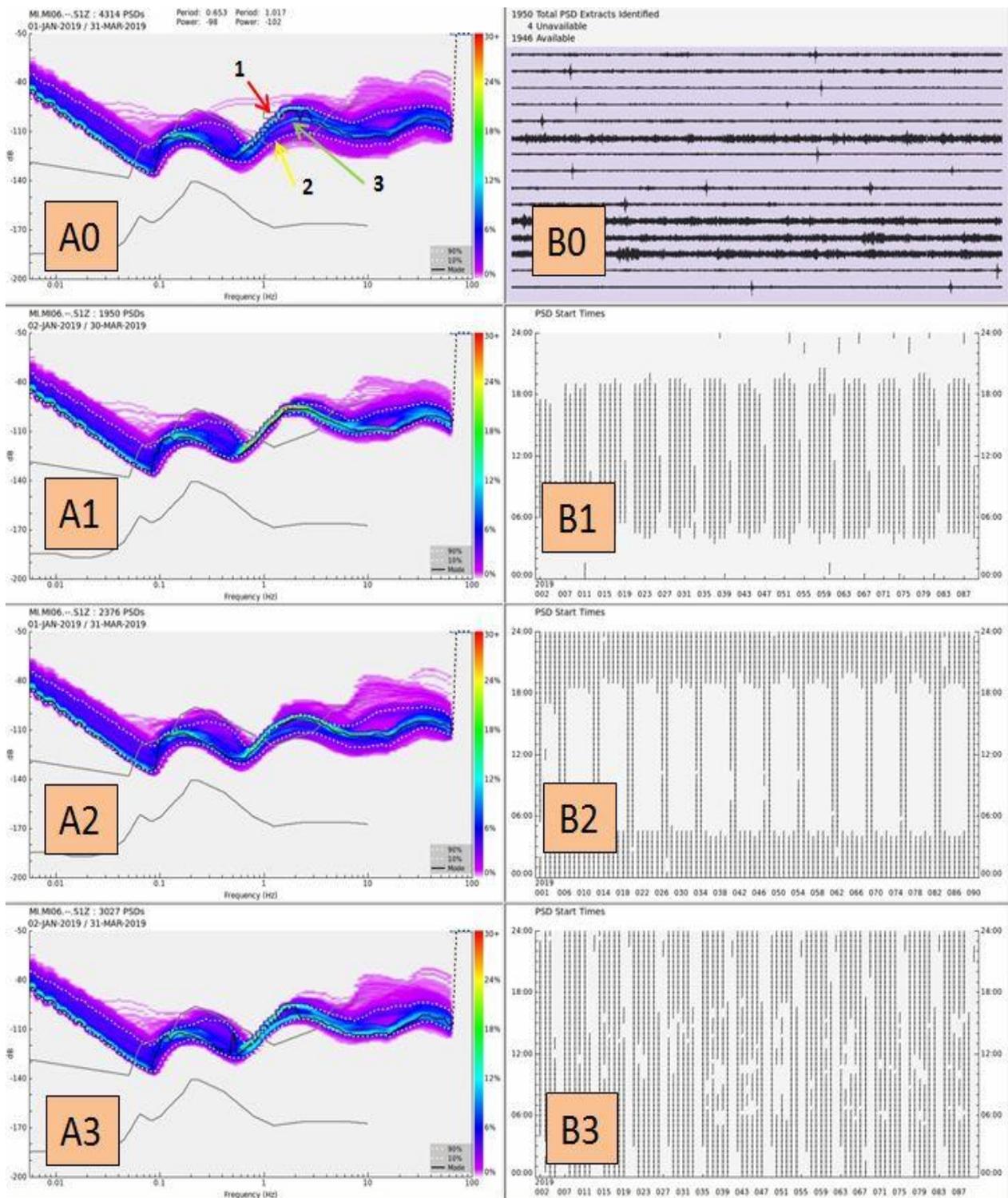


Fig. 11. Pannelli A0, A1, A2, B0, B1,B2: come in Fig. 6 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 dalla stazione MI06 (componente verticale del moto), con le selezioni 1 e 2 indicate dalle frecce rossa e gialla rispettivamente. Pannelli A3 e B3: selezione 3 operata sulla PDF complessiva, mostrata nel pannello A0 (freccia verde).

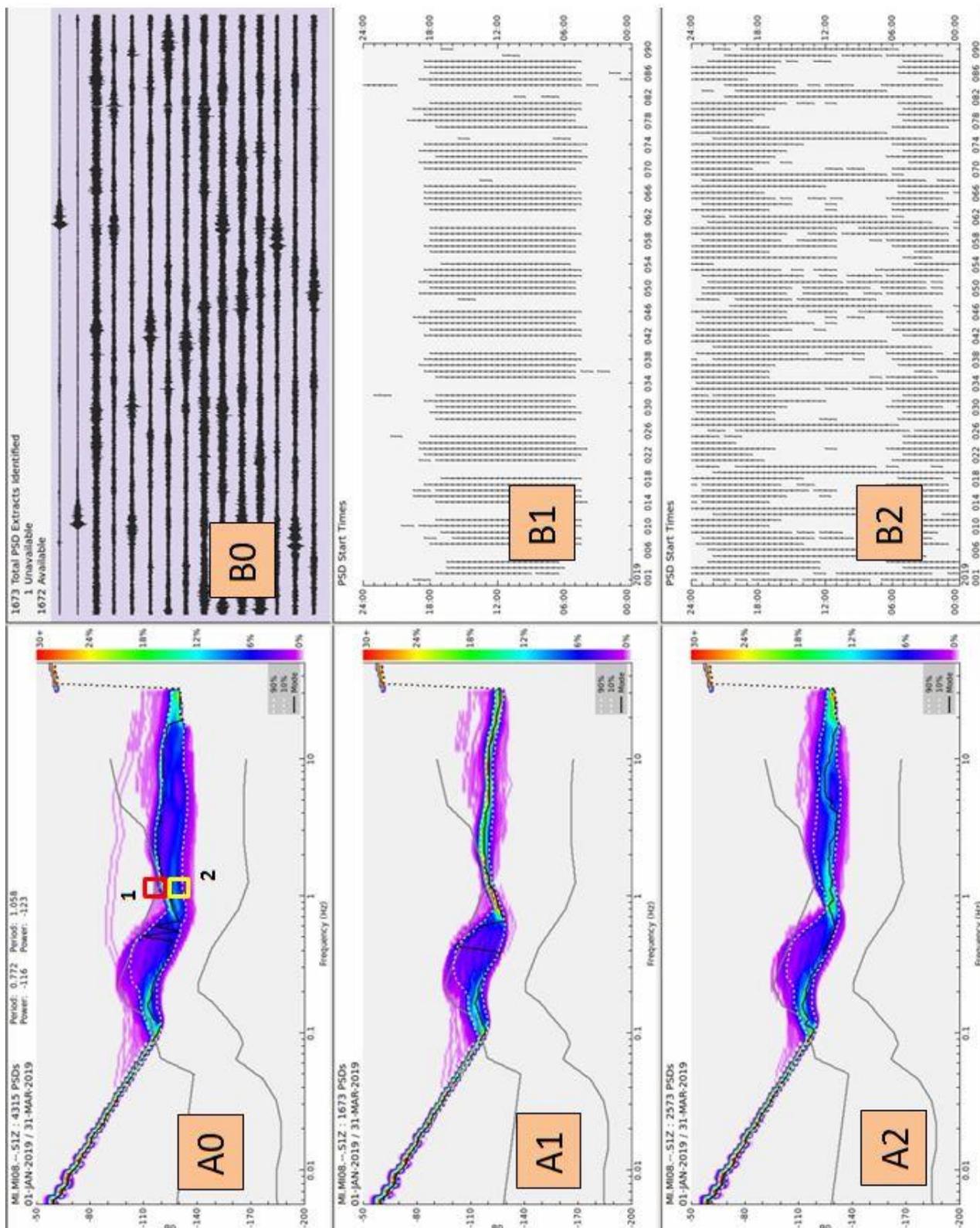


Fig. 12. Come in Fig. 6 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 dalla stazione MI08 (componente verticale del moto).

