ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

MiSE/RER/Stogit S.p.A.: Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione "Minerbio Stoccaggio", Regione Emilia-Romagna, DGR 11 Aprile 2016, N. 488

Concessione di stoccaggio di gas naturale "Minerbio stoccaggio" (BO) SPM - Monitoraggio sismico - Anno di esercizio 2018 Relazione N. 02

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

UR Milano

Maggio 2018

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Sezione di Milano

Concessione di stoccaggio di gas naturale "Minerbio stoccaggio" (BO) SPM - Monitoraggio sismico - Anno di esercizio 2018 Relazione N. 02

Rapporto redatto da:

G. Franceschina, E. D'Alema, S. Carannante, P. Augliera

Il Direttore della Sezione INGV: P. Augliera

Rapporto Tecnico INGV-MI

Milano, Maggio 2018

INDICE

1. Introduzione 1
2. Inquadramento geologico strutturale e domini di rilevazione 2
3. Rete di monitoraggio sismico integrata (RSIMS) 6
4. Analisi di detezione 9
Metodo 9
Risultati 12
5. Analisi di rumore sismico ambientale 26
6. Sismicità registrata 33
7. Conclusioni 37
Bibliografia 39

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 km^2 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. Quest'ultima si avvale attualmente di 51 pozzi di iniezione/erogazione organizzati in clusters e di 6 pozzi-spia per il monitoraggio delle pressioni di giacimento. L'intervallo stratigrafico di interesse minerario, attualmente adibito all'attività di stoccaggio, è denominato *Pool C* ed è rappresentato da una serie di livelli sabbiosi di natura torbiditica appartenenti alla formazione Porto Garibaldi con spessore di circa 80 m, ai quali si interpongono livelli argillosi di limitato spessore. La traccia del contatto gas-acqua originario (localizzato a 1370 m di profondità) individua un'area di circa 8 km^2 la cui proiezione in superficie è situata per circa l'80% nel comune di Minerbio (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 viene avviato ufficialmente in data 11/7/2016 e, nel corso del primo anno di attività viene attuato realizzando: 1) la verifica delle reti di monitoraggio esistenti; 2) la programmazione del potenziamento progressivo delle reti di monitoraggio; 3) la predisposizione per la trasmissione diretta dei dati rilevati dalle reti di monitoraggio; 4) l'elaborazione ed interpretazione dei risultati dei monitoraggi fin qui condotti dal Concessionario. In particolare, l'attività di monitoraggio sismico è stato dettagliatamente 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) e nel documento di sintesi inviato da INGV a MiSE, RER e Concessionario in data 27/7/2017 (INGV-MI, 2017b).

Nel secondo semestre 2017, in attesa di una definizione delle modalità di erogazione del finanziamento alla SPM, INGV ha proseguito la sperimentazione mediante una serie di attività propedeutiche al completamento del sistema di monitoraggio e della procedura per la produzione del bollettino degli eventi sismici localizzati dalla rete. L'attività svolta ha riguardato in particolare i seguenti punti: 1) acquisizione dei dati registrati mediante l'integrazione delle stazioni della Rete Sismica Nazionale (RSN) e del progetto AlpArray (AlpArray, 2016), già collegate al nodo Seedlink realizzato presso INGV-MI, con le stazioni della Rete Microsismica "Minerbio Stoccaggio" (RMMS) gestita dal Concessionario; 2) popolamento dell'archivio delle forme d'onda registrate in continuo nel periodo 1/7/2017-31/12/2017 dalle 15 stazioni RSN e AlpArray che confluiscono nella rete sismica integrata (costituita da RSN; stazioni AlpArray e RMMS); 3) verifica dei livelli di rumore sismico ambientale registrato dalle stazioni della rete e analisi della sismicità registrata nel periodo 1/7/2017-31/12/2017 (INGV-MI, 2018a).

A partire da Marzo 2018, la definitiva messa a punto della procedura di acquisizione in tempo reale dei dati della RMMS presso la sede della SPM ha consentito di completare il popolamento dell'archivio di forme d'onda registrate in continuo, che attualmente risulta perciò costantemente aggiornato. Nella presente relazione, in accordo con quanto previsto in data 27/2/2018 nell'incontro tecnico fra un rappresentante del MiSE e i rappresentanti di RER, Stogit, INGV, Comune di Minerbio e Assomineraria (MiSE-DGS-UNMIG, 2018), vengono illustrati l'attività di monitoraggio sismico relativa al primo trimestre 2018 e le analisi di detezione della RMMS, realizzata dal Concessionario a partire dal secondo trimestre 2018 ad implementazione della precedente configurazione di rete.

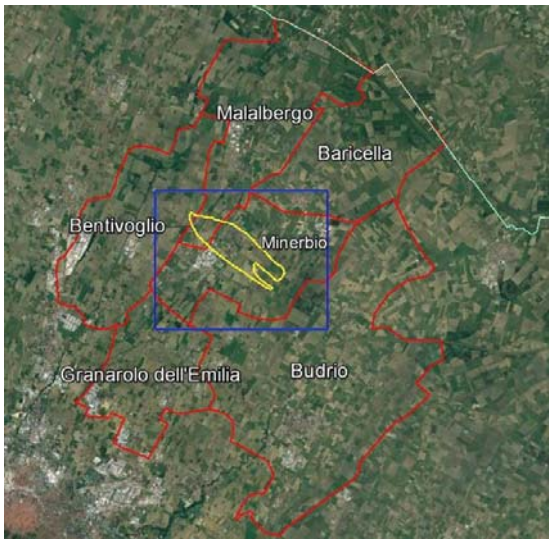

Figura 1. Concessione di stoccaggio di gas naturale "Minerbio Stoccaggio" (rettangolo blu) e proiezione in superficie del contatto gas-acqua (GWC) originario del *reservoir* (linea gialla). Il contatto GWC è localizzato a 1370 m di profondità e corrisponde ad un'area di circa 8 km^2. Vengono mostrati 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. Inquadramento geologico strutturale e domini di rilevazione

L'assetto geologico strutturale dell'area e la definizione dei domini di rilevazione introdotti dagli ILG sono stati illustrati dettagliatamente nella Relazione N.01 del Protocollo Operativo (INGV-MI, 2017a). Nel presente rapporto viene perciò presentata una sintesi delle considerazioni che hanno portato alla definizione di tali domini.

Il campo di Minerbio si colloca all'interno del sistema di pieghe romagnole dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, nella parte meridionale della Pianura Padana centro-orientale. Durante gran parte del Pliocene, questa regione ha subito una forte attività tettonica che ha portato alla deformazione, sollevamento, inclinazione e fagliazione dell'area che ospita il *reservoir*. Nello stesso periodo (Pliocene inferiore) la deposizione di sedimenti torbiditici ha portato alla genesi delle formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi su gran parte dell'avanfossa e successivamente, durante il Pliocene superiore - Pleistocene, un altro evento tettonico ha completato la strutturazione della catena a "pieghe e faglie" di Ferrara e ha portato al sollevamento e al *tilt* dell'attuale zona di Bologna (Ghielmi *et al.*, 2013). In Fig. 2 viene illustrata la sezione C-C' tratta dal lavoro di Boccaletti *et al.* (2004) che affianca il lato ovest della concessione in direzione NNE-SSO in corrispondenza del territorio comunale di Bentivoglio (cfr. Fig.4).

Il *reservoir* principale del campo di Minerbio è rappresentato dal *Pool* C, un corpo sedimentario composto da 4 corpi sabbiosi principali, indicati come livelli C1, C2, C3, C3-1 interposti ai quali vi sono 3 *layers* argillosi, correlabili su tutto il campo (cfr. Tab.1). La copertura del giacimento è garantita dalla *facies* argilloso-siltosa del membro superiore della formazione Argille del Santerno, che è presente sull'intera area del giacimento con uno spessore medio di circa 120 m e che costituisce una sigillatura continua. L'acquifero che delimita il *Pool* C agisce soprattutto da nord-est e da sud e l'originale contatto gas-acqua (GWC) è stato riconosciuto ad una profondità di 1370 m. Il *Pool C* è anche l'intervallo stratigrafico attualmente adibito all'attività di stoccaggio, realizzato interno di livelli sabbiosi di origine torbiditica che raggiungono uno spessore complessivo di circa 80 m (POLITO-DITAG, 2012). In Fig. 3 vengono mostrate la topografia del livello sommitale del *Pool C* (Formazione Porto Garibaldi – top strutturale) e una sezione in direzione est-ovest del giacimento (STOGIT, 2012).

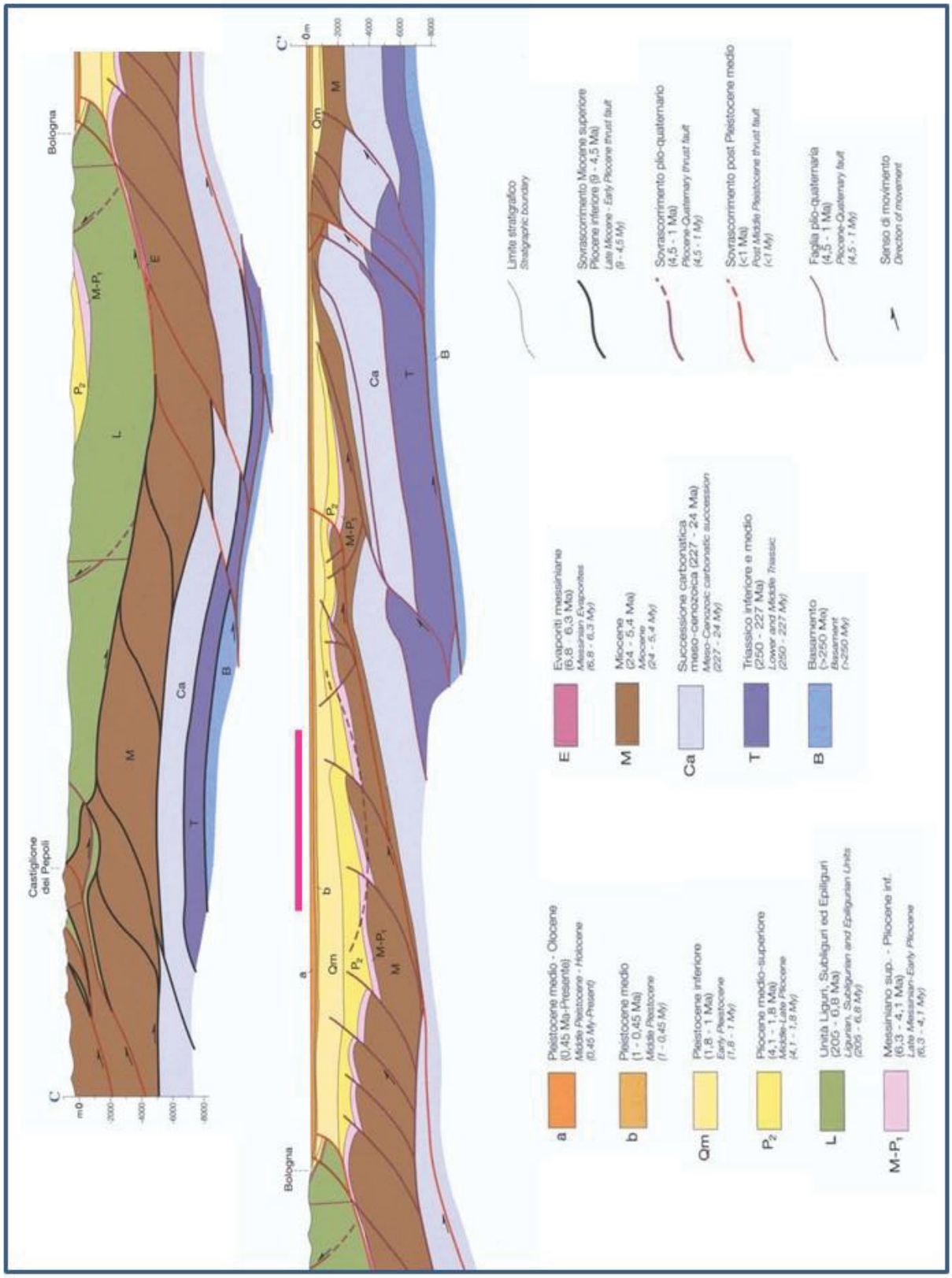

Figura 2. Linea C-C' del lavoro di Boccaletti *et al.* (2004), sulla quale è stata evidenziata la posizione della concessione "Minerbio Stoccaggio" (linea viola).

ETA'	FORMAZIONE	Spessori (m)	LIVELLO e mineralizzazione		POOL
Quaternario	Alluvioni recenti e attuali	200			
Pleistocene	Sabbie d'Asti	800			
Pliocene medio - superiore	Argille del Santerno (sup.)	200		gas	PLQ1,A1,A2,B
	Fm. Porto Garibaldi	300	C1	gas	POOL C
			C2		
			C3		
			C3-1		
			C3-2	acqua	
			C3-3	gas	POOL D, E
			C3-4		
			C3-5		
Pliocene inferiore	Argille del Santerno (inf.)	100		gas	POOL F
	Fm. Porto Corsini	>150	unconformity		
Messiniano	Fm. Fusignano				

Tabella 1. Schema stratigrafico e nomenclatura dei livelli principali del campo di Minerbio (modificata da POLITO-DITAG, 2011).

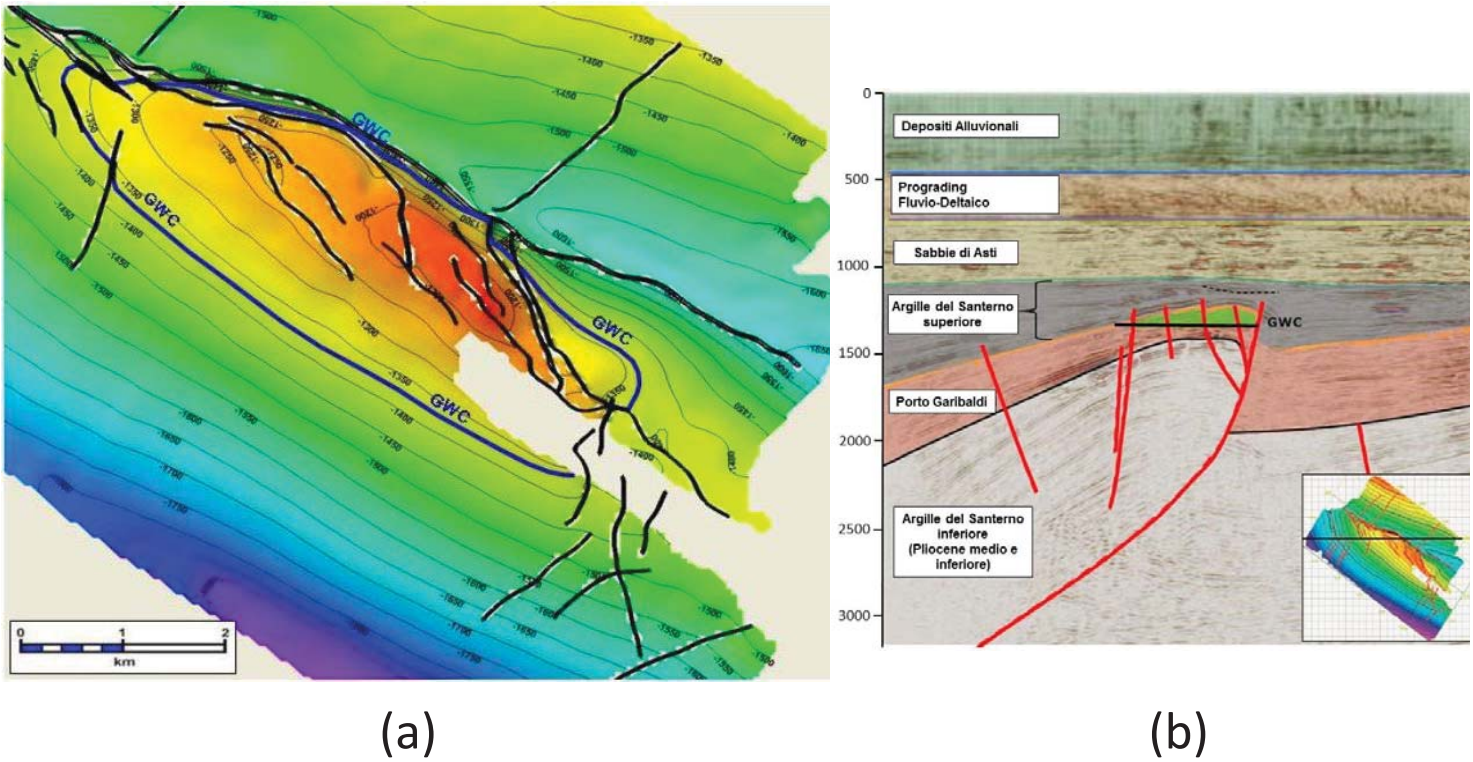

Figura 3. (a) mappa del top strutturale del giacimento di Minerbio; (b) sezione tettono-stratigrafica in direzione est-ovest della struttura che ospita il giacimento (modificate da POLITO-DITAG, 2012).

I domini di rilevazione interno ed esteso, DI e DE rispettivamente, sono stati definiti a partire dalla profondità e dall'estensione areale del GWC, le cui dimensioni lineari risultano essere di circa 2 e 6 km nelle direzioni NE-SO e NO-SE, rispettivamente. Considerata la proiezione in superficie del punto centrale, C, sono stati definiti come DI e DE rispettivamente, i volumi crostali di (10 x 10 x 5) km^3 e di (22 x 22 x 11) km^3, la cui proiezione in superficie risulta essere centrata attorno a C (INGV-MI, 2017a). Nelle Fig. 4 e 5 vengono mostrate la mappa delle proiezioni in superficie dei domini di rilevazione e le proiezioni di tali domini sulla sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004), rispettivamente.