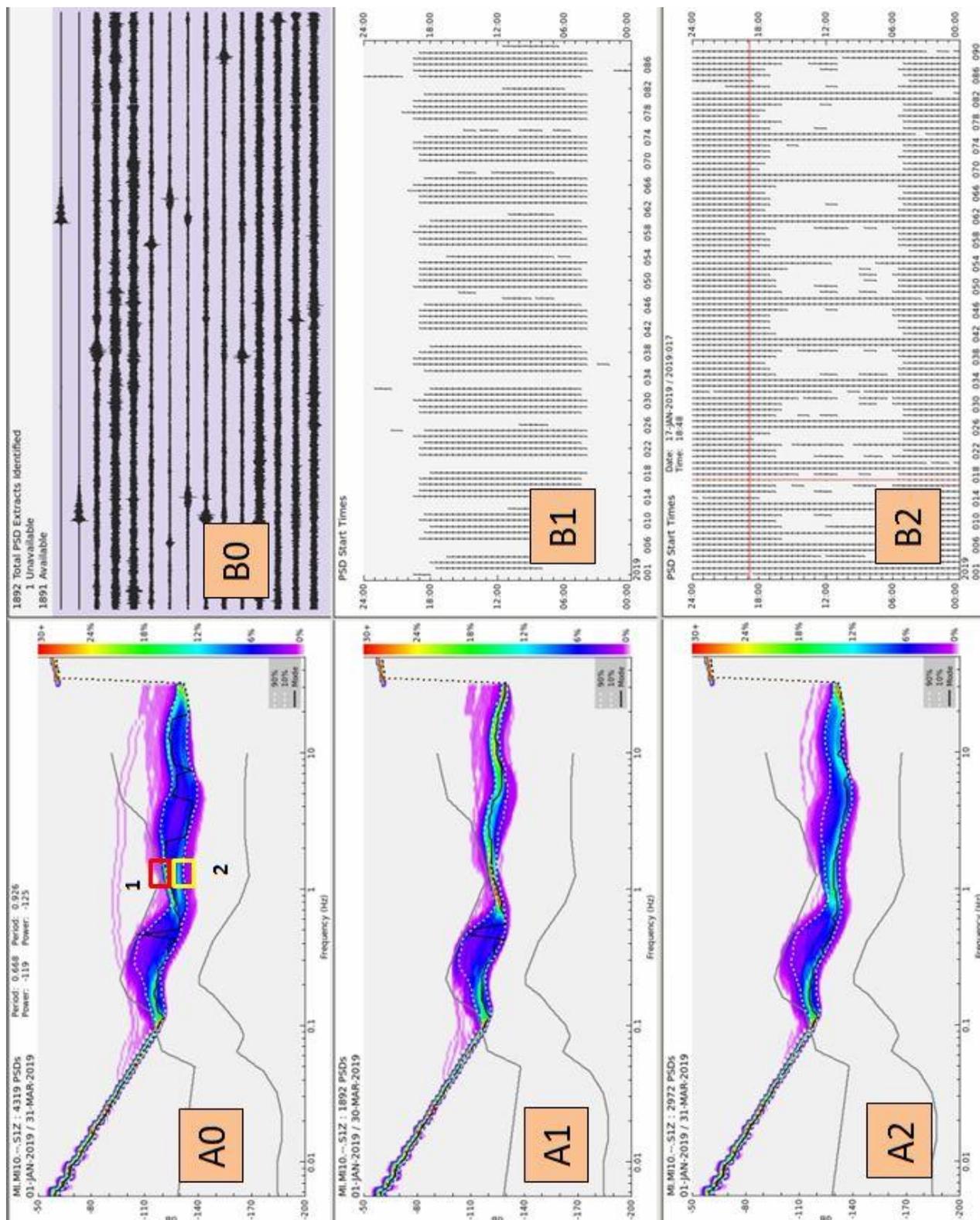


Fig. 13. Come in Fig. 6 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 dalla stazione MI10 (componente verticale del moto).

2.3. Sismicità registrata

La micro-sismicità dell'area è stata monitorata utilizzando i segnali registrati dalla RSIMS nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 e acquisiti nel medesimo periodo presso INGV-MI. A tal fine è stata applicata una procedura di analisi che consiste di due fasi successive:

- 1) mediante un sistema di trigger off-line basato su un algoritmo di tipo STA/LTA che utilizza i dati dell'archivio delle forme d'onda in continuo (Cattaneo et al., 2011), è stato prodotto automaticamente un data-set di segnali transienti in coincidenza temporale (eventi).
- 2) mediante il software SacPicker (Spallarossa et al., 2011), ogni evento è stato processato manualmente al fine di identificarne l'eventuale natura sismica e, in caso affermativo, di stimarne la localizzazione e la magnitudo.

I parametri del trigger sono stati stabiliti mediante numerosi test effettuati con i dati registrati dalla RSIMS nel periodo 1/1/2017 – 31/12/2017, tenendo conto degli obiettivi del monitoraggio microsismico previsti dal Protocollo Operativo (RER, 2016a; 2016b). Trattandosi di un data-set limitato costituito da eventi che devono essere sottoposti ad una fase di elaborazione manuale, si è deciso di applicare parametri di trigger che permettessero di individuare anche eventi (eventualmente non sismici) caratterizzati da rapporto segnale/rumore non particolarmente elevato. Questa scelta, operata allo scopo di sfruttare al massimo le capacità di detezione della rete, ha condotto a definire i seguenti parametri: LTA = 30 s; STA = 1 s; soglia trigger (STA/LTA) = 3; finestra di ricerca dei trigger in coincidenza = 3 s; numero minimo di stazioni per l'identificazione di un evento = 3. L'applicazione dell'algoritmo STA/LTA è stata effettuata su segnali filtrati passa-banda nell'intervallo 2-25 Hz considerando esclusivamente le stazioni dotate di sensore velocimetrico. In questa fase di sperimentazione degli ILG si è deciso infatti di non utilizzare gli accelerometri eventualmente installati nelle stazioni che vanno a completare la RMMS a causa del rapporto segnale/rumore non particolarmente elevato che caratterizza tali sensori.

L'applicazione ai dati del periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 della fase 1) della procedura di cui sopra, ha consentito l'individuazione di 589 eventi. L'applicazione della fase 2) ha quindi permesso di identificare come eventi sismici 53 di essi, mentre i rimanenti sono stati catalogati come segnali transienti causati da disturbi di natura antropica o rumore ambientale. Dei 53 eventi sismici riconosciuti, 40 sono presenti nel catalogo degli eventi registrati dalla RSN (INGV-CNT, 2018b).

Al fine di caratterizzare la sismicità registrata il catalogo degli eventi sismici riconosciuti è stato integrato con le informazioni desunte dal catalogo della RSN e completato con il risultato delle elaborazioni effettuate soprattutto sugli eventi non presenti nel catalogo nazionale. E' stato utilizzato lo schema riportato in Tab.2 operando una prima suddivisione fra eventi contenuti nel catalogo della RSN (A) ed eventi non contenuti nel medesimo catalogo (B). I primi sono stati successivamente suddivisi nelle tipologie A0, A1, A2 e A3 a seconda del valore della distanza ipocentrale, R , considerando le distanze di riferimento $R_1 = 20$ km e $R_2 = 50$ km. Il valore di R_1 approssima per eccesso la massima dimensione lineare del volume DE. Le tipologie A1 e A2, caratterizzate entrambe dalla condizione ($20 \leq R < 50$) km vengono distinte in base alla stazione del primo arrivo P, la quale può appartenere o meno alla rete microsismica (RMMS). Gli eventi non contenuti nel catalogo della RSN vengono invece suddivisi nelle tipologie B0, B1 e B2 a seconda che il primo arrivo P venga osservato ad una stazione che appartiene o meno alla RMMS e a seconda del numero di coppie di fasi dirette P ed S chiaramente osservabili. Nel caso in cui la prima stazione appartenga alla RMMS, con meno di 4 coppie di fasi osservate l'evento viene ritenuto non localizzabile a causa del non sufficientemente elevato rapporto segnale/rumore. In questo caso viene classificato come B0 mentre in caso contrario viene classificato come B1. La tipologia B2 si riferisce invece a eventi non catalogati dal bollettino nazionale ma con il primo arrivo P osservato ad una stazione non appartenente alla RMMS. Gli eventi appartenenti alle tipologie A0, A1 e B1 vengono quindi rilocalizzati

(A0, A1) o localizzati (B1) mediante SacPicker (Spallarossa et al., 2011) che fornisce anche una stima della magnitudo locale (cfr. Tab.2 - colonna 4). Il risultato finale della procedura consiste quindi nella suddivisione di tutti gli eventi sismici in 4 diverse classi (Tab.2 - colonna 5) definite sulla base dell'appartenenza ai domini di rilevazione: classe 0 per eventi non localizzabili; classe 1 per eventi inclusi in DI; classe 2 per eventi compresi fra DI e DE; classe 3 per eventi esterni a DE. Le possibili occorrenze prodotte dall'applicazione della procedura sopra descritta sono riportate in Tab.3, nella quale i parametri di localizzazione e magnitudo (colonne 2 - 6) vengono stimati riportando i dati contenuti nel catalogo della RSN (A2, A3) o rilocalizzando gli eventi mediante SacPicker (A0, A1, B1).

	Appartenenza al catalogo della RSN	Tipologia evento	Rilocalizzazione	Classe evento
ID	SI (A)	A0: $R < 20$ km	SI	1; 2; (3)
		A1: ($20 \leq R < 50$) km ; primo arrivo P: Mlxx	SI	1; 2; 3
		A2: ($20 \leq R < 50$) km ; primo arrivo P: XXXX \neq Mlxx	NO	3
		A3: $R \geq 50$ km	NO	3
	NO (B)	B0: primo arrivo P: Mlxx; $N < 4$	NO	0
		B1: primo arrivo P: Mlxx; $N \geq 4$	SI	1; 2; 3
B2: primo arrivo P: XXXX \neq Mlxx		NO	3	

Tabella 2. Schema di classificazione degli eventi sismici registrati dalla RSIMS (vedi testo). Stazioni della RMMS: Mlxx; stazioni non appartenenti alla RMMS: XXXX. N indica il numero minimo di coppie di primi arrivi P ed S osservate.

ID_Detector	To	Lat	Lon	h (km)	Mag	T-Mag	D (km)	R (km)	Num. coppie di fasi S; P	Nome prima stazione	S-P prima stazione (s)	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia evento	Classe evento
							da Minerbio	da Minerbio	RSIMS	RSIMS	RSIMS	RSIMS		
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	$R < 20$	$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	A0	1
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	$R < 20$	$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	A0	2
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	$20 \leq R < 50$	$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	A1	1
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	$20 \leq R < 50$	$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	A1	2
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	$20 \leq R < 50$	$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	A1	3
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	$20 \leq R < 50$		XXXX \neq Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	A2	3
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	$R \geq 50$					A3	3
YYYYMMDDhhmmxx									$N < 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	B0	0
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	1
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	2
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			$N \geq 4$	Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	3
YYYYMMDDhhmmxx										XXXX \neq Mlxx	x.xx	XXXX; XXXX	B2	3

Tabella 3. Elenco delle possibili occorrenze derivanti dall'applicazione dei criteri di classificazione illustrati in Tab.2. ID_Detector: codice identificativo del trigger; To: tempo origine; Lat, Lon, h: latitudine, longitudine e profondità dell'evento; Mag, T-Mag: valore e tipo di magnitudo; D, R: distanze epicentrale e ipocentrale da Minerbio (punto C di Fig.2); N: numero di coppie di fasi dirette P ed S, osservate alle stazioni della RSIMS; XXXX (Mlxx): nomi delle stazioni della rete RSIMS (RMMS). I parametri di localizzazione e magnitudo (colonne 2-6) vengono stimati riportando i dati contenuti nel catalogo della RSN (campi indicati in colore) o rilocalizzando gli eventi mediante SacPicker (campi indicati in nero).

Gli eventi sismici registrati dalla RSIMS nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 sono riportati in Tab.4. Si tratta di 53 terremoti localizzati all'esterno del dominio esteso di rilevazione. 40 di essi sono presenti nel catalogo della RSN e sono caratterizzati da distanze ipocentrali maggiori di 35 km e profondità approssimativamente maggiori di 5 km. Come di vede dalla Tab. 4, 5 degli eventi non contenuti nel catalogo nazionale sono stati classificati come eventi esterni al dominio esteso (classe evento: 3). In base ai criteri di classificazione introdotti si tratta infatti di eventi sismici con primi arrivi P osservati a stazioni che non appartengono alla RMMS, anche se alcuni di essi vengono osservati da qualche stazione della rete stessa (tipologia evento: B2). 6 eventi non contenuti nel catalogo nazionale, caratterizzati da primi arrivi P osservati a stazioni della RMMS e da $N \geq 4$ coppie di arrivi (P; S), sono stati rilocalizzati (tipologia evento: B1). 4 di essi sono eventi superficiali (profondità massima pari a 7.3 km) di magnitudo compresa fra 0.6 e 2.0, localizzati nel Ferrarese (cfr. Fig. 14). I 2 restanti, caratterizzati da magnitudo 1.5 e 1.8, sono invece localizzati nella zona appenninica a profondità maggiori di 30 km. Tutti gli eventi di tipo B1 sono stati quindi catalogati come terremoti di classe 3. Si noti che nel catalogo sono inoltre presenti 2 eventi sismici di bassa energia che non è stato possibile localizzare a causa del non sufficiente numero di arrivi (P; S).

ID_Detector	To	Lat	Lon	h (km)	Mag	T-Mag	D (km)	R (km)	Num. coppie di fasi S; P	Nome prima stazione	S-P prima stazione (s)	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia evento	Classe evento
20190101183836	2019-01-01 18:37:46.960000	41.8777	13.5488	16.5	4.2	ML	349	349					A3	3
20190101212910	2019-01-01 21:28:35.320000	43.8732	12.0298	6.8	1.9	ML	94	94					A3	3
20190102070116									3	MI10	2.2	MI02; MI08	B0	0
20190104192938	2019-01-04 19:23:39.300000	42.2000	19.8200	10	4.7	ML	725	725					A3	3
20190106234904	2019-01-06 23:48:37.730000	44.1255	13.1588	26.3	2.3	ML	144	146					A3	3
20190107185723	2019-01-07 18:57:07.660000	44.2637	11.0302	16.6	1.9	ML	54	57					A3	3
20190108010820	2019-01-08 01:08:18.250000	44.8242	11.4438	0.5	0.6	ML	23	23	5	MI10	2.3	MI05; MI01	B1	3
20190111014813	2019-01-11 01:48:10.640000	44.7517	11.7137	4.6	0.9	ML	23	23	5	MI10	2.3	MI02; MI01	B1	3
20190114230405	2019-01-14 23:03:57.020000	44.3467	12.2857	20.6	4.6	ML	70	73					A3	3
20190114231810	2019-01-14 23:17:48.020000	44.3580	12.2377	24.5	1.9	ML	66	71					A3	3
20190114232918	2019-01-14 23:29:07.990000	44.3322	12.2932	22.0	3.0	ML	72	75					A3	3
20190115004554	2019-01-15 00:45:40.000000	44.4750	12.2875	11.4	2.2	ML	65	66					A3	3
20190115013019									3	BRIS	4.6	MI10; MI08	B2	3
20190115034433	2019-01-15 03:44:13.900000	44.3718	12.1487	20.5	2.0	ML	59	63					A3	3
20190115035753	2019-01-15 03:57:28.720000	44.4052	12.0988	22.9	2.0	ML	54	59					A3	3
20190117071621	2019-01-17 07:15:56.840000	44.4042	12.1393	21.0	2.2	ML	57	61					A3	3
20190119024205									7	A308A	6.6	BRIS; MI08	B2	3
20190119123718	2019-01-19 12:36:49.520000	44.1292	12.2463	6.6	1.5	ML	82	82					A3	3
20190120211815	2019-01-20 21:17:50.530000	44.4293	12.2318	9.5	1.7	ML	63	64					A3	3
20190120232429	2019-01-20 23:24:17.160000	44.4228	12.1927	17.9	1.9	ML	60	63					A3	3
20190121184031	2019-01-21 18:40:26.980000	44.8370	11.4625	7.3	1.5	ML	24	25	9	MI10	2.5	A307A; MI05	B1	3
20190122203053	2019-01-22 20:30:35.810000	44.1652	10.6243	7.9	2.4	ML	86	86					A3	3
20190123201741	2019-01-23 20:17:31.070000	44.3295	11.3765	32.5	1.8	ML	34	47	4	MI08	4.9	MI03; MI02	B1	3
20190125210209	2019-01-25 21:02:03.700000	44.3350	11.8887	22.3	2.8	ML	45	50	16	IMOL	5.7	BRIS; A308A	A3	3
20190126091810									1	MI10	5.6		B0	0
20190126151918	2019-01-26 15:19:11.850000	44.6672	11.9198	9.4	2.4	ML	35	36	13	A308A	3.3	CMPO; MI10	A2	3
20190201221820	2019-02-01 22:18:09.070000	43.9970	11.6558	6.3	3.3	ML	71	71					A3	3
20190202164043									2	MTRZ	4.6	MI08	B2	3
20190204222519									4	A308A	5.7	BRIS; MI08	B2	3
20190205021935	2019-02-05 02:19:32.630000	44.4952	10.0953	21.9	2.8	ML	112	114					A3	3
20190205114818	2019-02-05 11:47:51.690000	44.4375	12.1860	31.0	2.2	ML	59	67					A3	3
20190206233341	2019-02-06 23:33:23.540000	44.0060	11.6678	6.3	2.1	ML	70	70					A3	3
20190208040649	2019-02-08 04:06:43.340000	44.2783	11.8767	24.6	2.2	ML	49	55					A3	3
20190215043932	2019-02-15 04:39:18.450000	44.3062	10.6810	6.8	2.2	ML	73	74					A3	3
20190217145416	2019-02-17 14:35:55.000000	-3.3500	152.2300	359	6.2	Mwp	14045	14049					A3	3
20190218182351	2019-02-18 18:23:40.890000	44.7437	10.6502	28.0	2.4	ML	69	73					A3	3
20190301030640	2019-03-01 03:06:26.410000	44.2262	11.2008	19.3	1.4	ML	50	53					A3	3
20190303034943	2019-03-03 03:49:33.130000	44.4607	11.3243	43.3	1.5	ML	22	49	7	MI06	5.4	MI01; MI03	B1	3
20190307020720	2019-03-07 02:06:59.770000	43.8088	11.9600	9.7	2.3	ML	98	99					A3	3
20190307024319	2019-03-07 02:43:07.980000	44.1708	11.2378	10.8	1.6	ML	54	55					A3	3
20190308165504	2019-03-08 16:55:01.910000	44.8417	11.3947	4.1	2.0	ML	25	25	9	A307A	2.8	MI05; MI10	B1	3
20190313142225	2019-03-13 14:22:18.680000	44.9075	11.2398	9.4	2.5	ML	37	38	9	RAVA	5.1	SERM; CAVE	A2	3
20190316061027	2019-03-16 06:10:23.580000	44.3745	11.6153	34.6	3.0	ML	29	45	16	IMOL	6.2	BRIS; MTRZ	A2	3
20190321214307	2019-03-21 21:42:47.170000	44.4857	9.8368	7.7	3.0	ML	132	132					A3	3
20190322215920	2019-03-22 21:59:00.120000	44.1115	12.0503	7.5	2.2	ML	72	72					A3	3
20190322220838	2019-03-22 22:08:12.750000	44.1110	12.0475	7.2	2.0	ML	72	72					A3	3
2019032222205	2019-03-22 22:21:38.240000	44.1293	12.0358	8.5	1.7	ML	70	71					A3	3
20190322222415	2019-03-22 22:23:57.490000	44.1253	12.0253	9.4	2.1	ML	70	71					A3	3
20190322222635									7	FAEN	4.8	BRIS; IMOL	B2	3
20190322222646	2019-03-22 22:27:11.640000	44.1111	12.0455	5.8	1.8	ML	72	72					A3	3
20190322222856	2019-03-22 22:28:38.020000	44.1023	12.0492	4.9	2.3	ML	73	73					A3	3
20190322223108	2019-03-22 22:30:55.820000	44.1152	12.0393	8.2	2.6	ML	71	72					A3	3
20190323120405	2019-03-23 12:03:37.320000	44.0953	11.0207	9.9	1.8	ML	70	70					A3	3

Tabella 4. Eventi sismici registrati dalla RSIMS nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 (cfr. didascalia di Tab.3 per la descrizione dei campi).