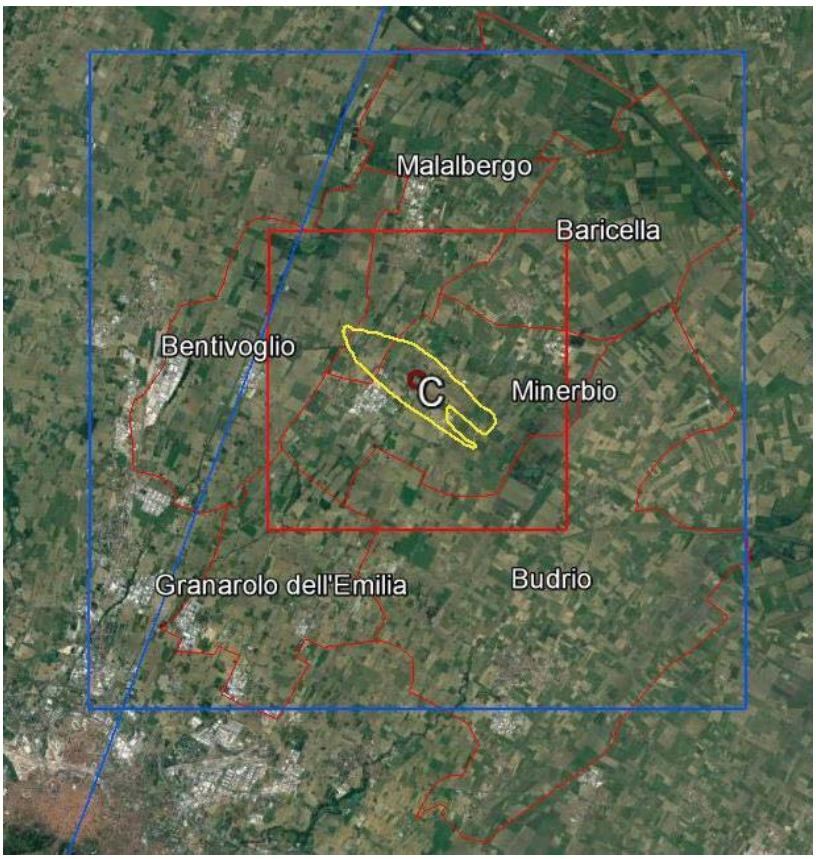

Figura 4. Proiezione in superficie dei domini di rilevazione interno (DI) ed esteso (DE) (box rosso e box blu, rispettivamente). DI e DE hanno dimensioni di (10 x 10 x 5) km^3 e (22 x 22 x 11) km^3 rispettivamente. Vengono mostrati la proiezione in superficie del contatto GWC, i confini dei comuni interessati 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).

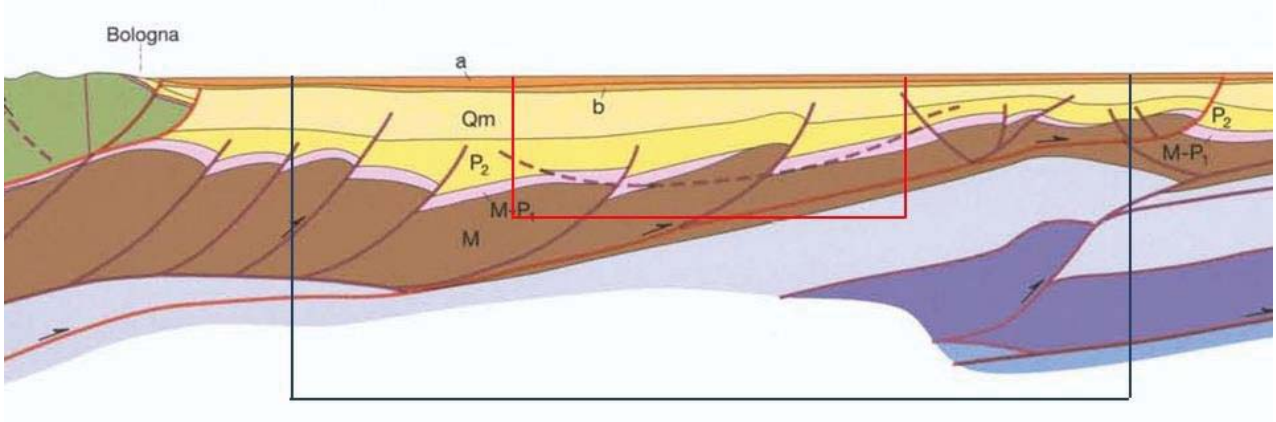

Figura 5. Proiezioni dei domini di rilevazione sulla sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004). Linea rossa: dominio interno; linea blu: dominio esteso. Le profondità dei domini DI e DE sono di 5 e 11 km, rispettivamente

3. Rete di monitoraggio sismico integrata (RSIMS)

La concessione "Minerbio Stoccaggio" è situata in un'area nella quale la Rete Sismica Nazionale (RSN) consente di ottenere una magnitudo minima di localizzazione pari a 2.0 e una probabilità inferiore al 50% di localizzare eventi di magnitudo locale pari a 1.5 (Schorlemmer *et al.,* 2010). Attualmente, in un'area di dimensioni (110x110) km^2, centrata attorno alla proiezione in superficie del giacimento, 13 siti sono monitorati con stazioni della RSN (Fig.6).

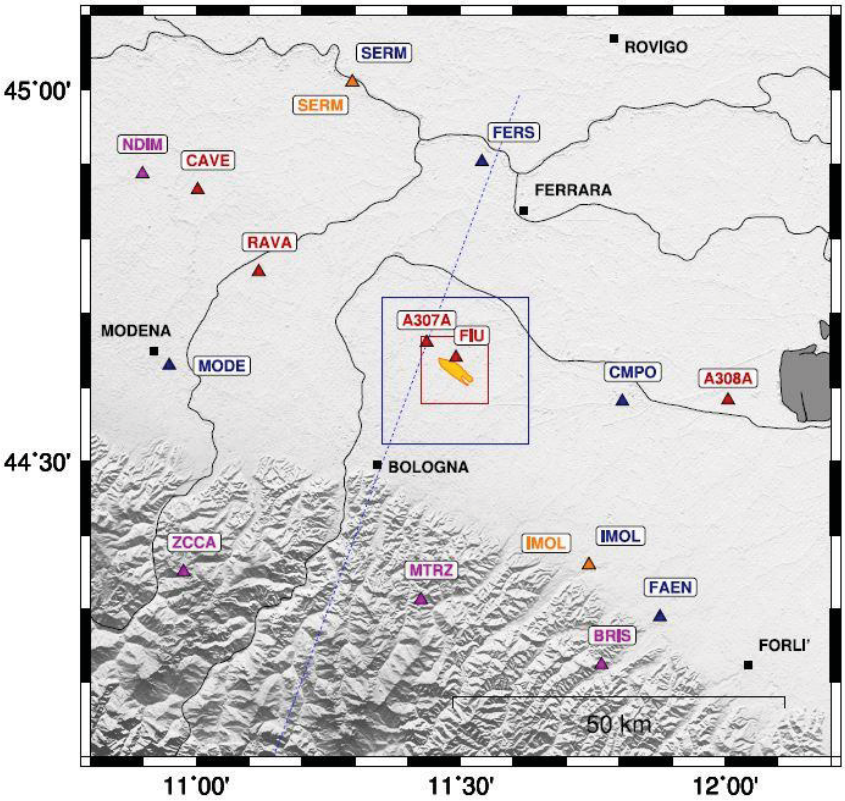

Figura 6. Stazioni della Rete Sismica Nazionale situate in un'area di (110 x 110) km^2 centrata attorno alla posizione del giacimento "Minerbio Stoccaggio". Triangoli rossi: sensori velocimetrici posti in superficie; triangoli blu: accelerometri posti in superficie; triangoli viola: stazioni superficiali equipaggiate con doppio sensore; triangoli arancioni: stazioni dotate di accelerometro in superficie e sensore velocimetrico in pozzetto (profondità: 100-200m). Vengono indicate le proiezioni in superficie dei limiti del Dominio Interno e del Dominio Esteso di rilevazione (linee rossa e blu, rispettivamente); la traccia della sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004) (linea tratteggiata blu) e la proiezione in superficie dell'area delimitata dalla linea di contatto GWC (area gialla).

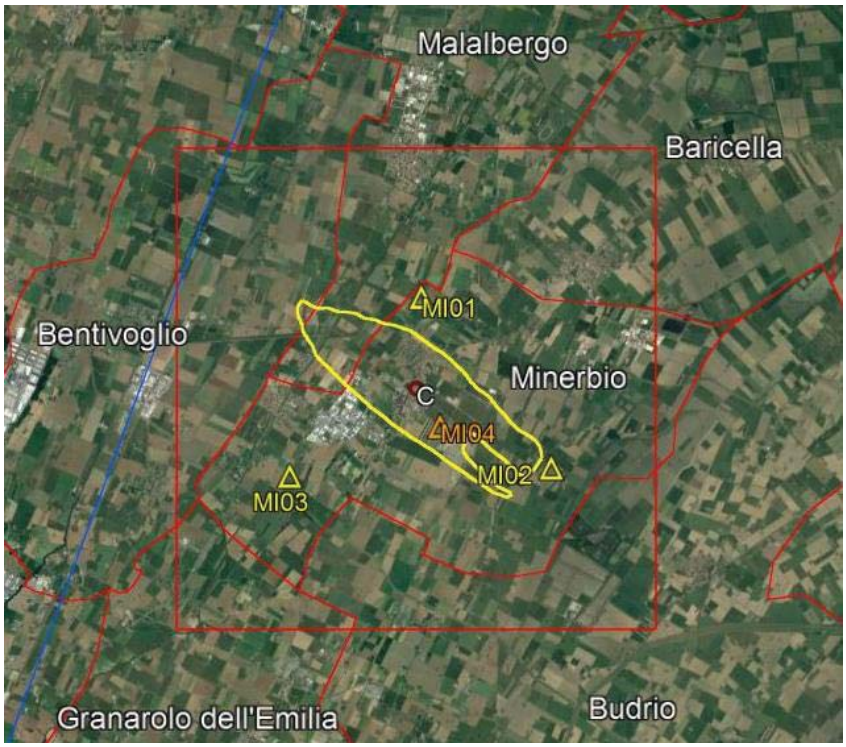

Figura 7. Configurazione della Rete Microsismica "Minerbio Stoccaggio": simboli gialli: stazioni con sensore velocimetrico installate in superficie; simbolo arancione: stazione con sensore velocimetrico installata in pozzetto (profondità: 100 m) e accelerometro in superficie. Vengono indicate le proiezioni in superficie del GWC (linea gialla) e del dominio interno di rilevazione (figure quadrata rossa). La linea blu con direzione NNE-SSO corrisponde alla sezione C-C' di Boccaletti et al. (2004).

Complessivamente sono installati 9 sensori velocimetrici (NDIM, CAVE, RAVA, SERM, FIU, 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). Nella medesima area sono presenti inoltre due stazioni sismiche INGV equipaggiate con sensori velocimetrici broad-band (A307A, A308A) dedicate al progetto AlpArray (AlpArray, 2016; INGV, 2016). Mediamente, le 15 stazioni della rete regionale sono caratterizzate da una minima distanza inter-stazione di circa 21 km (INGV-CNT, 2018a). Come suggerito in MiSE-DGS-UNMIG (2014), queste stazioni sono state utilizzate per integrare la Rete Microsismica "Minerbio Stoccaggio" (RMMS) che nel primo trimestre 2018 era composta da 4 stazioni velocimetriche installate nell'area del dominio interno di rilevazione, una delle quali equipaggiata con sensore in pozzetto a 100 m di profondità (Fig.7). In Tab.2 vengono riportate le caratteristiche strumentali della Rete Sismica Integrata "Minerbio Stoccaggio" (RSIMS) costituita da 12 stazioni della RSN (indicate dalla sigla "IV"), 2 stazioni del progetto AlpArray (indicate dalla sigla "Z3") e dalla RMMS (indicate dalla sigla "MI"). Nella RSIMS la stazione FIU della RSN viene sostituita da MI01, installata nel medesimo sito.

Rete	Sigla Stazione	Lat. N (°)	Lon. E (°)	Quota (m)	Prof. (m)	Località	Acquisitore	Velocimetro	Accelerometro	Dist. (km)	Az. (°)	Proprietà
IV	BRIS	44.22454	11.76657	260	0	Brisighella	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	49.5	153	INGV
IV	CAVE	44.86580	11.00310	18	0	Cavezzo	GAIA2	TRILLIUM-120S	_	47.1	305	INGV
IV	CMPO	44.58080	11.80560	2	0	Campotto Po	GAIA2	_	EPISENSOR-2G	25.5	100	INGV
IV	FAEN	44.28950	11.87700	41	0	Faenza	GAIA2	_	EPISENSOR-2G	48.2	140	INGV
IV	FERS	44.90350	11.54060	3	0	Ferrara	GAIA2	_	EPISENSOR-2G	31.4	7	INGV
IV	IMOL	44.35955	11.74248	27	175	Imola	GAIA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	35.5	145	INGV
IV	MODE	44.62972	10.94917	41	0	Modena	GAIA2	_	EPISENSOR-2G	42.9	271	INGV
IV	MTRZ	44.31280	11.42480	570	0	Monterenzio	TRIDENT	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	34.9	188	INGV
IV	NDIM	44.88730	10.89870	19	0	Novi di Modena	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	55.3	302	INGV
IV	RAVA	44.75587	11.11880	15	0	Ravarino	GAIA2	LE3D-5S	_	32.9	297	INGV
IV	SERM	45.00997	11.29582	7	135	Sermide	GAIA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	45.7	340	INGV
IV	ZCCA	44.35085	10.97650	700	0	Zocca	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	50.8	234	INGV
Z3	A307A	44.66076	11.43631	9	0	Bentivoglio	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_	6.0	315	ALPARRAY – INGV
Z3	A308A	44.58249	12.00568	-2	0	Longastrino	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_	41.2	96	ALPARRAY – INGV
MI	MI01	44.64014	11.49142	9	0	Fondo Fiumicello (Minerbio)	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_	1.9	3	STOGIT
MI	MI02	44.60820	11.52558	9	0	San Martino in Soverzano (Minerbio)	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_	3.3	120	STOGIT
MI	MI03	44.60666	11.45678	15	0	Spettoleria (Minerbio)	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S-MKIII	_	3.2	235	STOGIT
MI	MI04	44.61596	11.49631	11	100	Tintoria (Minerbio)	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-BH	SARA SA10 2G	0.9	147	STOGIT

Tabella 2. Rete Sismica Integrata "Minerbio Stoccaggio" (RSIMS): stazioni della Rete Sismica Nazionale (sigla "IV") e del progetto AlpArray (sigla "Z3") installate in un'area di (110 x 110) km^2 centrata attorno alla posizione del giacimento "Minerbio Stoccaggio" e stazioni della Rete Microsismica "Minerbio Stoccaggio" gestita dal Concessionario (sigla "MI"), installate all'interno della proiezione superficiale del Dominio Interno di rilevazione. 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.7. Si noti che gli accelerometri sono tutti installati in superficie.

A partire da Marzo 2018, i segnali registrati dalle stazioni riportate in Tab.2 vengono acquisiti in tempo reale su server dedicato presso INGV-MI. Il sistema di acquisizione e monitoraggio è stato scelto e configurato utilizzando criteri e strumenti (hardware e software) già ampiamente collaudati presso INGV, ed in particolare presso la sezione di Milano, basati su standard internazionali riconosciuti e adottati dai più importanti centri di ricerca sismologica. L'acquisizione in tempo reale viene realizzata mediante il

software Seedlink (IRIS, 2018a) che supporta il protocollo di trasmissione TCP/IP. Presso INGV-MI è stato creato e configurato il nodo master dedicato all'acquisizione dati Seedlink nel quale, a partire da Marzo 2017, confluiscono direttamente i dati delle stazioni della RSN e di AlpArray che compongono la RSIMS. Le stazioni della RMMS confluiscono invece nel nodo Seedlink di acquisizione realizzato presso il Concessionario che, a partire da Marzo 2018, confluisce nel nodo master INGV-MI. In tal modo i dati provenienti da tutte le stazioni che compongono la rete sismica integrata vengono acquisiti presso INGV-MI e, con questo tipo di configurazione, anche i dati provenienti da eventuali nuove stazioni previste dal Concessionario (cfr. paragrafo 4) potranno automaticamente confluire nel nodo master.

I dati registrati in continuo dalle stazioni della rete sismica integrata sono acquisiti nel formato miniSEED (IRIS, 2018b), affermatosi da tempo in ambito scientifico come formato standard per la trasmissione in tempo reale dei dati sismici e il medesimo formato è stato utilizzato per completare l'archivio delle forme d'onda mediante il trasferimento dei dati registrati prima della realizzazione del collegamento in tempo reale. A tal fine, sono stati effettuati il download dei dati della RSN e delle stazioni AlpArray, relativi al periodo Maggio 2015 - Febbraio 2017 e, ad opera del Concessionario, il trasferimento manuale presso INGV-MI dei dati della RMMS corrispondenti al periodo Maggio 2015 – Febbraio 2018. L'archivio delle forme d'onda registrate in continuo dalla rete sismica integrata risulta perciò completo a partire da Maggio 2015 e, come precedentemente illustrato, a partire da Marzo 2018 il popolamento dell'archivio delle forme d'onda presso il nodo master Seedlink di INGV-MI avviene in tempo reale.

L'analisi di qualità delle forme d'onda acquisite viene effettuata mediante il software PQLX (USGS, 2018), installato sul server di acquisizione, che può stimare il rumore sismico ambientale in tempo reale. L'analisi viene effettuata calcolando la densità dello spettro di potenza (PSD) del segnale registrato da ogni stazione e confrontando i risultati ottenuti con le curve standard di riferimento NHNM (New High Noise Model) e NLNM (New Low Noise Model) ricavate da Peterson (1993). Applicando l'algoritmo sviluppato da McNamara e Buland (2004), PQLX consente di calcolare le *Probabity Density Functions* (PDF) dello spettro di potenza (PSD) del segnale (McNamara e Boaz, 2005) relative a diversi periodi di funzionamento della stazione.

Ai fini della creazione del bollettino sismico della rete, sul server di acquisizione è stato installato e configurato un sistema di riconoscimento automatico di segnali transienti in coincidenza temporale basato su un algoritmo di tipo STA/LTA, che utilizza i dati dell'archivio delle forme d'onda in continuo convertiti nel formato SAC (Cattaneo et al., 2011; IRIS, 2018c). Si tratta di un sistema di trigger off-line con parametri selezionati mediante una serie di test effettuati su eventi registrati dalla RSN in tutto il periodo coperto dall'archivio delle forme d'onda disponibili. In corrispondenza di ogni evento riconosciuto il sistema di trigger produce quindi una serie di tracce "tagliate" in formato SAC, appartenenti alle stazioni che sono risultate in coincidenza rispetto all'evento stesso. Mediante il 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 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; il riconoscimento delle fasi sismiche; la localizzazione degli eventi; il calcolo della magnitudo e dei parametri di scuotimento del suolo. Come è noto, un sistema di riconoscimento automatico di eventi sismici che opera in tempo reale come Earthworm (trigger on-line) deve essere calibrato sull'area di monitoraggio in base alla configurazione della rete sismica installata. Questa operazione richiede ovviamente una fase di sperimentazione più o meno lunga in dipendenza della sismicità dell'area. Per la produzione del bollettino sismico, si è perciò reso necessario l'utilizzo di un sistema di riconoscimento automatico che non opera in tempo reale (trigger off-line). In questa fase, il software Earthworm viene dunque utilizzato solo a scopo di monitoraggio preventivo dell'area della concessione.

4. Analisi di detezione

Metodo

In accordo con quanto previsto durante l'incontro tecnico fra un rappresentante del MiSE e i rappresentanti di RER, Stogit, INGV, Comune di Minerbio e Assomineraria (MiSE-DGS-UNMIG, 2018), le analisi di detezione sono state effettuate considerando la rete microsismica installata nella concessione "Minerbio Stoccaggio" fino a Marzo 2018 (RO), la rete microsismica inizialmente pianificata dal Concessionario (RP2017) e la rete microsismica pianificata dal Concessionario nel 2018 e installata nel dominio interno a partire dal secondo trimestre 2018 (RP2018). Nell'ambito del progetto di sperimentazione degli ILG il Concessionario aveva infatti pianificato un'implementazione della RO (che comprende 4 stazioni di cui 1 in pozzetto a 100 m di profondità) fino a 11 stazioni di cui 5 con sensore in pozzetto (1 a 100 m e 4 a 150 m di profondità). I risultati delle analisi di detezione presentati nella Relazione N.01 del Protocollo Operativo (INGV-MI, 2017) mostrano, ad esempio, che in condizioni di rumore ambientale particolarmente sfavorevoli, la RP2017 consente di localizzare con buona precisione eventi sismici di magnitudo fino a 0.9 alla base del Dominio Interno. In un'ottica di gradualità di sviluppo della rete microsismica e in accordo con quanto previsto dal Protocollo Operativo, a partire dal secondo trimestre 2018 il Concessionario ha installato nell'area della concessione la RP2018, una versione sperimentale della RP2017 che comprende 8 stazioni di cui 4 con sensore in pozzetto (1 a 100 m e 3 a 150 m di profondità). Nel presente rapporto vengono confrontate le analisi di detezione delle tre reti sopra citate allo scopo di valutare le differenze di sensibilità esistenti tra RP2017 e RP2018. L'elenco di tutte le stazioni della RMMS (installate o pianificate) considerate nell'analisi di detezione è riportato in Tab.3.

Rete	Configurazione			Stazione	Latitudine N [°]	Longitudine E [°]	Quota [m]	Profondità [m]	Località
MI	RO	RP2017	RP2018	MI01	44.64014	11.49142	9	0	Fondo Fiumicello (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI02	44.60820	11.52558	9	0	San Martino in Soverzano (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI03	44.60666	11.45678	15	0	Spettoleria (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI04	44.61596	11.49631	11	100	Tintoria (Minerbio)
MI		RP2017	RP2018	MI05	44.64411	11.45093	9	150	Saletto (Minerbio)
MI		RP2017	RP2018	MI06	44.61623	11.40021	17	0	Santa Maria in Duno
MI		RP2017		MI07	44.56188	11.44420	22	150	Granarolo dell'Emilia
MI		RP2017	RP2018	MI08	44.55698	11.53678	18	150	Riccardina (Minerbio)
MI		RP2017		MI09	44.62196	11.57970	8	0	Budrio
MI		RP2017	RP2018	MI10	44.67853	11.53648	7	150	Boschi (Minerbio)
MI		RP2017		MI11	44.67707	11.43992	9	0	San Pietro in Casale

Tabella 3. Stazioni della Rete Microsismica *Minerbio Stoccaggio* e configurazione della rete nelle diverse implementazioni adottate o previste nell'ambito del Protocollo Operativo. RO: rete operativa fino a Marzo 2018; RP2017: rete pianificata nella fase iniziale del Protocollo Operativo; RP2018: rete operativa a partire dal secondo trimestre del 2018.

Per ciascuna delle tre reti, le analisi di detezione sono state condotte nelle aree del dominio interno e del dominio esteso introducendo un grigliato regolare di punti origine per le sorgenti sismiche puntiformi come mostrato in Fig.9. L'analisi è stata condotta utilizzando la metodologia adottata nella Relazione N.01 del Protocollo Operativo (INGV-MI, 2017a) e qui di seguito sintetizzata:

1) Misura delle PDF della densità spettrale di potenza (PSD) di rumore sismico ambientale in corrispondenza dei sensori installati (cfr. Fig. 8).
2) Definizione delle condizioni di alto-rumore e basso-rumore mediante la stima del 90° percentile delle PDF complessive e della mediana delle PDF notturne osservate, rispettivamente. Le curve rappresentative del livello di rumore sismico ambientale vengono considerate per frequenze comprese fra 1 e 30 Hz.
3) Definizione dei livelli di rumore sismico in corrispondenza dei nuovi siti di installazione mediante estrapolazione dei livelli di rumore osservati a MI01 e considerando per i sensori in pozzetto una diminuzione di rumore con la profondità pari a 0.1 dB/m (Franceschina et al., 2015).
4) Definizione del grigliato di punti origine per la simulazione di sorgenti sismiche puntiformi. A tal fine le sorgenti sismiche vengono collocate in corrispondenza di 169 punti di 5 grigliati regolari ricoprenti un'area di (24 x 24) km^2 che comprende la proiezione in superficie del Dominio Esteso, posti alle profondità di 1.5; 3.0; 5.0; 8.0 e 11.0 km (cfr. Fig. 9).
5) Definizione dell'intervallo di magnitudo locale da utilizzare nelle simulazioni: $-1.0 < M_L < 3.0$.
6) Simulazione dello spettro di potenza da sorgente puntiforme mediante l'utilizzo del modello di Brune (1970; 1971) per definire lo spettro di Fourier e di una legge di scala caratterizzata da una relazione di proporzionalità del tipo: Log $Mo \div M_L$ fra momento sismico e magnitudo locale (Hanks e Boore, 1984) e da una caduta di sforzo indipendente dal momento sismico ($\Delta\sigma$ = 1 MPa). Per tutti gli eventi viene considerata una durata fissa del segnale pari a 5 s.
7) Calcolo dello spettro di potenza al sito, mediante l'introduzione di un termine moltiplicativo dello spettro di Fourier dipendente dalla frequenza e dalla distanza, allo scopo di parametrizzare l'attenuazione delle onde sismiche. In particolare, la diffusione geometrica viene assunta dipendente dall'inverso della distanza ipocentrale mentre le attenuazioni anelastica e da diffusione vengono parametrizzate con il fattore di qualità per f=1 Hz, Q_O (Lay e Wallace, 1995) e con il parametro di decadimento spettrale k (Anderson e Hough, 1984). Nelle simulazioni viene considerato l'effetto di amplificazione di superficie libera introducendo il fattore Fs=2 per le stazioni poste in superficie e Fs=1 per le stazioni installate in pozzetto. Il valore dei parametri di simulazione viene desunto da studi sismologici effettuati nell'area in esame (Castro et al., 2013; Carannante et al., 2015; 2016).
8) Confronto fra spettro di potenza simulato e spettro di potenza del rumore sismico. L'evento sismico viene considerato identificabile quando si ottiene un rapporto segnale disturbo pari a 5 (corrispondente a 14 dB), considerando il valore massimo dello spettro di potenza del terremoto e il valor medio del PSD del rumore per frequenze maggiori di 1 Hz. Il superamento di questa soglia determina la detezione dell'evento da parte della stazione sismica in esame. La soglia di detezione viene definita come la magnitudo minima affinché un terremoto venga registrato da almeno una stazione della rete. La soglia di localizzazione viene definita invece come la magnitudo minima di un terremoto localizzabile. A questo proposito, vengono considerati il caso di localizzazione mediante almeno 3 stazioni della rete e il caso di localizzazione con almeno 4 stazioni della rete, quest'ultimo caratterizzato da una maggiore precisione nella stima dell'ipocentro (Husen e Hardebeck, 2010). Per ognuna delle configurazioni di rete analizzate vengono dunque considerati i casi riportati in Tab.4. Nelle analisi di detezione sono state incluse le stazioni della RSN e le stazioni del progetto AlpArray.

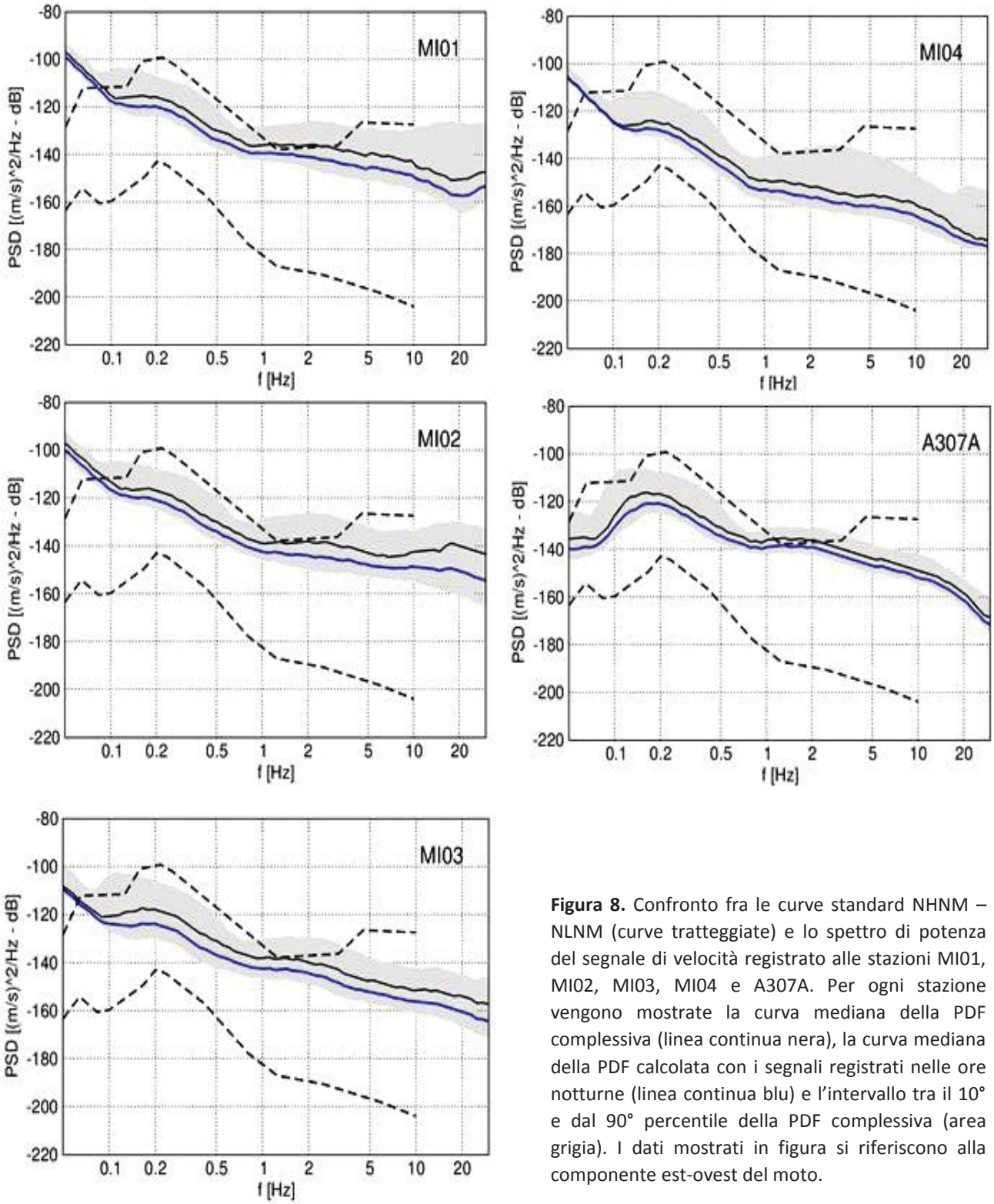

Figura 8. Confronto fra le curve standard NHNM – NLNM (curve tratteggiate) e lo spettro di potenza del segnale di velocità registrato alle stazioni MI01, MI02, MI03, MI04 e A307A. Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera), la curva mediana della PDF calcolata con i segnali registrati nelle ore notturne (linea continua blu) e l'intervallo tra il 10° e dal 90° percentile della PDF complessiva (area grigia). I dati mostrati in figura si riferiscono alla componente est-ovest del moto.

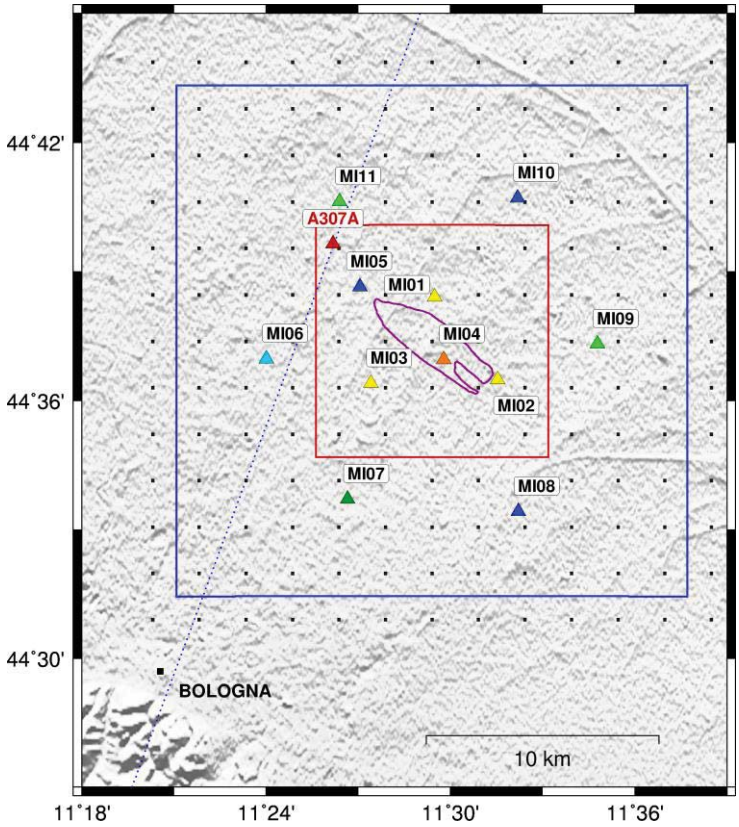

Figura 9. Configurazione delle reti microsismiche e posizione del grigliato utilizzato per le simulazioni. Rete operativa (RO): stazioni in superficie (simboli gialli) e stazione in pozzetto (simbolo arancione). Rete pianificata inizialmente dal Concessionario (RP2017): costituita dalle stazioni della RO e dalle stazioni indicate con i simboli azzurri e verde chiaro (stazioni in superficie) e con i simboli blu e verde scuro (stazioni in pozzetto). Rete realizzata dal Concessionario a partire dal secondo trimestre 2018 (RP2018): costituita dalle stazioni della RO e dalle stazioni indicate con i simboli azzurri (stazioni in superficie) e con i simboli blu (stazioni in pozzetto). Il sensore di MI04 è installato a 100 m di profondità mentre i sensori di MI05, MI07, MI08, MI10 sono o dovevano essere installati a 150 m di profondità. In rosso viene indicata la stazione A307A del progetto AlpArray, inclusa nelle analisi di detezione. Vengono mostrate inoltre la proiezione in superficie del Dominio Interno (linea rossa continua); del Dominio Esteso (linea blu continua) e della traccia del GWC (linea viola). La traccia della sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004) è indicata dalla linea blu tratteggiata.

Caso	Livello di rumore sismico ambientale ipotizzato per ogni stazione	Numero minimo di stazioni richieste per la localizzazione
A1	90° percentile della PDF complessiva	4
A2	mediana della PDF notturna	4
B1	90° percentile della PDF complessiva	3
B2	mediana della PDF notturna	3

Tabella 4. Combinazioni di livelli di rumore sismico ambientale e numero minimo richiesto di stazioni per la localizzazione di un evento sismico utilizzate per le analisi di detezione della RMMS

Risultati

I risultati ottenuti dalle simulazioni dei casi elencati in Tab.4 per le profondità di 1.5, 3.0, 5.0, 8.0 e 11.0 km e per le reti RO, RP2017 e RP2018 sono sintetizzati in Tab.5. I valori elencati si riferiscono alla soglia media di magnitudo M_L, calcolata per ogni profondità, in aree corrispondenti alla proiezione superficiale del DI e alla parte di DE non inclusa in DI, rispettivamente. In Fig.10 viene mostrata la distribuzione in profondità delle soglie medie ottenute mentre le mappe di localizzazione vengono mostrate da Fig.11 a Fig.15 per i casi A1 e A2 e da Fig.16 a Fig.20 per i casi B1 e B2.