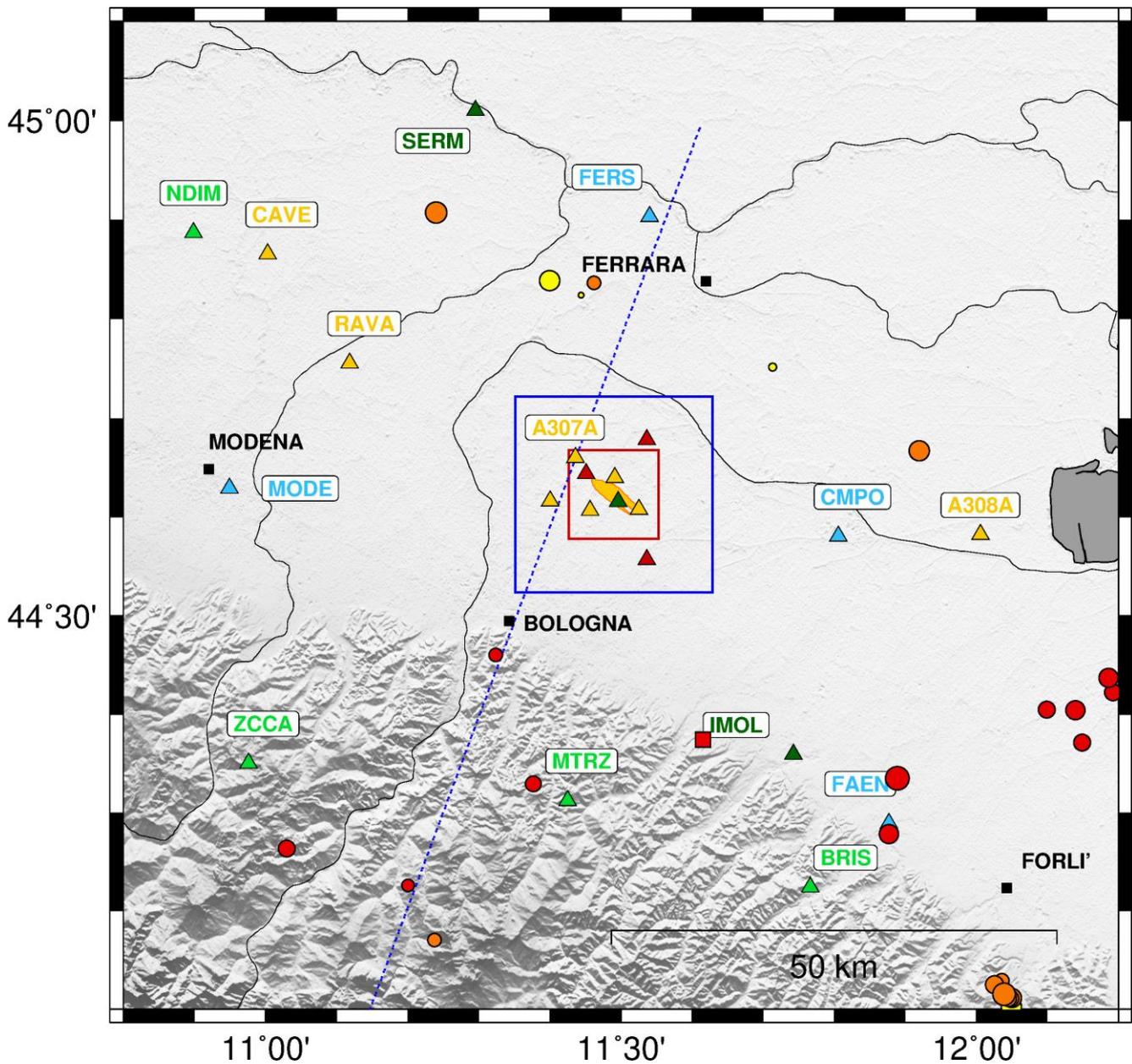


Figura 14. Eventi sismici localizzati registrati dalla RSIMS nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019. Vengono mostrati gli eventi con distanza epicentrale da Minerbio minore di 50 km. Cerchi rossi pieni: eventi con profondità maggiore di 11 km; cerchi arancione: eventi con profondità compresa fra 5 e 11 km; cerchi gialli: eventi con profondità inferiore a 5 km. I triangoli mostrano la posizione delle stazioni della RSIMS (cfr. didascalia di Fig. 5 per la descrizione della tipologia di sensore installato). La sigla delle stazioni viene indicata solo per le installazioni esterne a DE. In figura vengono mostrate anche la proiezione in superficie del contorno dei volumi DI e DE (in rosso e in blu rispettivamente); la proiezione in superficie del GWC (area in giallo) e la traccia C-C' di Boccaletti et al. (2004) (linea blu tratteggiata).

2.4. Conclusioni

Le attività condotte da INGV-MI durante il primo trimestre del 2019, nell'ambito del Protocollo Operativo per la sperimentazione degli ILG per il monitoraggio della concessione *Minerbio Stoccaggio*, siglato da MiSE, RER e Stogit S.p.A nel Maggio 2016, hanno evidenziato i seguenti punti:

- 1) La verifica dei livelli di rumore sismico ambientale registrato dalle stazioni della rete nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019, effettuata mediante il software PQLX (USGS, 2018), conferma l'elevata rumorosità dell'area di monitoraggio. Fra le stazioni installate in superficie, MI01 e MI02 mostrano valori di PSD paragonabili a quelli della curva di riferimento NHHM di Peterson (1993) mentre MI03 e MI06 si rivelano più rumorose, con livelli di PSD superiori di circa 10-15 dB. La MI04, nonostante sia installata in pozzetto a 100 m di profondità, risulta comunque caratterizzata da livelli di rumore paragonabili a quelli della curva NHHM nella banda di frequenze 1-20 Hz. Nella medesima banda di frequenze la variazione giorno/notte si attesta mediamente attorno a circa 20 dB. Per questa stazione, in data 07/02/2019, il Concessionario ha provveduto alla sostituzione del sensore installato in pozzetto che, a partire dal giorno 17/09/2018 manifestava problemi di malfunzionamento sulla componente verticale. Le stazioni dotate di sensori installati in pozzetto a 150 m di profondità, mostrano invece livelli di rumore più contenuti. Per frequenze > 1 Hz, i livelli misurati durante il giorno si attestano mediamente attorno a -120 dB per MI08 e MI10 e a -150 dB per MI05, con variazioni giorno/notte pari a circa 10 dB.
- 2) L'analisi della sismicità registrata nel periodo 1/1/2019 – 31/3/2019 è stata condotta con particolare riferimento ai volumi crostali individuati dal Dominio Interno e dal Dominio Esteso di rilevazione. Mediante un sistema di trigger off-line basato su un algoritmo di tipo STA/LTA sono stati individuati 589 eventi. 53 di essi sono risultati essere effettivamente eventi sismici mentre i rimanenti sono stati catalogati come segnali transienti causati da disturbi di natura antropica o rumore ambientale. Gli eventi sismici riconosciuti sono stati classificati operando una prima suddivisione fra terremoti inclusi nel catalogo della RSN (40 eventi) e terremoti non inclusi nel medesimo (cfr.Tab.4). I primi sono stati poi riesaminati suddividendoli ulteriormente in base alla distanza ipocentrale da Minerbio, R, ed eventualmente considerando le stazioni della RSISM che hanno registrato i primi arrivi della fase P. I secondi sono stati suddivisi considerando le stazioni che hanno registrato i primi arrivi P e il numero di coppie di fasi P ed S osservate. L'applicazione dello schema di classificazione così definito (cfr. Tab.3) ha permesso di procedere alla eventuale rilocalizzazione degli eventi sismici riconosciuti e conseguentemente alla loro eventuale collocazione nei domini di rilevamento. In definitiva, i 53 eventi registrati nel primo trimestre 2019 sono stati così suddivisi:
 - 37 eventi inclusi nel catalogo della RSN caratterizzati da $R \geq 50$ km e quindi esterni a DE (tipologia evento: A3), caratterizzati da profondità variabili fra 5 e 30 km circa;
 - 3 eventi inclusi nel catalogo della RSN con ($20 \leq R < 50$) km e con primo arrivo della fase P osservato ad una stazione non appartenente alla rete microsismica e perciò classificati come eventi esterni a DE (tipologia evento: A2). 2 di essi sono risultati essere eventi superficiali (profondità pari a 9.4 km) di magnitudo 2.4 e 2.5, localizzati lungo le pieghe Ferraresi, a 36 e 38 km di distanza ipocentrale da Minerbio. Il restante evento sismico, di magnitudo 3.0, è localizzato invece nella zona appenninica ad una profondità di 34.5 km.
 - 5 eventi non inclusi nel catalogo della RSN e con primo arrivo della fase P osservato ad una stazione non appartenente alla rete microsismica e perciò classificati come eventi esterni a DE (tipologia evento: B2).
 - 6 eventi non inclusi nel catalogo della RSN e con primo arrivo della fase P osservato ad una stazione della RMMS, che sono stati localizzati (tipologia evento: B1). 4 di essi sono risultati essere eventi superficiali (profondità massima pari a 7.3 km) di magnitudo compresa fra 0.6 e 2.0, localizzati nel