Con la rete operativa, in corrispondenza della proiezione in superficie del DI, nel caso A1 si ottengono mediamente le seguenti soglie di magnitudo di localizzazione: 1.0 (alla profondità del giacimento), 1.3 (alla base del DI) e 1.6 (alla base del DE). Nel caso B1, che considera il numero di stazioni minime per poter effettuare la localizzazione di un evento sismico, si osserva una diminuzione della soglia di magnitudo di localizzazione che aumenta con la profondità. Si ottengono i seguenti valori medi di M_L: 0.8 (alla profondità del giacimento), 0.9 (alla base del DI) e 1.2 (alla base del DE). Nella condizione di rumore sismico ambientale favorevole (casi A2 e B2), in corrispondenza della proiezione in superficie del DI si ottiene un notevole miglioramento della detezione, con abbassamenti delle soglie di localizzazione che possono anche arrivare fino a un grado di magnitudo. In particolare, si ottengono i seguenti valori medi di

M_L: 0.2 (alla profondità del giacimento), 0.4 (alla base del DI) e 0.6 (alla base del DE) nel caso A2; 0.1 (alla profondità del giacimento), 0.3 (alla base del DI) e 0.6 (alla base del DE) nel caso B2. Naturalmente, nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI, le soglie di magnitudo di localizzazione sono mediamente più elevate. Al variare della profondità si ottengono i seguenti intervalli di M_L: [1.4-1.7] nel caso A1, [1.1-1.3] nel caso B1, [0.6-0.8] nel caso A2 e [0.4-0.7] nel caso B2.

In condizioni sfavorevoli di rumore ambientale, la rete attualmente operativa consente dunque di localizzare con buona precisione eventi sismici fino a magnitudo 1.0 in corrispondenza del *reservoir* e fino a magnitudo 1.3 in tutto il Dominio Interno (caso A1). Considerando il Dominio Esteso, possiamo assumere come riferimento i casi B1 e B2, dato che esternamente a DI, la localizzazione degli eventi può essere effettuata anche con minor precisione. Di conseguenza, in caso di rumore ambientale sfavorevole possiamo considerare [1.1-1.3] come l'intervallo di soglie di localizzazione ottenibile in DE dalla rete attualmente operativa.

Secondo gli ILG, la rete pianificata dal Concessionario dovrebbe portare nell'intervallo [0.0-1.0] e a 1.0 le magnitudo di localizzazione ottenibili in DI e in DE, rispettivamente. In effetti, con la RP2018, nel caso A1 si ottengono mediamente le seguenti soglie di magnitudo di localizzazione: 0.8 (alla profondità del giacimento), 0.9 (alla base del DI) e 1.2 (alla base del DE). Invece, nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI, prendendo di nuovo come riferimento il caso B1 si ottengono le seguenti soglie: 1.0 (alla profondità del giacimento), 1.1 (alla base del DI) e 1.2 (alla base del DE).

I risultati riportati in Tab.5 mostrano dunque che nel Dominio Interno la RP2018 consente di ottenere gli stessi livelli di detezione della RP2017 mentre nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI risulta leggermente meno sensibile, con differenze di soglie di localizzazione che generalmente risultano essere intorno al decimo di grado di magnitudo M_L. Si tratta di differenze contenute nell'incertezza delle stime di questo parametro, generalmente pari a 0.2 – 0.3 gradi.

Confrontando le mappe ottenute nei casi RP2018 e RP2017 (cfr. Fig. 11-15 per i casi di alto-rumore e Fig. 16-20 per i casi di basso-rumore), si può notare che fino a 8 km di profondità, la distribuzione areale dei valori di soglia viene influenzata dalla presenza delle stazioni MI07 e MI09, assenti nella configurazione RP2018. La presenza della MI11 risulta invece ininfluente dal punto di vista della soglia minima di localizzazione. In generale, la mancata installazione di queste stazioni modifica quindi la distribuzione areale della sensibilità della rete, aumentando leggermente la soglia di localizzazione ad Est e a Sud del *reservoir*, senza tuttavia compromettere la sensibilità media della rete. Il minor numero di stazioni che caratterizza la RP2018 potrebbe invece condizionare la precisione delle stime di localizzazione. Infatti, i criteri empirici solitamente impiegati per valutare l'affidabilità della stima dei parametri di localizzazione riguardano: il numero di fasi utilizzate (arrivi P ed S), il GAP (massimo angolo senza osservazioni), la distanza dell'epicentro dalla stazione più vicina e l'ampiezza media dei residui fra tempi di viaggio osservati e stimati. Per una localizzazione accettabile, vengono solitamente richiesti un numero minimo di fasi pari a 8 (delle quali almeno una fase S) e un GAP minore di 180° (Husen e Hardebeck, 2010).

Come già evidenziato, l'area in esame risulta caratterizzata da livelli di rumore sismico ambientale molto elevati che, specialmente nelle ore di più intensa attività antropica possono influenzare negativamente le capacità di detezione di eventi sismici da parte delle reti microsismiche di superficie. Si rende quindi necessaria almeno l'installazione di qualche sensore in pozzetto (100-200 m). Le analisi di detezione della RMMS condotte nel presente rapporto mostrano che la configurazione RP2018 garantisce i livelli di detezione richiesti dagli ILG nel Dominio Interno di rilevazione anche in condizioni sfavorevoli di rumore sismico ambientale.

RO: rete operativa fino a Marzo 2018								
rumore sismico ambientale	90° percentile della PDF complessiva				Mediana della PDF notturna			
caso	A1 (N=4)		B1 (N=3)		A2 (N=4)		B2 (N=3)	
area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	1.02	1.43	0.80	1.11	0.22	0.55	0.09	0.41
h = 3.0 km	1.10	1.45	0.86	1.13	0.26	0.58	0.16	0.43
h = 5.0 km	1.27	1.49	0.93	1.16	0.37	0.62	0.26	0.48
h = 8.0 km	1.44	1.60	1.06	1.23	0.54	0.70	0.43	0.58
h = 11.0 km	1.60	1.69	1.20	1.31	0.62	0.80	0.60	0.69

RP2018: rete operativa a partire dal secondo trimestre 2018								
rumore sismico ambientale	90° percentile della PDF complessiva				Mediana della PDF notturna			
caso	A1 (N=4)		B1 (N=3)		A2 (N=4)		B2 (N=3)	
area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	0.80	1.09	0.72	0.98	-0.02	0.23	-0.18	0.12
h = 3.0 km	0.86	1.11	0.77	1.00	0.05	0.25	-0.06	0.16
h = 5.0 km	0.94	1.15	0.90	1.06	0.14	0.31	0.01	0.22
h = 8.0 km	1.07	1.24	1.02	1.15	0.23	0.38	0.18	0.29
h = 11.0 km	1.20	1.30	1.20	1.24	0.36	0.46	0.23	0.37

RP2017: rete pianificata nella fase iniziale del Protocollo Operativo								
rumore sismico ambientale	90° percentile della PDF complessiva				Mediana della PDF notturna			
caso	A1 (N=4)		B1 (N=3)		A2 (N=4)		B2 (N=3)	
area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	0.78	1.04	0.70	0.95	-0.06	0.19	-0.20	0.06
h = 3.0 km	0.83	1.07	0.75	0.98	0.02	0.22	-0.10	0.10
h = 5.0 km	0.94	1.12	0.88	1.04	0.09	0.29	0.00	0.16
h = 8.0 km	1.06	1.21	1.02	1.14	0.21	0.36	0.15	0.24
h = 11.0 km	1.20	1.28	1.20	1.23	0.31	0.42	0.20	0.33

Tabella 5. Reti RO; RP2018 e RP2017. Valori medi delle soglie di localizzazione in unità di magnitudo M_L, calcolati per diverse profondità, h, nei casi di Tab. 4, in un'area corrispondente alla proiezione in superficie del Dominio Interno di rilevazione, DI, e in un'area corrispondente alla proiezione in superficie della parte di Dominio esteso non inclusa in DI, DE-DI. N indica il numero minimo di detezioni richieste per la localizzazione dell'evento.

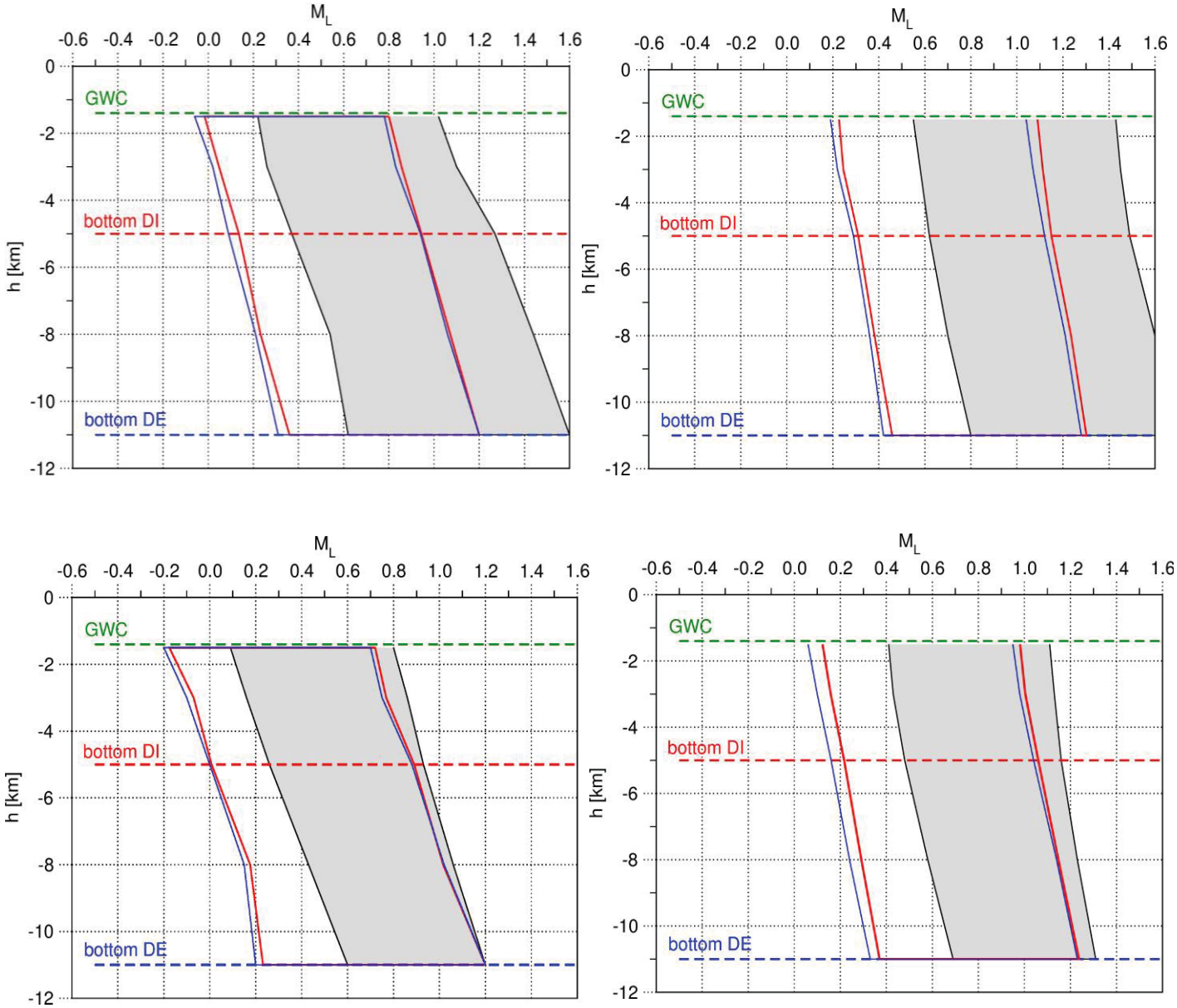

Figura 10. Valori medi delle soglie di localizzazione in unità di magnitudo M_L in funzione della profondità, h, nel Dominio Interno di rilevazione, DI (riquadri a sinistra), e nella parte di Dominio Esteso non inclusa in DI, DE-DI (riquadri di destra). Le soglie di localizzazione sono state ottenute considerando N, numero minimo di detezioni per la localizzazione, uguale a 4 (riquadri in alto) ed N uguale a 3 (riquadri in basso). In ogni riquadro viene mostrata la variabilità delle soglie ottenute al variare delle condizioni di rumore sismico ambientale nell'intervallo basso-rumore – alto-rumore definito in Tab.4. Linee nere e aree grigie: RO; linee rosse continue: RP2018; linee blu continue: RP2017.

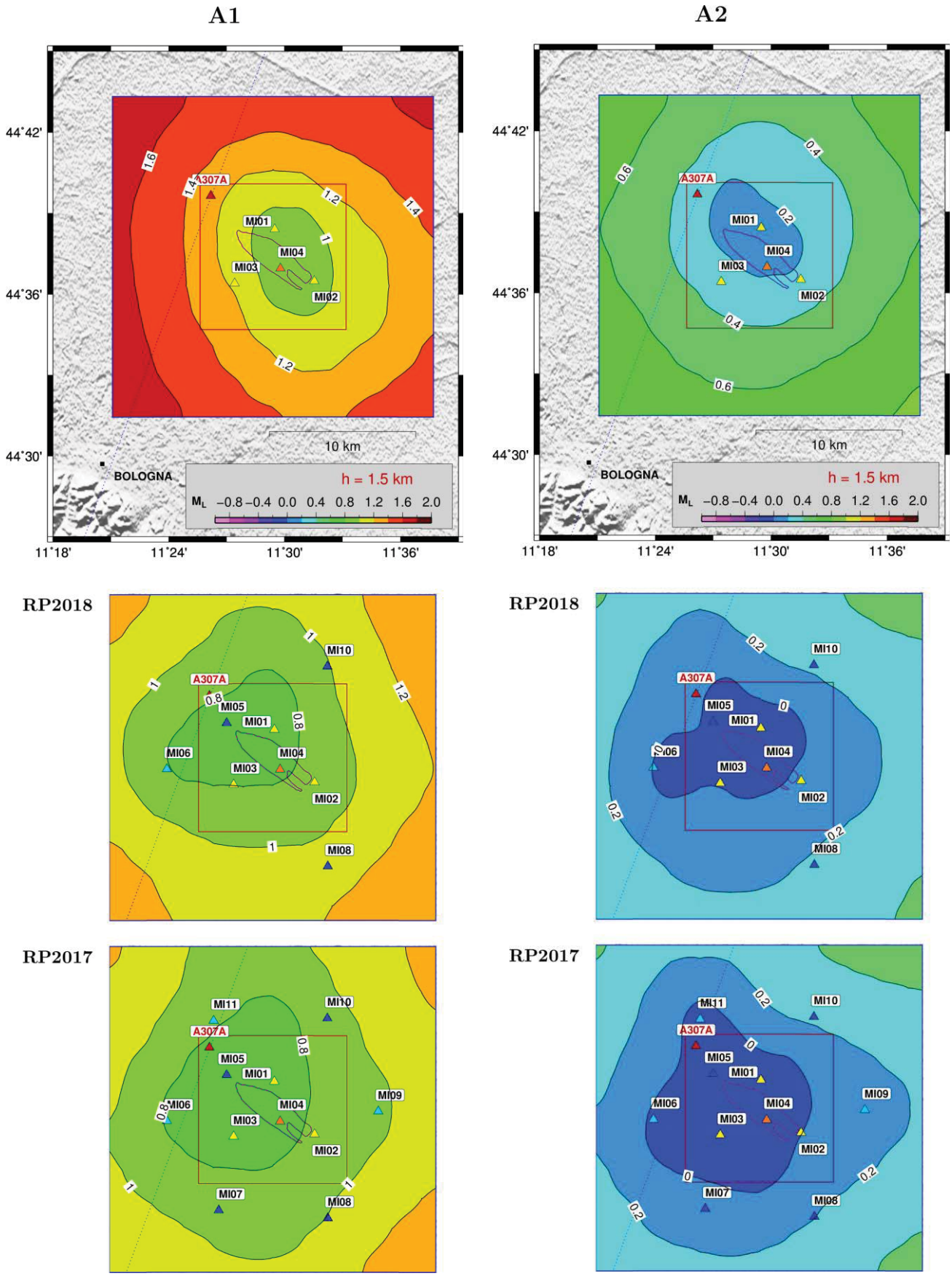

Figura 11. Mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L, ottenute nei casi A1 e A2 (cfr. Tab. 4) per eventi sismici localizzati alla profondità di 1.5 km (profondità del *reservoir*). In alto: rete operativa fino al primo trimestre 2018; al centro: rete operativa a partire dal secondo trimestre 2018; in basso: rete pianificata dal Concessionario nel 2017. Stazioni in superficie: simboli in giallo e in azzurro; stazioni in pozzetto: simboli in arancione e in blu.

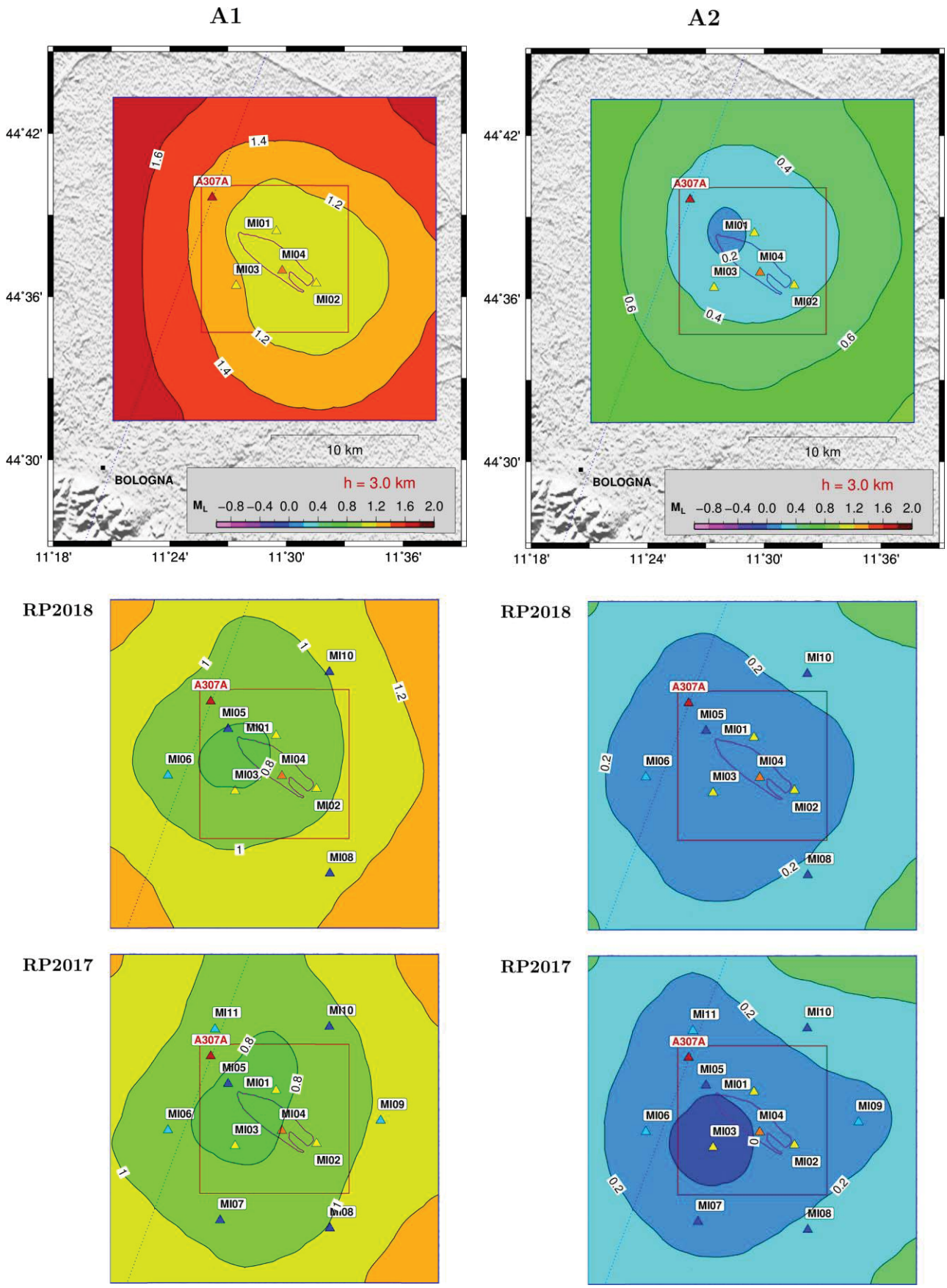

Figura 12. Come in Fig. 11 per la profondità di 3.0 km.

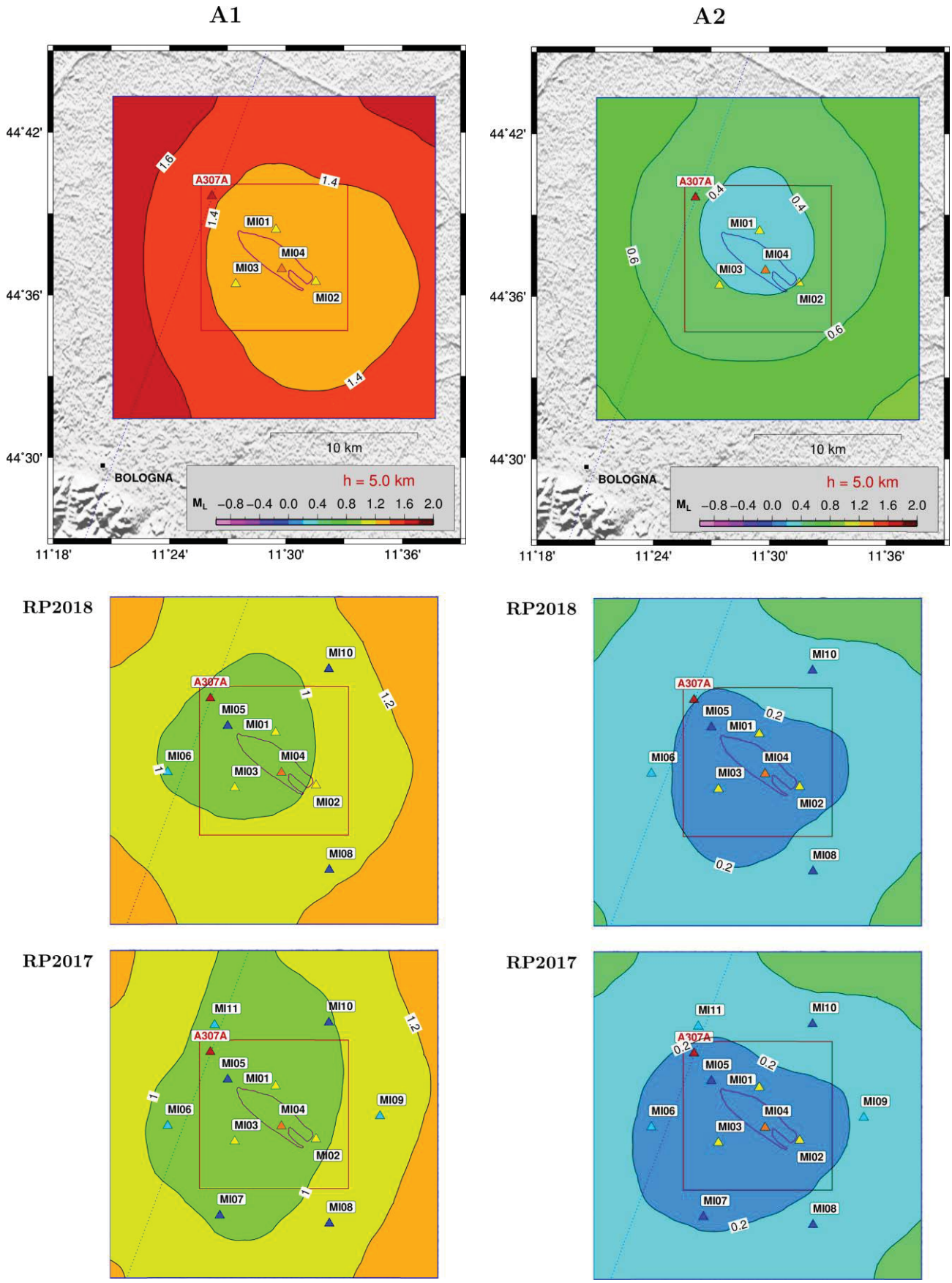

Figura 13. Come in Fig. 11 per la profondità di 5.0 km (base del dominio interno di rilevazione).

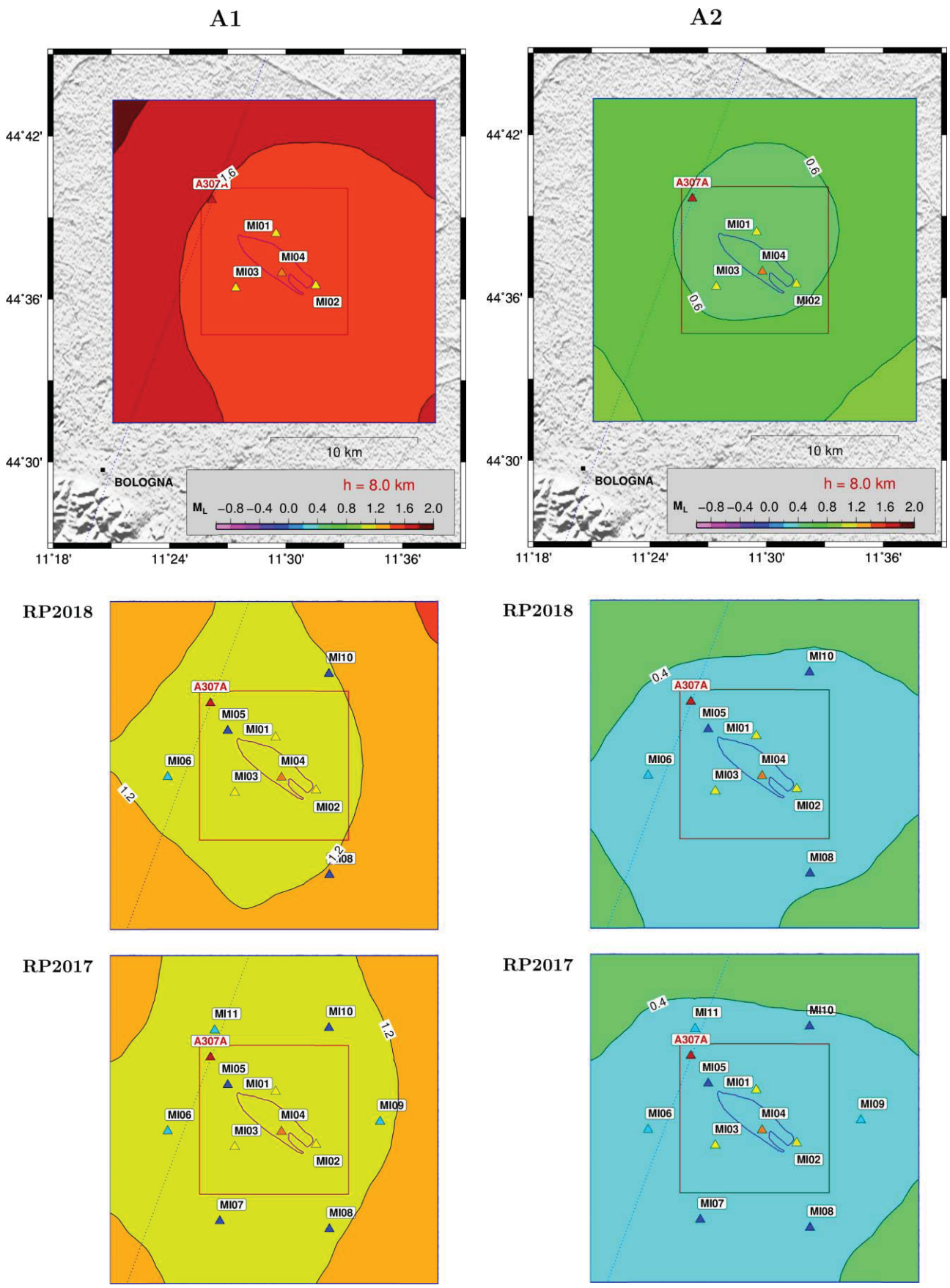

Figura 14. Come in Fig. 11 per la profondità di 8.0 km.

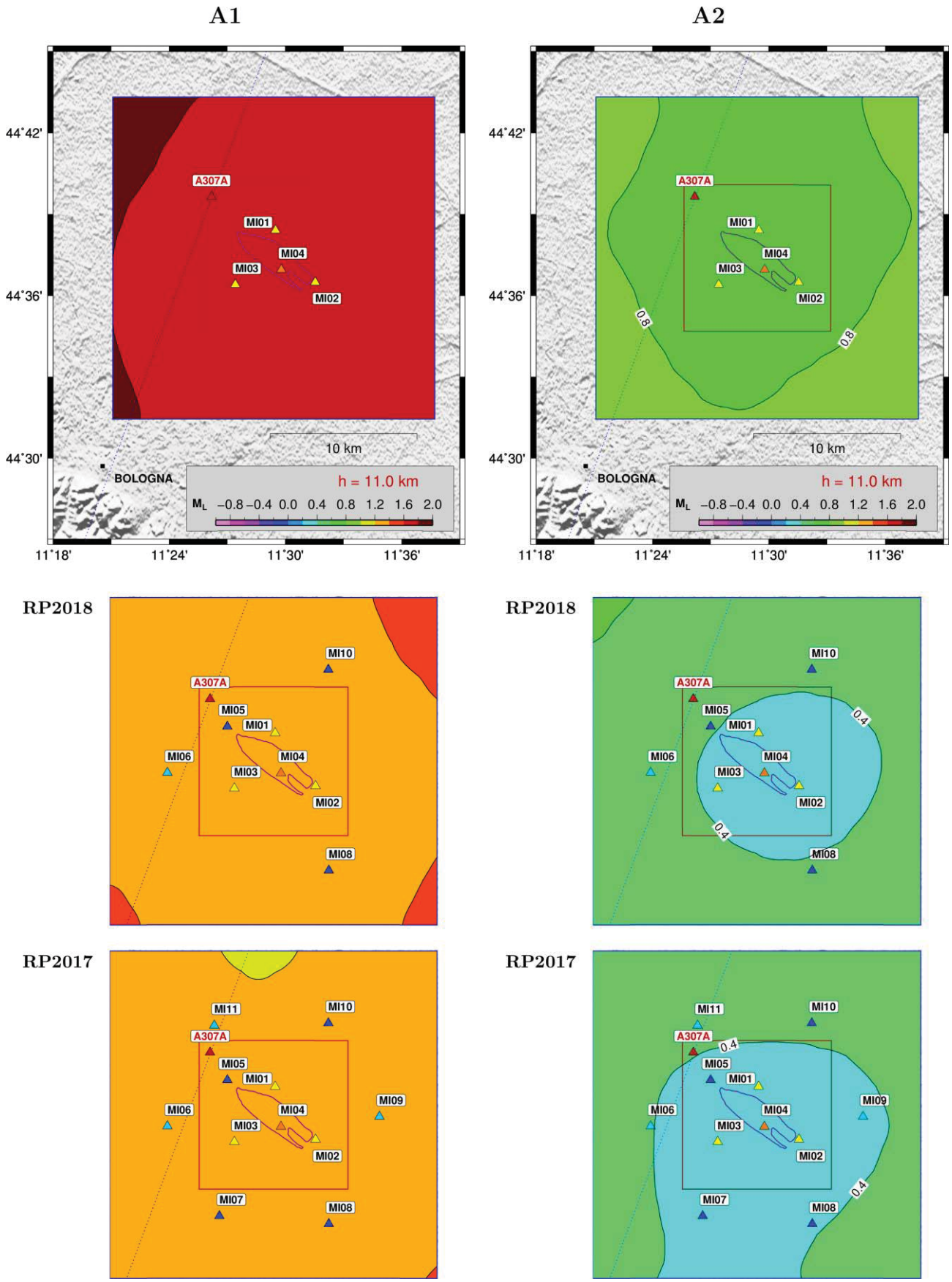

Figura 15. Come in Fig. 11 per la profondità di 11.0 km (base del dominio esteso di rilevazione).

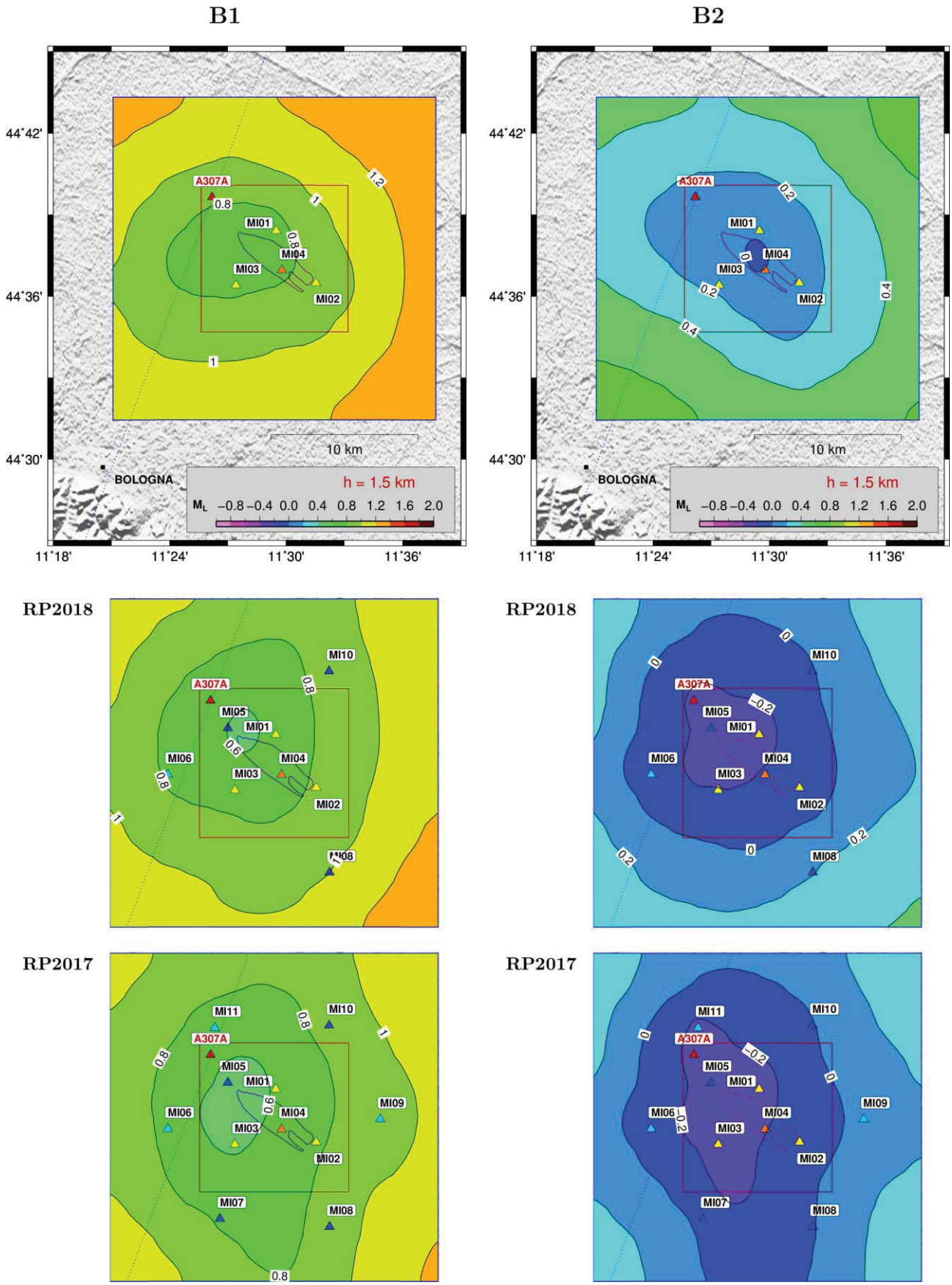

Figura 16. Mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L, ottenute nei casi B1 e B2 (cfr. Tab. 4) per eventi sismici localizzati alla profondità di 1.5 km (profondità del *reservoir*). In alto: rete operativa fino al primo trimestre 2018; al centro: rete operativa a partire dal secondo trimestre 2018; in basso: rete pianificata dal Concessionario nel 2017. Stazioni in superficie: simboli in giallo e in azzurro; stazioni in pozzetto: simboli in arancione e in blu.