Ferrarese. I 2 restanti sono stati invece localizzati a profondità maggiore di 30 km in zona appenninica. In entrambi i casi si tratta dunque di eventi esterni a DE (cfr. Tab. 4 e Fig. 14).

- 2 eventi di bassa energia non inclusi nel catalogo della RSN e con primo arrivo della fase P osservato ad una stazione della RMMS, che non è stato possibile localizzare a causa del non sufficiente numero di arrivi (P; S) (tipologia evento: B0; classe evento: 0).

3. Monitoraggio delle deformazioni del suolo da stazioni GPS in continuo

3.1. Aggiornamento della soluzione geodetica

In questa sezione vengono descritti i risultati ottenuti dall'aggiornamento dell'analisi dei dati registrati dalla stazione GPS MINE della Stogit, installata nel sito di stoccaggio di Minerbio (BO). I dati sono stati processati utilizzando software scientifico che garantisce le più elevate precisioni e la serie temporale di spostamento, definita in un sistema di riferimento globale internazionale, è stata analizzata al fine di stimare diversi parametri. I dati GPS della stazione MINE (Fig. 15), assieme a quelli delle altre stazioni attive sul territorio nazionale (Fig. 16) sono stati elaborati fino al 30 marzo 2019 (day-of-year, doy, 089/2019), utilizzando le procedure descritte nell'allegato B della Relazione Trimestrale N.1 – Anno di esercizio 2018 (INGV, 2018d).



Figura 15. Posizione della stazione GPS di Minerbio (cerchio blu) rispetto al perimetro del giacimento (linea rossa) e dei pozzi (cerchi bianchi).

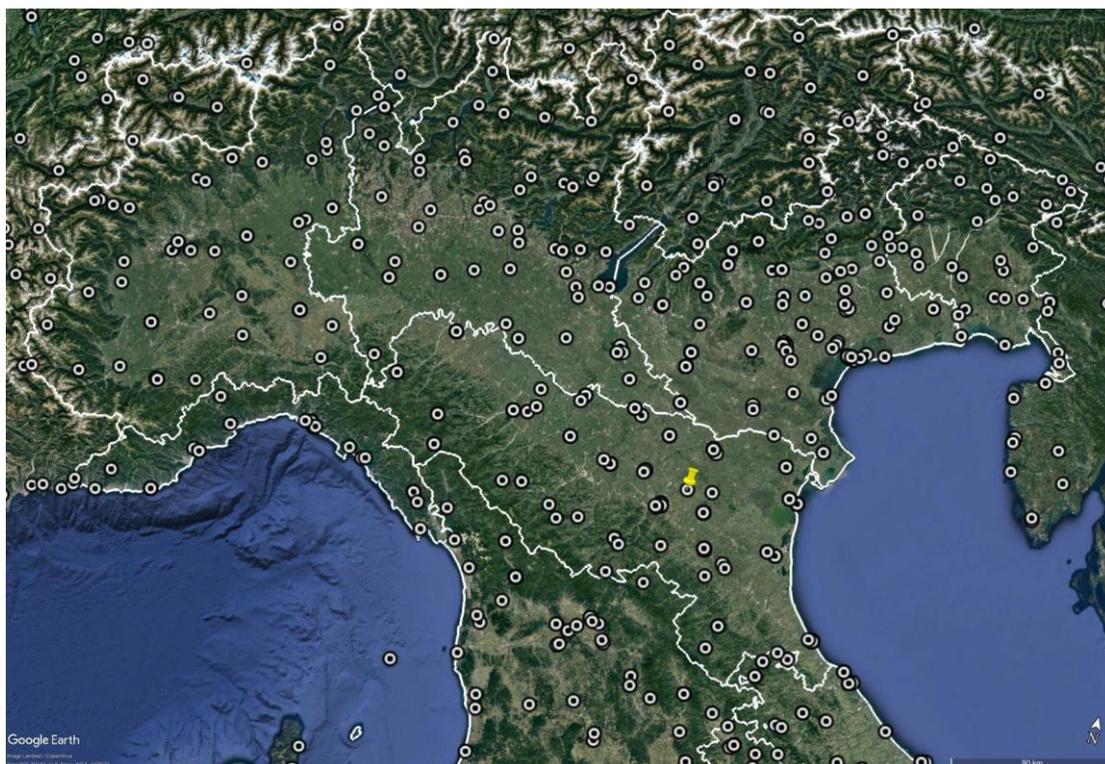


Figura 16. Posizione della stazione di Minerbio (in giallo) rispetto ad altre stazioni GNSS attive in Italia settentrionale ed afferenti a diverse reti (si veda Devoti et al., 2017).

3.1.1. Analisi della qualità del dato

I dati RINEX giornalieri della stazione MINE sono stati analizzati con il software TEQC (<http://facility.unavco.org/software/teqc>), che rappresenta uno standard internazionale per il trattamento in fase di pre-processamento di dati GPS e per la valutazione della loro qualità. A questo scopo, gli indici principalmente utilizzati sono i seguenti (in parentesi sono indicati i valori riscontrati su stazioni di buona qualità):

MP1: root mean square (RMS) dato dai multipath sulla fase L1, ossia dovuto a riflessioni del segnale radio inviato dai satelliti che influiscono sul corretto calcolo della distanza satellite-ricevitore (0.1-0.5 m);

MP2: RMS dato dai multipath sulla fase L2 (0.1-0.5 m);

Prendendo come riferimento la rete IGS dell'International GNSS Service (<http://igsb.jpl.nasa.gov>), il 50% delle stazioni IGS ha valori di RMS per MP1 inferiori a 0.4 m e valori di MP2 inferiori a 0.6 m, mentre 2/3 delle stazioni ha valori di MP1 inferiori a 0.5 m e di MP2 inferiori a 0.75 m. In Fig. 17 è mostrato l'andamento nel tempo dei valori di MP1 e MP2 della stazione MINE nell'intervallo di tempo considerato in questa analisi: 1 gennaio 2008 - 30 marzo 2019. I valori di MP1 e MP2 anche per il periodo a cui si riferisce l'aggiornamento presentato in questa relazione (30/9/2018 al 30/3/2019) sono mediamente inferiori a 0.3, anche se si nota, a partire da metà 2016 un trend di aumento medio dei due valori.

In generale, quindi, i valori di MP1 e MP2 dei dati analizzati confermano le precedenti valutazioni di una stazione di buona qualità. Inoltre, la stazione MINE mostra anche nel periodo analizzato in questa relazione una ottima continuità del dato.

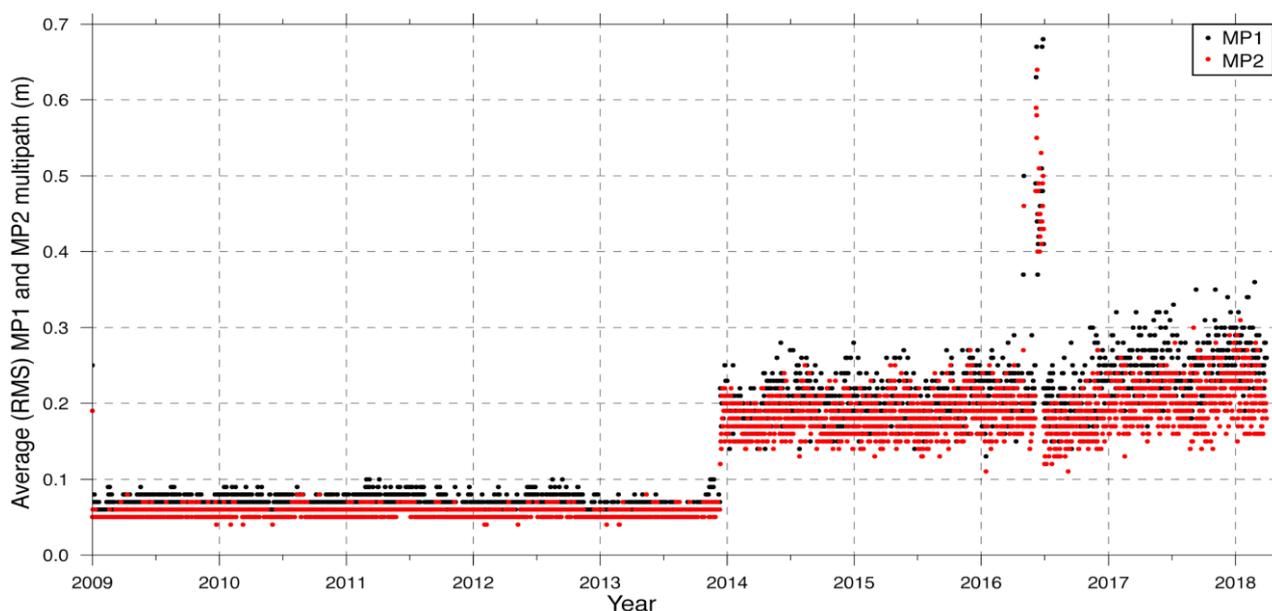


Figura 17. Andamento dei valori di MP1 (in nero) e MP2 (in rosso) ottenuti dall’analisi dei dati RINEX della stazione MINE con il software TEQC fino al 30/03/2019.