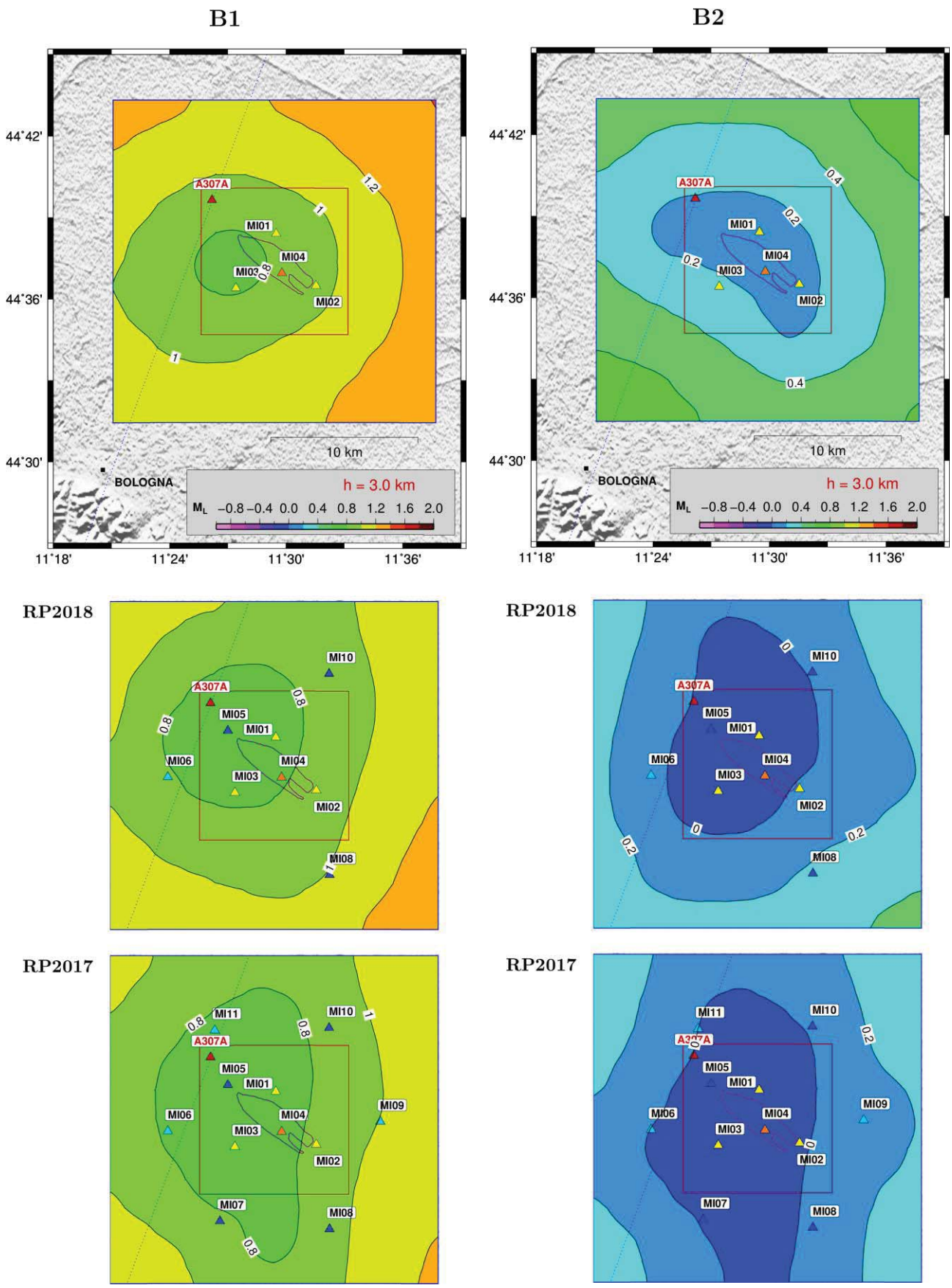

Figura 17. Come in Fig. 16 per la profondità di 3.0 km.

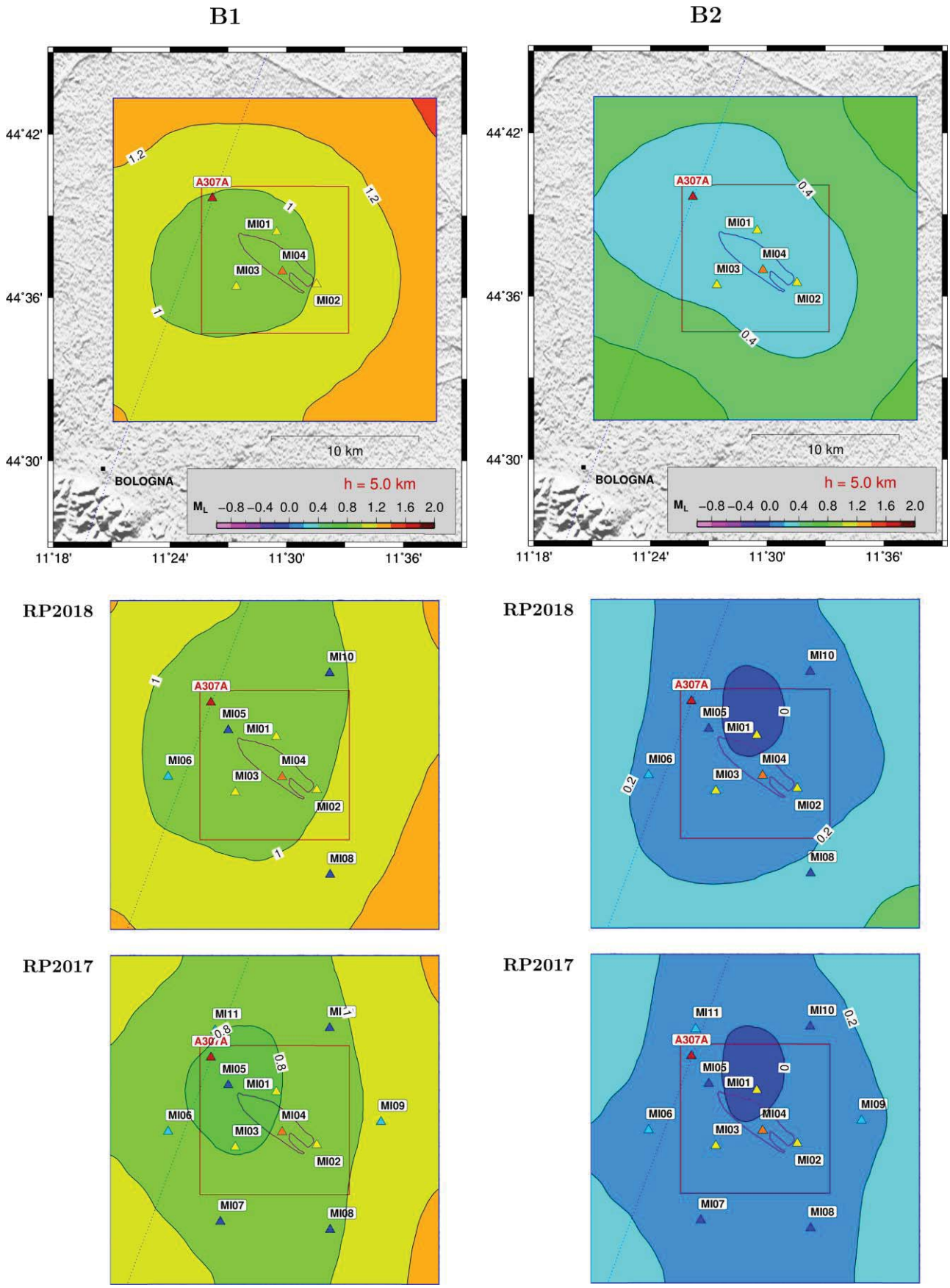

Figura 18. Come in Fig. 16 per la profondità di 5.0 km (base del dominio interno di rilevazione).

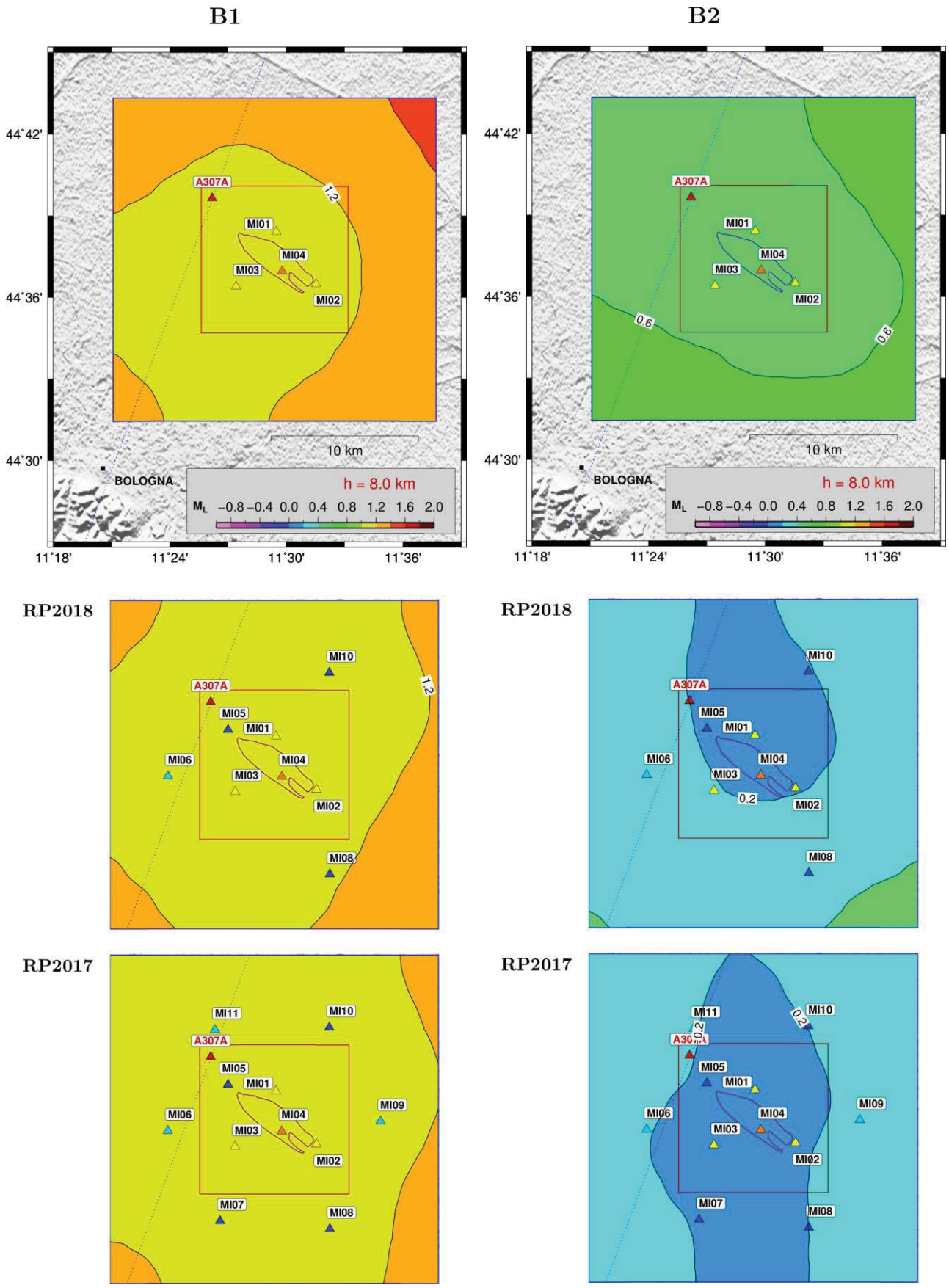

Figura 19. Come in Fig. 16 per la profondità di 8.0 km.

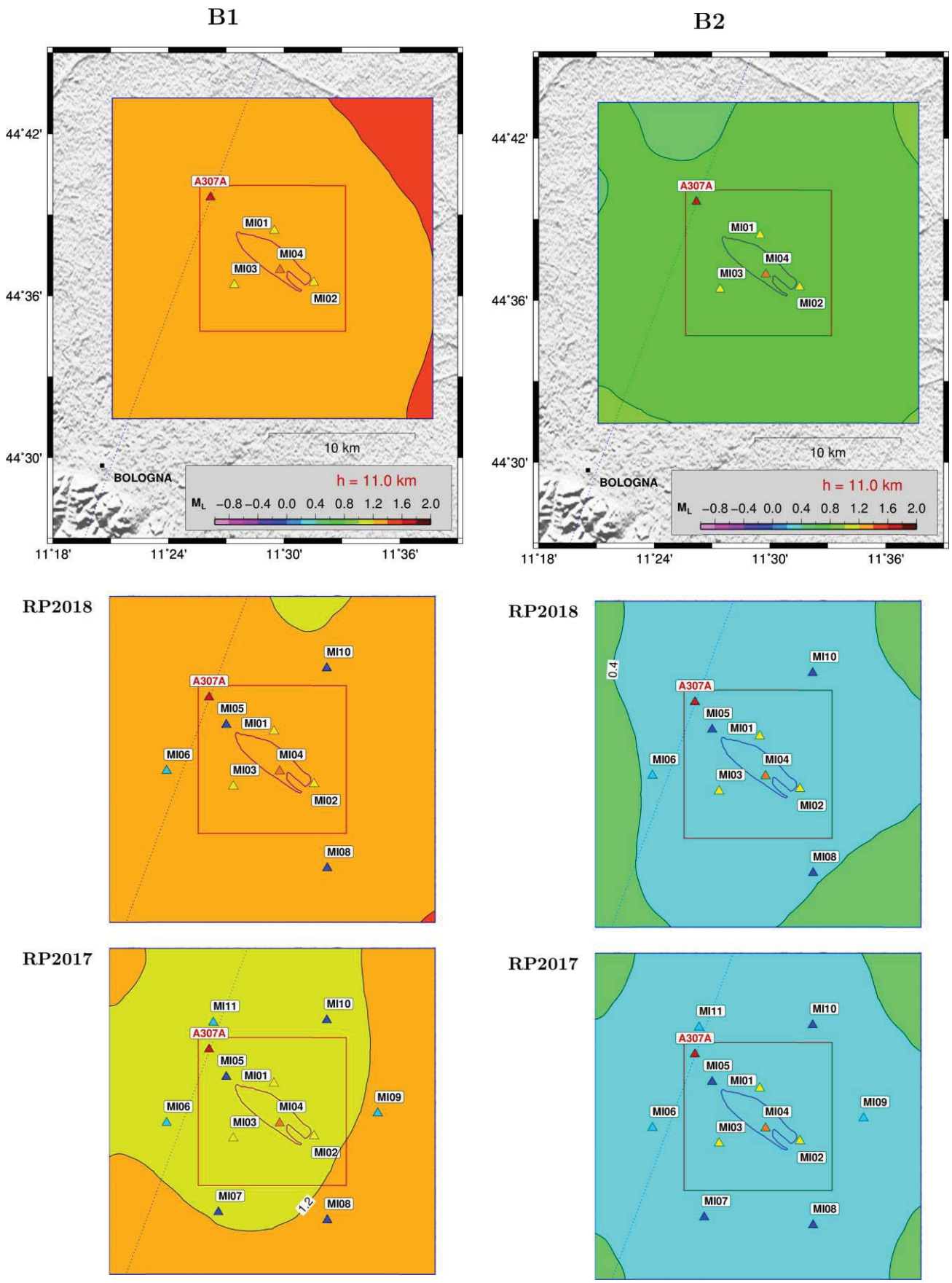

Figura 20. Come in Fig. 16 per la profondità di 11.0 km (base del dominio esteso di rilevazione).

5. Analisi di rumore sismico ambientale

La qualità delle forme d'onda acquisite nel primo trimestre 2018 dalla RSIMS è stata valutata stimando il rumore sismico ambientale registrato da ogni stazione della rete mediante PQLX (USGS, 2018). Il software utilizza l'algoritmo sviluppato da McNamara e Buland (2004) per calcolare lo spettro di potenza (PSD) del segnale registrato in continuo, analizzando finestre della durata di un'ora con sovrapposizione del 50%, per un totale di 48 curve di PSD per ogni giorno di registrazione. Le finestre vengono sovrapposte allo scopo di diminuire la varianza della stima. Le *Probabity 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 2018 considerando separatamente le stime orarie diurne da 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).

Analizzando il suddetto periodo di funzionamento della rete si ottengono più di 4300 curve di PSD per ciascuna componente delle stazioni MI01, MI02, MI03 e MI04 e 4071 curve di PSD per ciascuna componente della stazione A307A. Tali curve vengono utilizzate per calcolare le PDF corrispondenti agli intervalli diurni e notturni e i risultati, riportati da Fig. 21 a Fig. 25, consentono un'analisi dettagliata della variazione dei livelli di rumore ambientale che si osserva tra il giorno e la notte e tra i giorni feriali e festivi. Per ogni stazione vengono mostrati i risultati relativi alle componenti verticali del moto. 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) è stata 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.

In tutte le figure riportate si può notare che una selezione operata sulla parte di PDF relativa alle PSD più rumorose rivela una corrispondenza con gli intervalli orari diurni dei giorni feriali mentre una selezione operata sulla parte relativa alle PSD meno rumorose corrisponde ad intervalli di tempo complementari (per alcune stazioni, come ad esempio MI02 e MI04, si osserva anche una correlazione tra la diminuzione del rumore e l'intervallo di circa un'ora dalle 11:00 alle 12:00 GMT probabilmente dovuto alla pausa pranzo). Si può notare inoltre che le PDF mostrate nei pannelli A0 evidenziano generalmente uno sdoppiamento della distribuzione per frequenze maggiori di 0.6 - 0.7 Hz, dovuto essenzialmente alla variabilità giornaliera del rumore sismico ambientale. In generale, per le stazioni poste in superficie, nella banda di frequenza 1-30 Hz il livello medio di rumore sismico ambientale si attesta attorno a -110 dB, leggermente al di sotto della curva NHNM, mentre la stazione MI04, installata in pozzetto a 100 m di profondità, mostra un livello medio di rumore di circa -120 dB.

Di seguito viene riportata l'analisi di dettaglio relativa ad ogni singola stazione. E' importante notare che per le stazioni MI01, MI02, MI03 e MI04 grafici mostrati nei pannelli A0, A1 e A2 devono essere considerati esclusivamente per frequenze superiori a circa 0.1 Hz mentre per la stazione A307A, dotata di sensore broad-band, è possibile considerare l'intero intervallo di frequenza indicato in ascissa.

.

- **MI01:** osservando il pannello A0 si può notare come a partire da frequenze maggiori di 0.7 Hz inizi uno sdoppiamento della PDF (la decisa tonalità di blu indica una maggiore probabilità di densità spettrale). Questo andamento è tipico di una stazione sismica che risente della variabilità giorno/notte dei livelli di rumore ambientale. La selezione operata sulla parte di PDF relativa alle PSD più rumorose rivela generalmente una corrispondenza con gli intervalli 05:00 - 18:30 (GMT) dei giorni feriali. Analizzando il ramo inferiore della PDF si osserva una corrispondenza con gli intervalli di tempo complementari, corrispondenti ai giorni festivi e ai periodi notturni dei giorni feriali. Mediamente si osserva una variazione giorno/notte di circa 8 dB a partire da 1 Hz.

- **MI02:** i risultati mostrano una rumorosità molto simile a quella di MI01 con una variazione giorno/notte di circa 10 dB a partire da 1 Hz.

- **MI03:** le PDF mostrano un livello di rumorosità più elevato rispetto a quello che caratterizza le due stazioni precedenti. Tale differenza è ben visibile sul ramo notturno della PDF (pannello A2) che si attesta decisamente al di sopra della curva di riferimento NHLN con una differenza media rispetto alla MI02 di 12 dB. Anche in questo caso è ben visibile la variazione giorno/notte del rumore sismico ambientale.

- **MI04:** la stazione, installata a 100 m di profondità, presenta una variazione giorno/notte dei livelli medi di rumore confrontabile con quella mostrata dalle stazioni precedenti. Tuttavia, per frequenze attorno a 1 Hz, i livelli diurno a notturno risultano inferiori di circa 10 dB rispetto a quelli mostrati da MI03. Alle stesse frequenze la differenza rispetto a MI01 e MI02 risulta essere invece di circa 5 dB.

- **A307:** la stazione, dotata di sensore broad-band (si noti la forma della PDF per frequenze minori di 0.1 Hz), presenta una minore variazione giorno/notte dei livelli medi di rumore rispetto a quanto evidenziato dalle stazioni precedenti. Tuttavia, nella banda di frequenza 1-10 Hz le analisi mostrano livelli di rumore ambientale piuttosto elevati, paragonabili a quelli di MI03.

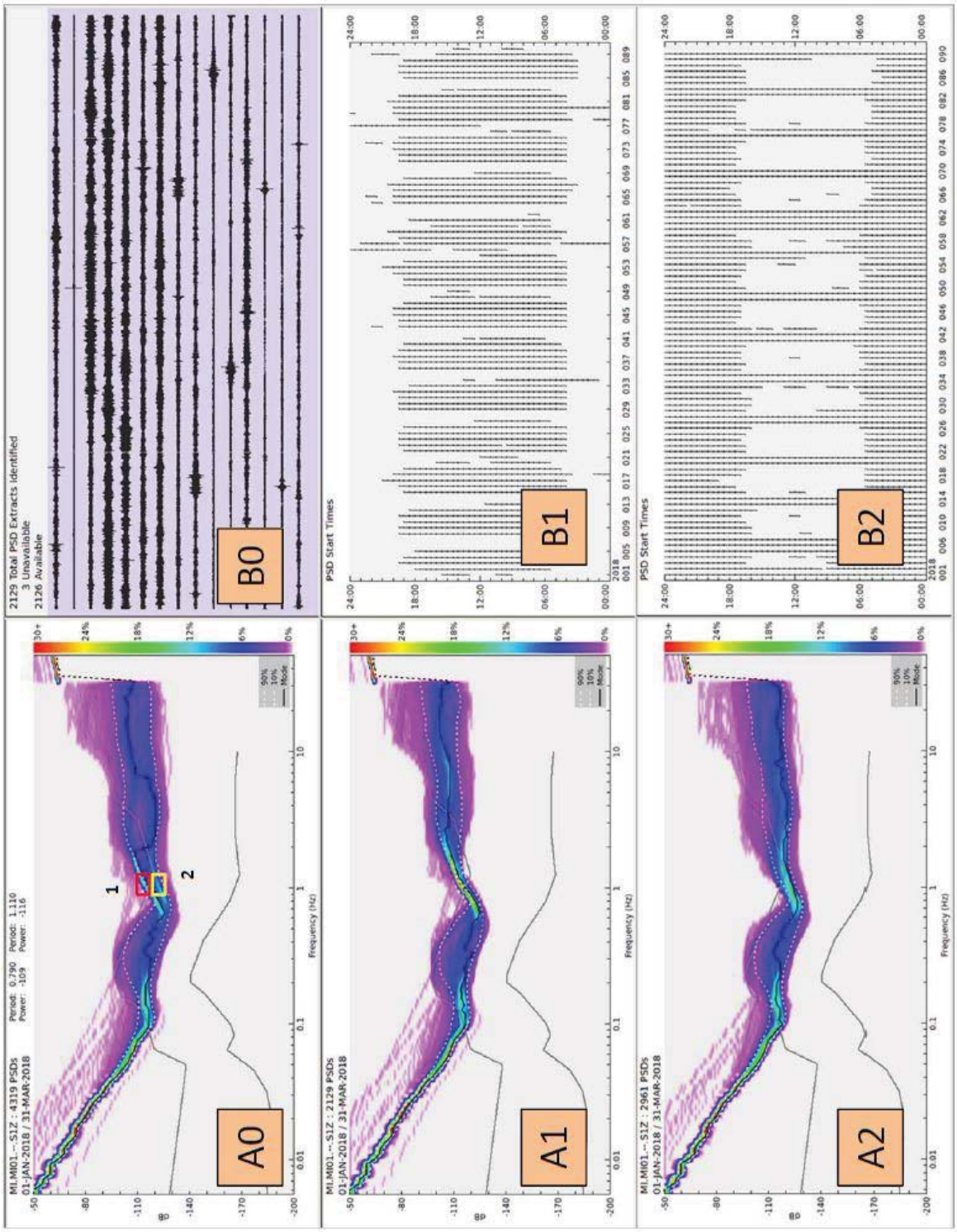

Fig. 21. Pannelli A0, A1 e A2: densità di probabilità (PDF) dello spettro di potenza (PSD) del rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 dalla stazione MI01 (componente verticale del moto). I valori spettrali, rappresentati in funzione del periodo, si riferiscono allo spettro 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. Pannello B0: serie temporali corrispondenti alla selezione 1 (box rosso riportato sul pannello A0). Gli intervalli orari corrispondenti alle selezioni 1 (box rosso – pannello A0) e 2 (box giallo – pannello A0) 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.

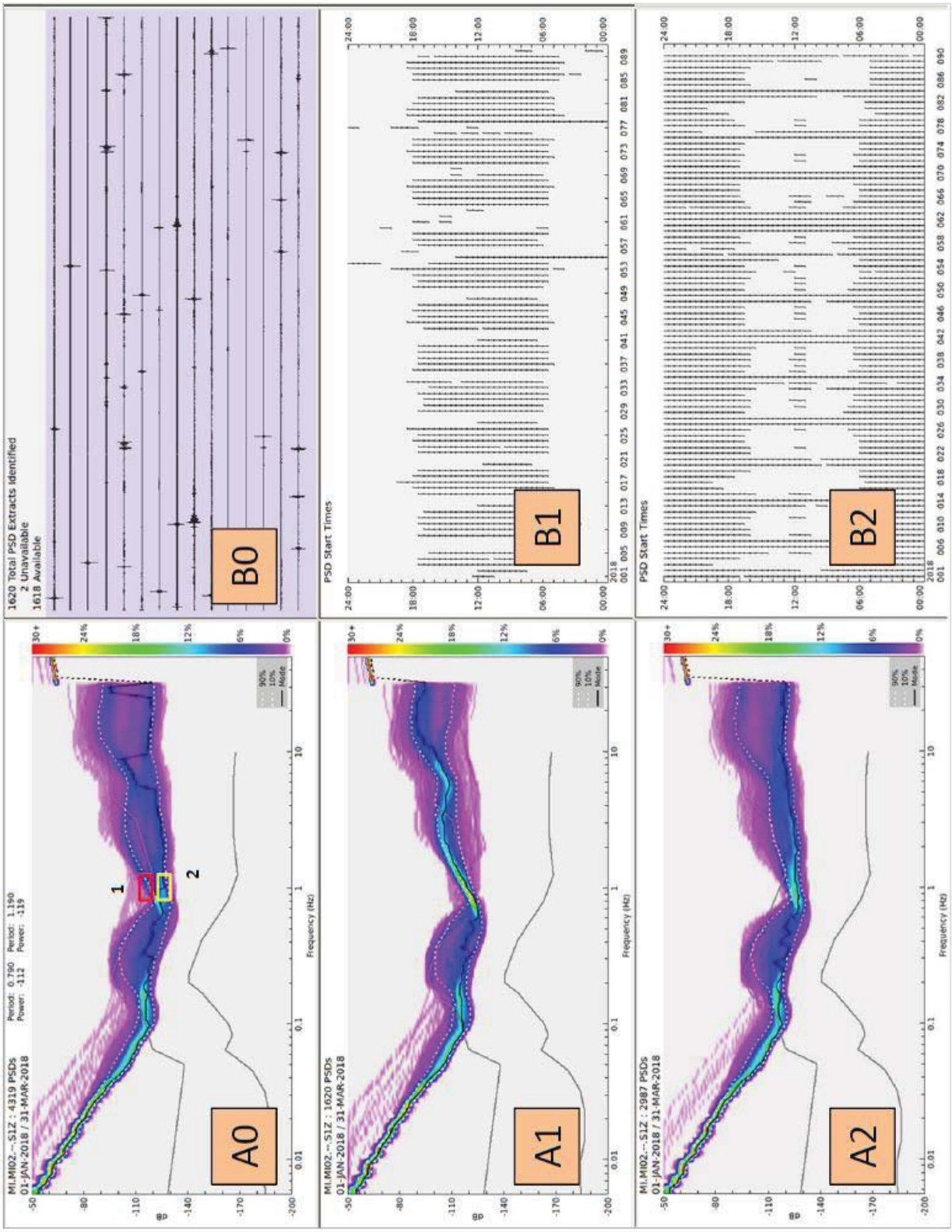

Fig. 22. Come in Fig. 21 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 dalla stazione MI02 (componente verticale del moto).

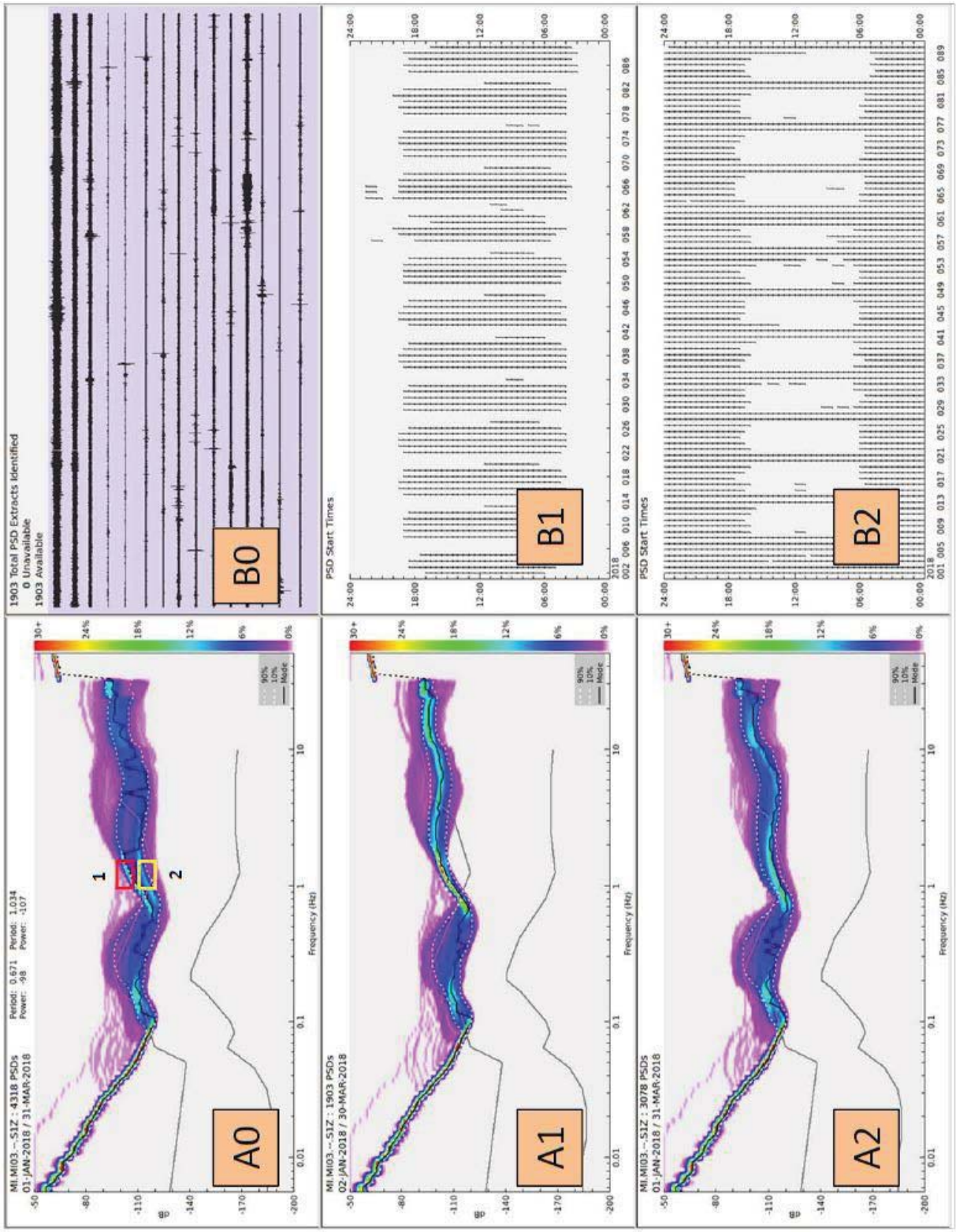

Fig. 23. Come in Fig. 21 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 dalla stazione MI03 (componente verticale del moto).

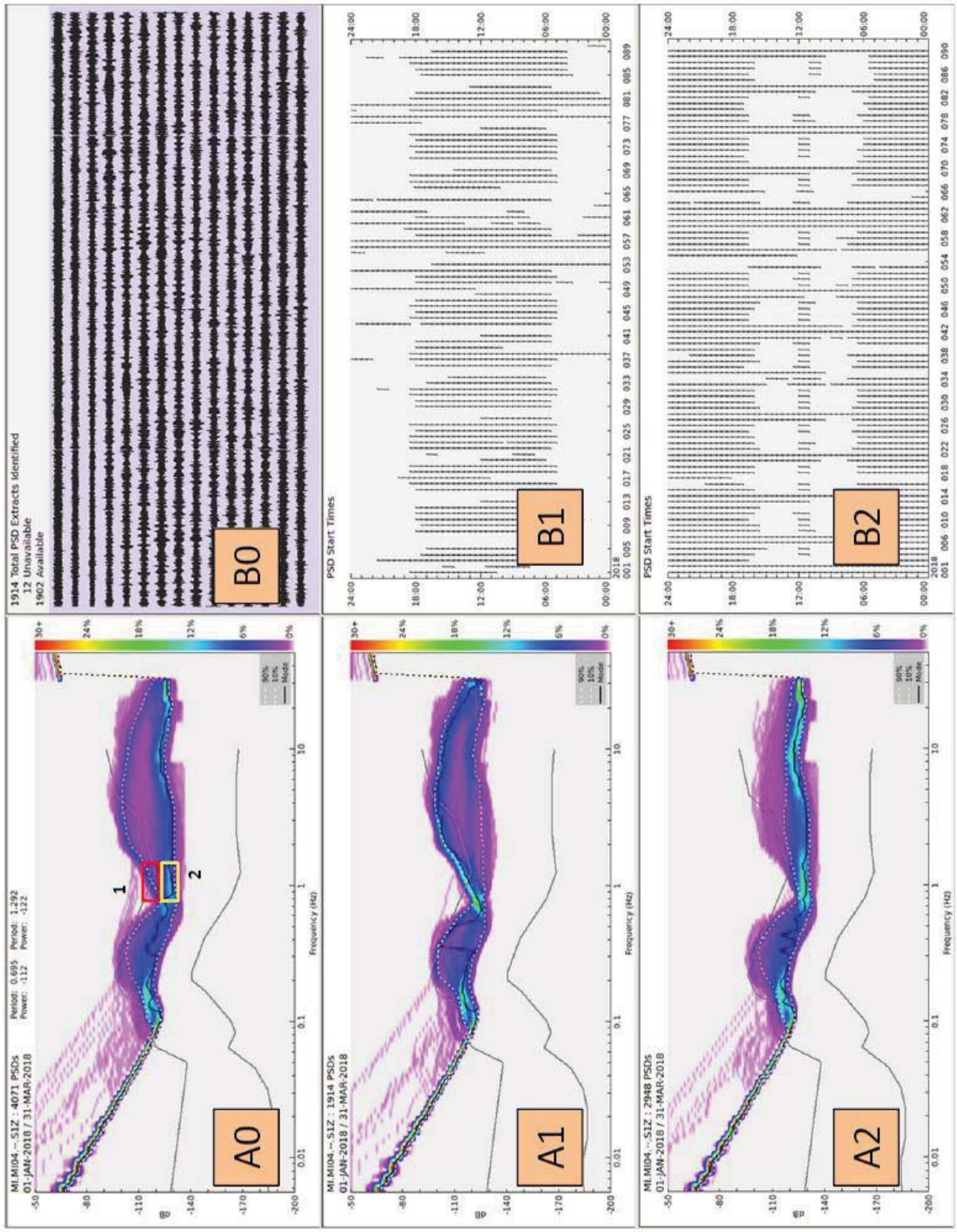

Fig. 24. Come in Fig. 21 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 dalla stazione MI04 (componente verticale del moto).