3.1.2. Elaborazione dei dati e serie temporale di spostamento

I dati giornalieri in formato RINEX sono stati analizzati seguendo le procedure descritte nelle precedenti relazioni. I dati sono stati elaborati con il software GAMIT/GLOBK (versione 10.70; <http://geoweb.mit.edu/gg/>). Rispetto alle precedenti elaborazioni, sono state fatte due modifiche. La prima riguarda il fatto che i dati del 2018 e 2019 sono stati ri-analizzati utilizzando il nuovo modello dei centri di fase delle antenne IGS14, in quanto il modello IGS08 non è più supportato dal software di elaborazione dati. La seconda riguarda il fatto che è stata aggiornata e modificata la lista di stazioni IGS08 di riferimento, utilizzate durante la fase di combinazione per definire il sistema di riferimento. Questo ha portato ad un piccolo miglioramento della ripetibilità nelle tre componenti (si vedano i valori riportati in Fig. 18 rispetto a quelli riportati nell’allegato B della Relazione Trimestrale N.1 – Anno di esercizio 2018 (INGV, 2018d) e nella Relazione Trimestrale N.3 – Anno di esercizio 2018 (INGV, 2018f)).

Come nelle precedenti analisi, i dati della stazione MINE sono stati processati all’interno di una sottorete che include le stazioni appartenenti alla rete FOGER della Regione Emilia-Romagna (<http://www.gpsemiliaromagna.it>), alcune stazioni afferenti alla rete Europea EUREF (<http://www.epncb.oma.be>) e alcune stazioni afferenti alla rete commerciale Leica-ITALPOS (<http://smarnet.leica-geosystems.it>). Le stazioni EUREF, in particolare, sono quelle poi usate per combinare le soluzioni di questa sotto-rete con quelle delle altre sotto-reti elaborate all’INGV con lo stesso software.

La serie temporale degli spostamenti è stata modellata usando un modello funzionale che descrive la variazione della posizione della stazione GPS nel tempo, $x(t)$, come:

$$f(t_i) = a_1 + a_2 t_i + a_3 \sin(2\pi t_i) + a_4 \cos(2\pi t_i) + a_5 \sin(4\pi t_i) + a_6 \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j H(t_i - T_b) + y_t \quad [1]$$

dove $a_1 + a_2 t_i$ rappresenta il trend, a_1 è il bias iniziale, a_2 indica la pendenza della serie, cioè la velocità di spostamento, $a_3 \sin(2\pi t_i) + a_4 \cos(2\pi t_i) + a_5 \sin(4\pi t_i) + a_6 \cos(4\pi t_i)$ è la componente stagionale (annuale e semi-annuale, con t_i espresso in anni), la sommatoria $b_j H(t_i - T_b)$ rappresenta invece la correzione per un

certo numero n_b di offset di ampiezza b_j descritti tramite una funzione gradino di Heaviside. Anche eventuali salti provocati da eventi co-sismici sono modellati con una funzione di questo tipo. Infine y_t rappresenta la componente casuale.

Gli offset co-sismici sono stati calcolati usando le posizioni calcolate pochi giorni prima e pochi giorni dopo i due mainshock del 20 e 29 maggio 2012. Il transiente di deformazione post-sismica è stato modellato assumendo un andamento nel tempo (t) di tipo esponenziale, descritto da:

$$A[1-\exp(-t/\text{Tau})] \quad [2]$$

Dove A rappresenta l'ampiezza e Tau è il tempo caratteristico del decadimento post-sismico. I valori utilizzati in questo aggiornamento sono gli stessi descritti nella Relazione Trimestrale N.3 – Anno di esercizio 2018 (INGV, 2018f).

La Fig. 18 mostra l'andamento della serie temporale di spostamento nel sistema di riferimento IGB08 (cerchi blu) aggiornata al 30 marzo 2019, dove in rosso è mostrato il modello, ottenuto adottando [1] e [2].

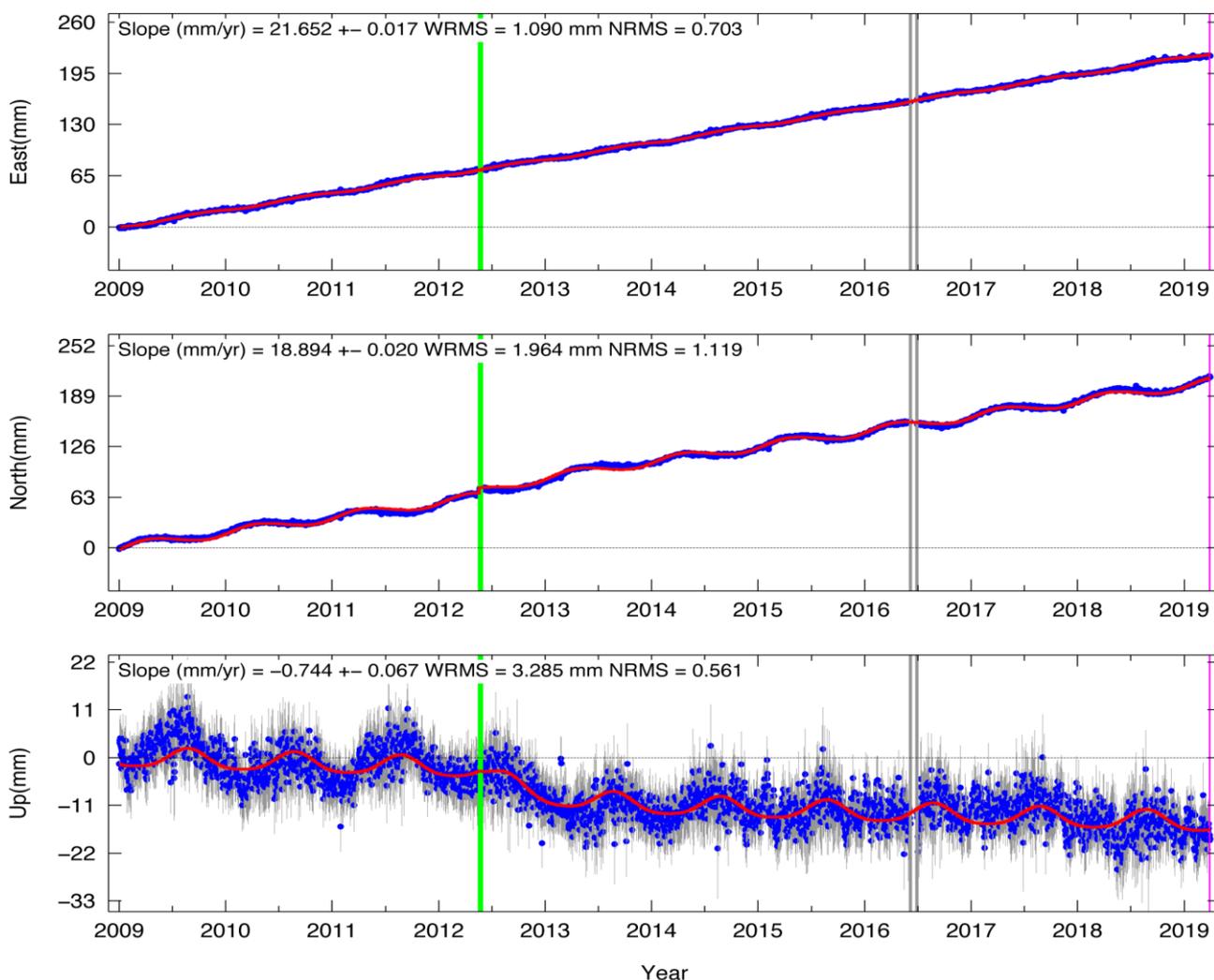


Figura 18. Serie temporale di spostamento della stazione MINE nel sistema di riferimento globale IGB08. Le barre grigie associate ai punti blu indicano le barre d'errore (1σ). Le linee verdi rappresentano i due mainshock della sequenza del 2012. Le linee grigie indicano il periodo in cui i valori di MP1 e MP2 sono più alti (Fig. 17) e i cui dati sono stati esclusi dall'analisi. La linea rosa indica il doy 089 del 2019.

La Fig. 19 mostra invece la serie temporale residua dopo aver rimosso il trend lineare, gli offset cosismici e il transiente post-sismico, mentre in Fig. 20 viene mostrata la serie temporale ottenuta dopo aver rimosso anche le componenti stagionali (cfr. Tabs. 5 e 6).

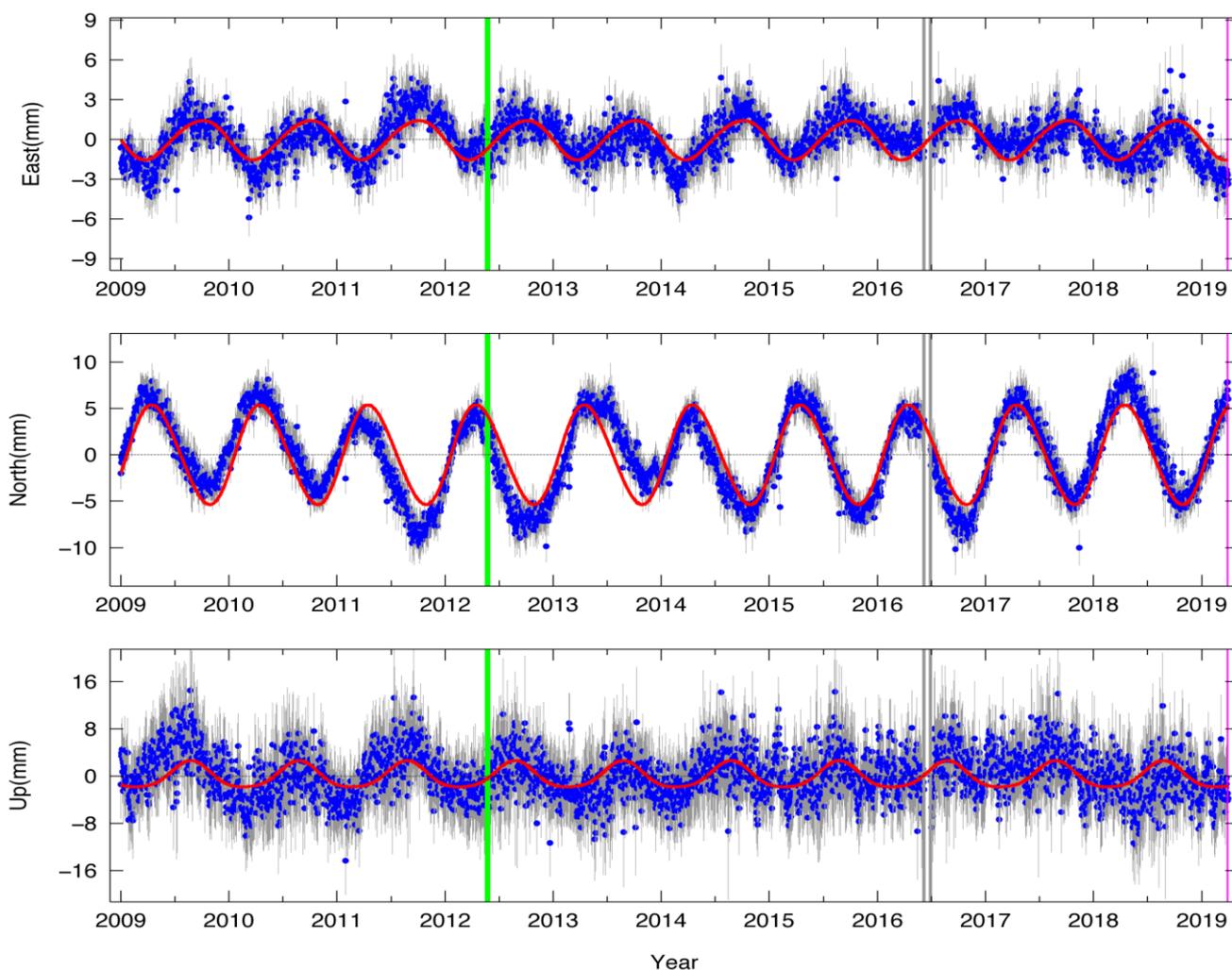


Figura 19. Serie temporale residua della stazione MINE dopo aver rimosso gli offset co-sismici e il trend lineare, come definito in [1], ed il segnale post-sismico come definito in [2]. Le barre grigie associate ai punti blu indicano le barre d'errore (1σ). La linea rossa rappresenta il modello per la componente stagionale, con periodo annuale e semi-annuale, come definito in [1].

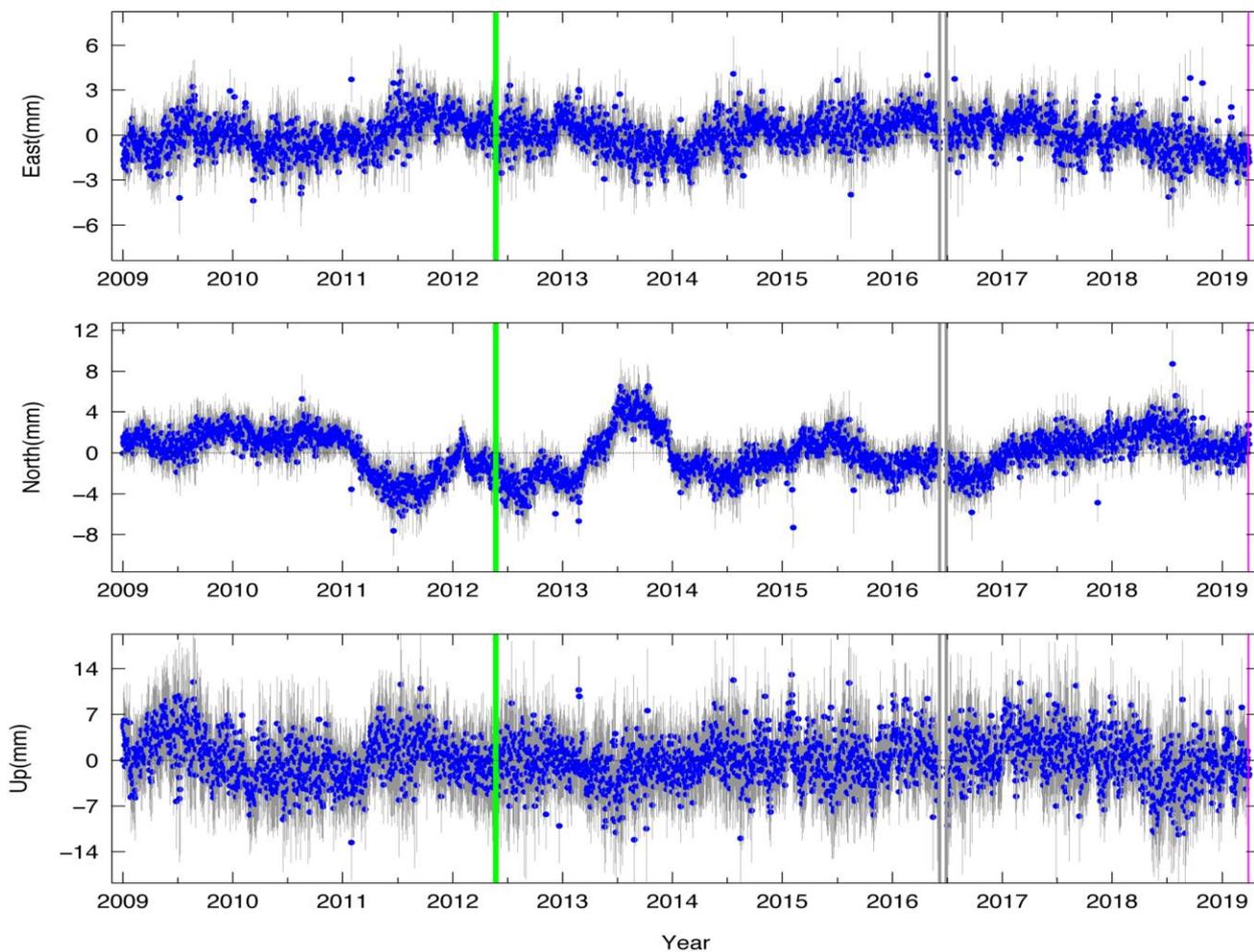


Figura 20. Serie temporale residua della stazione MINE dopo aver rimosso anche le componenti stagionali (annuale e semi-annuale), rispetto alla serie di Fig. 19.

E (mm)	N (mm)	S_E (mm)	S_N (mm)	V (mm)	S_V (mm)
1.476	5.332	0.037	0.042	2.222	0.142

Tabella 5. Ampiezza della componente annuale (in mm) per le componenti est (E), nord (N) e verticale (V), e rispettive incertezze (S_E, S_N e S_V).

E (mm)	N (mm)	S_E (mm)	S_N (mm)	V (mm)	S_V (mm)
0.121	0.329	0.037	0.042	0.397	0.140

Tabella 6. Ampiezza della componente semi-annuale (in mm) per le componenti est (E), nord (N) e verticale (V), e rispettive incertezze (S_E, S_N e S_V).

In Tab.7 sono indicate le velocità orizzontali e verticale, nel sistema di riferimento IGb08, ottenute utilizzando la serie temporale di spostamento fino al 30 marzo 2019. . Relativamente alle incertezze, queste sono state stimate assumendo un modello di tipo White+Flicker noise, come descritto in Serpelloni et al. (2013).

VE (mm/anno)	VN (mm/anno)	S_VE (mm/anno)	S_VN (mm/anno)	Vup (mm/anno)	S_Vup (mm/anno)
21.652	18.894	0.077	0.167	-0.744	0.215

Tabella 7. Velocità di spostamento, e relative incertezze, della stazione MINE (in mm/anno) nel sistema di riferimento IGb08. VE, VN e Vup indicano le velocità nelle componenti est, nord e verticale, rispettivamente, e S_VE, S_VN e S_Vup le relative incertezze.

3.2. Conclusioni

I dati della stazione GPS di Minerbio, gestita da Stogit ed installata al margine meridionale del perimetro del giacimento di Minerbio, sono stati elaborati fino al 30 marzo 2019. Il processamento dei dati RINEX è stato eseguito utilizzando i più elevati standard di analisi, come descritto nelle precedenti relazioni. Sono state apportate alcune modifiche minori allo schema di processamento che hanno portato un piccolo miglioramento nella ripetibilità.

La stazione MINE si conferma caratterizzata da un’ottima continuità del dato, oltre che da valori dei parametri MP1 e MP2, rappresentativi di disturbi da multipath, in linea con le migliori stazioni GPS permanenti analizzate all’INGV.

I valori dei tassi di spostamento nelle tre direzioni, E, N e Up, ottenuti dall’analisi delle serie temporali di spostamento aggiornati al 30 marzo 2019 rimangono del tutto consistenti con quelli stimati nelle relazioni precedenti, e piccole differenze possono essere dovute, oltre che all’aumento dei dati e dell’intervallo temporale, anche alle minime modifiche apportate allo schema di analisi.

La serie temporale di spostamento mostra un andamento stagionale con periodo annuale, la cui ampiezza massima è osservata nella componente nord (~5 mm). In particolare, è evidente come il segnale stagionale nelle componenti orizzontali sia in opposizione di fase, indicando uno spostamento in direzione NNW-SSE con periodo annuale, con intensità comparabile a quella misurata nella componente Nord, essendo quella predominante. Tuttavia, è evidente (Fig. 20) che se da un lato un semplice modello rappresentato da una sinusoide di periodo annuale sia sufficiente a descrivere in modo soddisfacente la stagionalità nelle componenti E e Up, sulla componente N ci sono variazioni di ampiezza che richiedono ulteriori analisi.

4. Monitoraggio delle pressioni di poro

In data 19 aprile 2019 il Concessionario ha regolarmente fornito, l’aggiornamento a marzo 2019 delle misure relative al monitoraggio delle pressioni di poro. In particolare sono state fornite le misure con sensori permanenti (DPTT) e con sensori temporanei (memory-gauges).

Sono inoltre stati resi disponibili i volumi dei gas movimentati, attualmente con valori giornalieri dei volumi iniettati/erogati (la serie storica risale al 1 febbraio 1959, con campionamento mensile; dal 1 novembre 2001 con valori cumulati giornalieri).

Bibliografia

- AlpArray (2016). The AlpArray initiative, <http://www.alparray.ethz.ch/home/>
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C., Vannucci G. (2004). Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna, 1:250.000 e note illustrative. SELCA Editore, Firenze.
- Cattaneo M., D'Alema E., Frapiccini M., Marzorati D., Monachesi G. (2011). Acquisizione presso la sede di Ancona, *Miscellanea INGV*, 10, 124-127, ISSN 2039-6651.
- Devoti, R., N. D'Agostino, E. Serpelloni et al. (2017), A Combined Velocity Field of the Mediterranean Region, *Annals of Geophys.*, 60(2), doi:10.4401/ag-7059.
- Earthworm Central (2016). Earthworm, <http://www.earthwormcentral.org/>
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2016). Il progetto AlpArray, <http://terremoti.ingv.it/it/struttura-di-ricerca/lda-t1-geodinamica-e-interno-della-terra/33-contenuti/983-il-progetto-alparray.html>
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2018a). Progetti e convenzioni – Progetto: Sperimentazione ILG Minerbio Stoccaggio – Codice progetto: 913; Codice CUP: D81I18000300004, <http://istituto.ingv.it/it/progetti-e-convenzioni>
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2018b). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). Struttura Preposta al Monitoraggio – Anno di esercizio 2018 – Relazione Trimestrale N.1, Giugno 2018, Milano, 14 pp.
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2018c). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). Struttura Preposta al Monitoraggio – Anno di esercizio 2018 – Relazione Trimestrale N.1 – Allegato A, Giugno 2018, Milano, 41 pp.
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2018d). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). Struttura Preposta al Monitoraggio – Anno di esercizio 2018 – Relazione Trimestrale N.1 – Allegato B, Giugno 2018, Milano, 15 pp.
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2018e). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). Struttura Preposta al Monitoraggio – Anno di esercizio 2018 – Relazione Trimestrale N.2, Settembre 2018, Milano, 23 pp.
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2018f). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). Struttura Preposta al Monitoraggio – Anno di esercizio 2018 – Relazione Trimestrale N.3, Dicembre 2018, Milano, 31 pp.
- INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2019). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). Struttura Preposta al Monitoraggio – Anno di esercizio 2018 – Relazione Trimestrale N.4, Febbraio 2019, Milano, 22 pp.
- INGV-CNT, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Centro Nazionale Terremoti (2018a). Italian Seismic Network, <http://cnt.rm.ingv.it/instruments/network/IV>
- INGV-CNT, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Centro Nazionale Terremoti (2018b). Lista Terremoti, <http://cnt.rm.ingv.it/>
- INGV-MI, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Milano (2017a). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). SPM - Monitoraggio Sismico – Anno di esercizio 2017 – Relazione N.01, Maggio 2017, Milano, 46 pp.

- INGV-MI, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Milano (2017b). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Sintesi rapporto Monitoraggio Sismico – Anno di esercizio 2017 – Relazione n.01 con integrazione relativa a monitoraggio deformazione del suolo e della pressione di poro, Luglio 2017, Milano, 4 pp.
- INGV-MI, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Milano (2018). Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio” (MiSE/RER/Stogit S.p.A.). Sintesi dell’attività svolta nel periodo Luglio-Dicembre 2017 nell’ambito del Protocollo Operativo, Gennaio 2018, Milano, 3 pp.
- IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology (2018a). SeedLink, <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink>
- IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology (2018b). Data Formats, <https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/data/formats/>
- McNamara D.E., Buland R.P. (2004). Ambient Noise Levels in the Continental United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 1517-1527.
- MiSE–DGS-UNMIG, Ministero dello Sviluppo Economico – Direzione Generale per la Sicurezza anche ambientale delle attività minerarie ed energetiche – Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (2014). Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell’ambito delle attività antropiche, http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf
- MiSE-DGS-UNMIG, Ministero dello Sviluppo Economico – Direzione Generale per la Sicurezza anche ambientale delle attività minerarie ed energetiche - Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (2017). Titoli Minerari Vigenti, concessione di stoccaggio “Minerbio Stoccaggio”, <http://unmig.mise.gov.it/unmig/titoli/dettaglio.asp?cod=2907>
- RER, Regione Emilia-Romagna (2016a). Deliberazione della Giunta Regionale - 11 Aprile 2016, N.488. Schema di Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio”, BURERT n.125 del 04.05.2016, <http://bur.regione.emilia-romagna.it/dettaglio-inserzione?i=c12c12b691bf4807864dde86e77f8664>
- RER, Regione Emilia-Romagna (2016b). Deliberazione della Giunta Regionale - 11 Aprile 2016, N.488. Schema di Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio”, BURERT n.125 del 04.05.2016 – ALLEGATO 1 ALLA DGR N.488, <http://bur.regione.emilia-romagna.it/bur/area-bollettini/bollettini-in-lavorazione/maggio-periodico-parte-seconda-1a-quindicina.2016-05-03.3588733174/schema-di-protocollo-operativo-attivit -di-sperimentazione-degli-indirizzi-e-linee-guida-per-il-monitoraggio-della-concessione-minerbio-stoccaggio/allegato-1-alla-dgr-n-488-del-.2016-05-03.1462281488>
- Peterson (1993). Observation and modelling of seismic background noise, *U.S.G.S. Tech. Rept.*, 93-322, 1-95.
- Serpelloni, E., C. Faccenna, G. Spada, D. Dong, and S. D. P. Williams (2013), Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary, *J. Geophys. Res.*, 118(11), 6003–6024, doi:10.1002/2013JB010102.
- Spallarossa D., Ferretti G., Scafidi D., Pasta M. (2011). Picking automatico nella rete sismica dell’Italia Nord-Occidentale (RSNI), *Miscellanea INGV*, 10, 141-146, ISSN 2039-6651.
- USGS - United States Geological Survey (2018). PQLX: A Software Tool to Evaluate Seismic Station Performance, <https://earthquake.usgs.gov/research/software/pqlx.php>