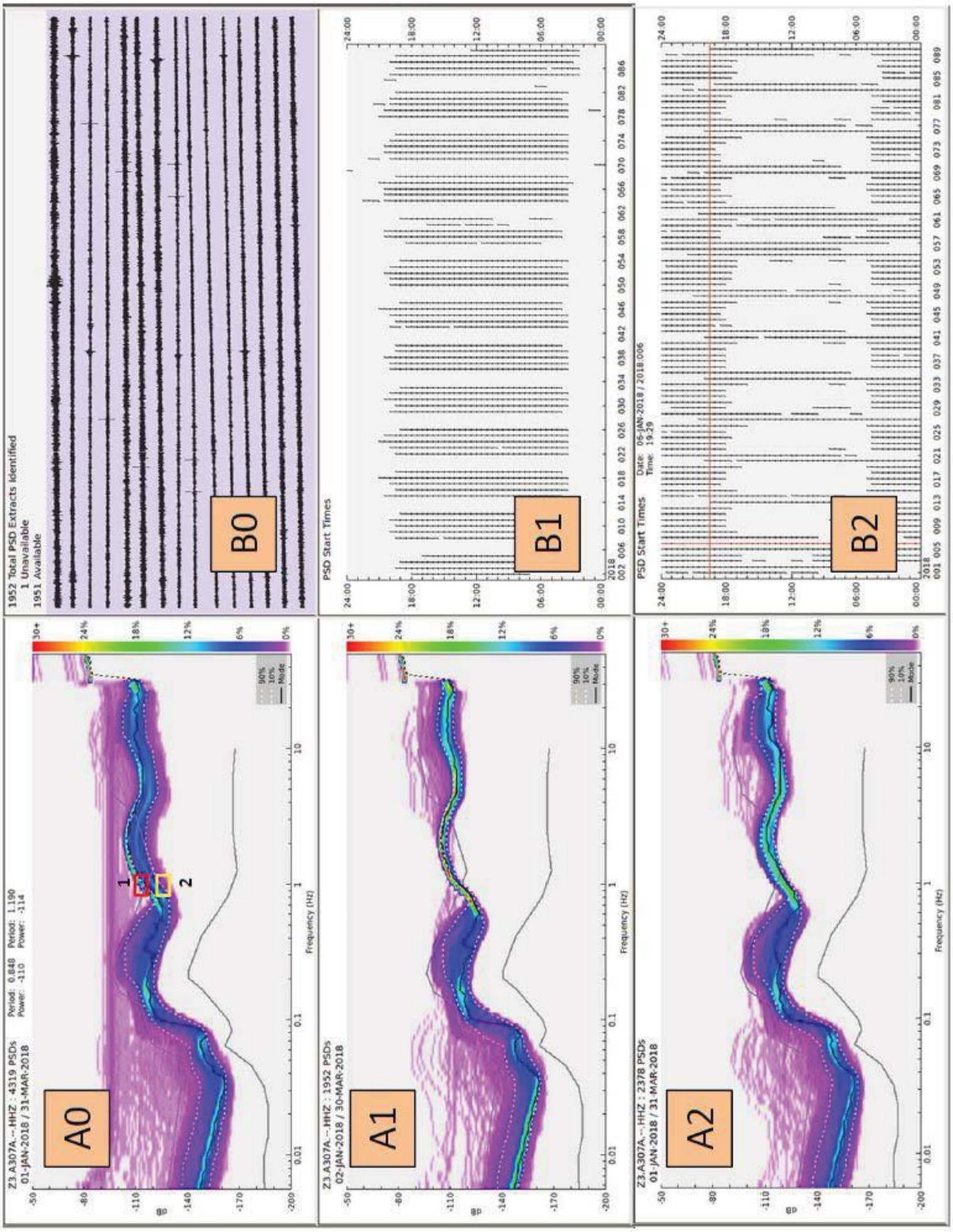

Fig. 25. Come in Fig. 21 per il rumore sismico ambientale registrato nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 dalla stazione A307A (componente verticale del moto).

6. Sismicità registrata

La micro-sismicità dell'area è stata monitorata utilizzando i segnali registrati dalla RSIMS nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 e acquisiti nel medesimo periodo presso INGV-MI. A tal fine è stata applicata una procedura di analisi che consiste in 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 convertiti nel formato SAC (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 1/1/2018 - 31/3/2018 della fase 1) della procedura di cui sopra, ha consentito l'individuazione di 347 eventi. L'applicazione della fase 2) ha quindi permesso di identificare come eventi sismici 41 di essi, mentre i rimanenti sono stati catalogati come segnali transienti causati da disturbi di natura antropica o rumore ambientale. Dei 41 eventi sismici riconosciuti, 34 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.6 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.6 - colonna 4). Il risultato finale della procedura consiste quindi nella suddivisione di tutti gli eventi sismici in 4 diverse classi (Tab.6 - 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.7, 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 ≤ R < 50) km ; primo arrivo P: MIxx	SI	1; 2; 3
		A2: (20 ≤ R < 50) km ; prima arrivo P: XXXX ≠ MIxx	NO	3
		A3: R ≥ 50 km	NO	3
	NO (B)	B0: primo arrivo P: MIxx; N < 4	NO	0
		B1: primo arrivo P: MIxx; N ≥ 4	SI	1; 2; 3
		B2: prima arrivo P: XXXX ≠ MIxx	NO	3

Tabella 6. Schema di classificazione degli eventi sismici registrati dalla RSIMS (vedi testo). Stazioni della RMMS: MIxx; 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 ≥ 4	Mixx	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 ≥ 4	Mixx	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 ≤ R < 50	N ≥ 4	Mixx	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 ≤ R < 50	N ≥ 4	Mixx	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 ≤ R < 50	N ≥ 4	Mixx	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 ≤ R < 50		XXXX ≠ Mixx	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 ≥ 50					A3	3
YYYYMMDDhhmmxx									N < 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B0	0
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	1
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	2
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm.ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	3
YYYYMMDDhhmmxx										XXXX ≠ Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B2	3

Tabella 7. Elenco delle possibili occorrenze derivanti dall'applicazione dei criteri di classificazione illustrati in Tab.6. 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.4); N: numero di coppie di fasi dirette P ed S, osservate alle stazioni della RSIMS; XXXX (MIxx): 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 1/3/2018-31/3/2018 sono riportati in Tab.8. Si tratta di 41 terremoti localizzati all'esterno del dominio esteso di rilevazione. 34 di essi sono presenti nel catalogo della RSN e sono caratterizzati da distanze ipocentrali maggiori di 40 km, e profondità generalmente comprese fra 7.0 e 40 km. Gli eventi più vicini sono localizzati in corrispondenza della catena appenninica e della pianura padana emiliana e, in un raggio di 50 km da Minerbio, sono presenti 11 eventi caratterizzati da $1.4 \leq M_L \leq 2.7$, dei quali 1 con profondità compresa fra 5 e 11 km e 10 con profondità maggiore di 11 km (Fig.26). Il più vicino ($M_L = 2.7$) è localizzato a 22 km di distanza epicentrale e a 35 km di profondità. Come di vede dalla Tab.8, i 7 eventi non contenuti nel catalogo nazionale sono stati classificati come eventi esterni al dominio esteso. 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 RMMS.

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		
20180104104747	2018-01-04 10:46:12.496000	42.6190	19.8865	10.1	5.2	mb	712	712					A3	3
20180104201352	2018-01-04 20:13:35.250000	44.3338	11.4977	28.1	1.9	ML	32	43	3	MTRZ	3.54	BRIS; MI02	A2	3
20180104201635	2018-01-04 20:16:29.090000	44.3078	11.5002	24.8	2.2	ML	35	43	7	MTRZ	4.47	BRIS; MI02	A2	3
20180107024533	2018-01-07 02:45:15.640000	44.1002	10.7957	13.6	2.4	ML	80	81					A3	3
20180110060353	2018-01-10 06:03:16.880000	44.6708	10.0452	8.5	2.4	ML	114	115					A3	3
20180110230353	2018-01-10 23:03:31.050000	44.6338	9.9083	8.6	2.7	ML	125	126					A3	3
20180111034856	2018-01-11 03:48:02.230000	42.6412	13.2900	8.1	3.2	Mw	264	264					A3	3
20180113203927	2018-01-13 20:39:14.590000	44.2980	11.4978	36.6	1.7	ML	36	51					A3	3
20180122113844	2018-01-22 11:38:13.560000	44.1663	12.2080	57.6	2.4	ML	76	96					A3	3
20180122193430									3	IMOL	4.50	BRIS; MTRZ	B2	3
20180122212758	2018-01-22 21:27:51.080000	44.3040	11.6492	28.4	1.5	ML	38	47	3	IMOL	3.32	BRIS; MTRZ	A2	3
20180131125326	2018-01-31 12:54:26.850000	44.2180	11.7238	19.1	1.4	ML	49	52					A3	3
20180131225140									6	BRIS	5.01	MI02; MI03	B2	3
20180201010240	2018-02-01 01:02:35.850000	44.6578	11.7662	35.1	2.7	ML	22	42	16	CMPO	5.00	MI02; MI04	A2	3
20180201014820	2018-02-01 01:47:32.660000	47.1813	9.9928	11.4	3.8	ML	307	307					A3	3
20180203125423	2018-02-03 12:53:11.689000	43.3178	16.8530	19.7	4.8	mb	453	453					A3	3
20180203131824	2018-02-03 13:18:11.600000	44.9960	11.6303	10.7	2.2	ML	43	44	4	FERS	3.02	SERM; MI04	A2	3
20180204185807	2018-02-04 18:57:43.170000	45.7017	10.5905	10.6	2.7	ML	140	140					A3	3
20180216122726	2018-02-16 12:27:11.420000	44.4320	11.1873	28.8	1.9	ML	32	43	3	ZCCA	4.80	MTRZ; BRIS	A2	3
20180218040830									1	A308A	2.63		B2	3
20180219192940	2018-02-19 19:29:28.680000	44.3738	11.1022	27.8	1.9	ML	41	50					A3	3
20180222043340	2018-02-22 04:33:25.040000	44.4120	10.3673	10.0	3.3	ML	92	93					A3	3
20180225081705	2018-02-25 08:16:29.300000	46.3763	12.5938	7.7	3.8	ML	213	213					A3	3
20180225155342	2018-02-25 15:53:04.860000	46.3812	12.5987	7.0	3.6	ML	214	214					A3	3
20180301215246	2018-03-01 21:52:24.040000	44.5223	10.2455	27.8	2.9	ML	99	103					A3	3
20180303201206									2	RAVA	2.61	CAVE	B2	3
20180304201652									6	FERS	3.13	A307A; MI01	B2	3
20180305215052	2018-03-05 21:50:35.890000	43.9293	11.9653	6.8	3.7	Mw	86	86					A3	3
20180307201644	2018-03-07 20:15:15.400000	39.3250	14.5012	379.0	4.4	ML	640	743					A3	3
20180323131224	2018-03-23 13:12:11.090000	44.7227	12.0028	12.5	2.4	ML	42	44	5	A308A	3.89	FERS; MI02	A2	3
20180324210231	2018-03-24 21:01:58.680000	44.0800	10.8223	11.7	2.4	ML	80	81					A3	3
20180326224343	2018-03-26 22:43:07.650000	43.0465	12.8827	8.0	3.2	Mw	208	208					A3	3
20180326231116	2018-03-26 23:10:50.100000	43.9807	11.8285	25.2	2.0	ML	76	80					A3	3
20180327171355									1	BRIS	3.22		B2	3
20180328033448	2018-03-28 03:34:33.730000	43.9777	11.8252	26.9	2.3	ML	77	81					A3	3
20180328073721	2018-03-28 07:36:52.520000	45.8768	11.8432	10.4	3.0	ML	142	143					A3	3
20180329163015	2018-03-29 16:31:10.060000	44.2725	11.7620	28.2	1.6	ML	45	53					A3	3
20180329163016									1	BRIS	3.29		B2	3
20180329230119	2018-03-29 23:00:42.950000	43.0272	11.5755	9.2	2.9	ML	178	178					A3	3
20180330001238	2018-03-30 00:11:29.070000	46.9078	11.2715	12.5	2.7	ML	255	255					A3	3
20180331011928	2018-03-31 01:18:44.440000	42.3528	13.4697	18.8	3.8	Mw	299	299					A3	3

Tabella 8. Eventi sismici registrati dalla RSIMS nel periodo 1/3/2018-31/3/2018 (cfr. didascalia di Tab.7 per la descrizione dei campi).

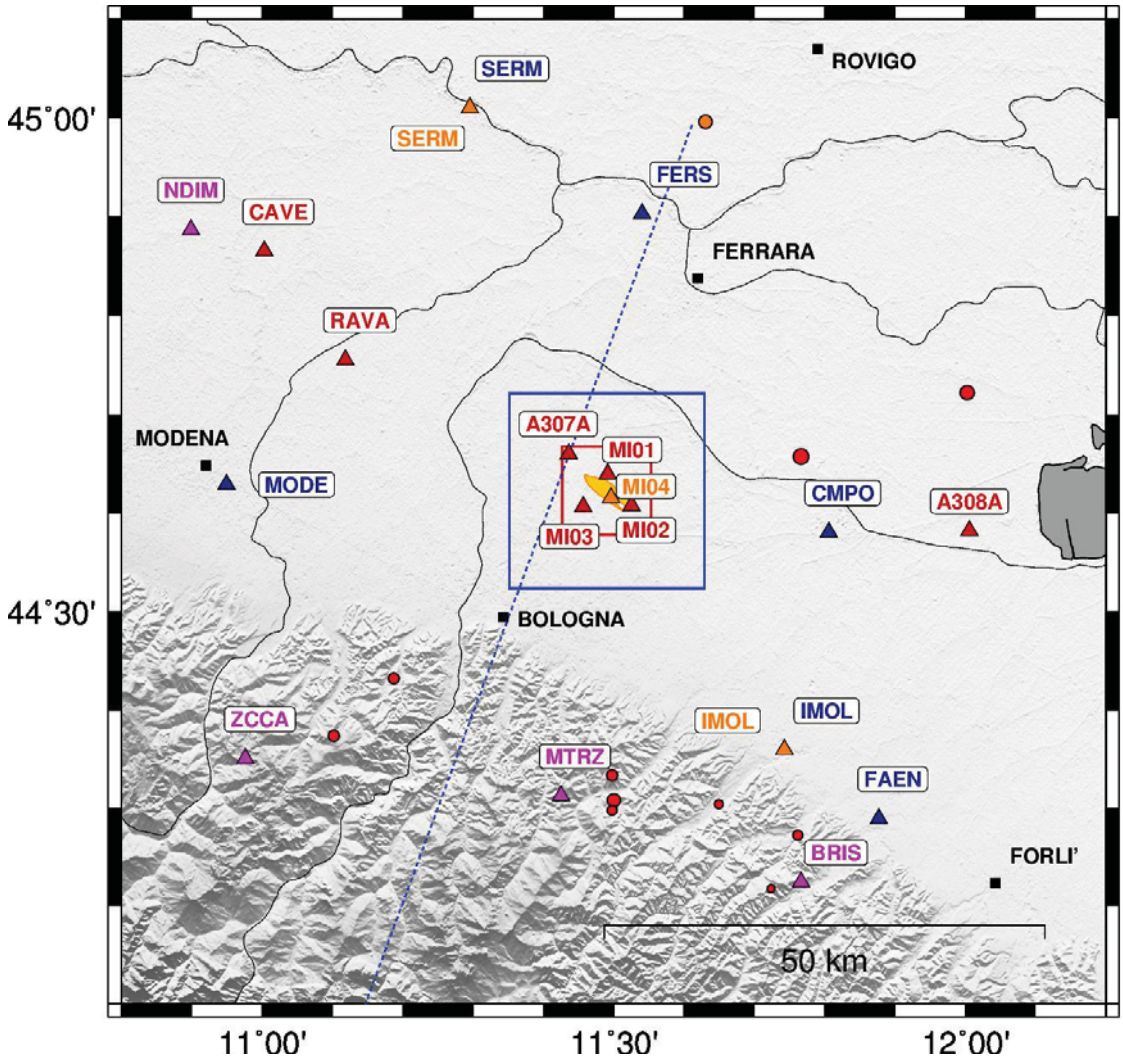

Figura 26. Eventi sismici localizzati registrati dalla RSIMS nel periodo 1/3/2018-31/3/2018. Vengono mostrati gli eventi con distanza epicentrale da Minerbio minore di 50 km. Cerchi rossi pieni: eventi con profondità maggiore di 11 km; cerchi rossi arancione: eventi con profondità compresa fra 5 e 11 km. I triangoli mostrano la posizione delle stazioni della RSIMS (cfr. didascalia di Fig. 6 per la descrizione della tipologia di sensore installato). 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).

7. Conclusioni

Le attività condotte da INGV-MI durante il primo trimestre 2018 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) Il monitoraggio della sismicità naturale e/o eventualmente indotta dalle attività di stoccaggio gas condotte nella concessione deve essere effettuato nei volumi DI e DE definiti nel rapporto: "Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). SPM - Monitoraggio Sismico – Anno di esercizio 2017 – Relazione N.01" (INGV-MI, 2017a) e aventi le dimensioni di (10 x 10 x 5) km^3 e (22 x 22 x 11) km^3 rispettivamente. DI e DE sono stati definiti considerando posizione e dimensioni del GWC del giacimento, situato alla profondità media di 1370 m e che si estende per 2 e 6 km nelle direzioni NE-SO e NO-SE rispettivamente.
2) Le indicazioni contenute negli ILG riguardanti l'integrazione della rete microsismica con le stazioni di eventuali reti regionali operanti nell'area (MiSE-DGS-UNMIG, 2018) possono essere applicate integrando le stazioni della RMMS con 12 stazioni della RSN (INGV-CNT, 2018a) e 2 stazioni del progetto AlpArray (INGV, 2016), installate fino ad una distanza massima da Minerbio di circa 55 km (cfr. Tab.2). L'integrazione delle forme d'onda registrate dalla rete integrata (RSIMS) in un unico archivio di dati (in formato miniSEED) costituito presso INGV-MI può essere realizzata mediante il software Seedlink (IRIS, 2018a), che consente l'acquisizione in tempo reale delle tracce registrate da tutte le stazioni. Le tracce provenienti dalle stazioni della RSN e di AlpArray confluiscono in tempo reale presso INGV-MI a partire da Marzo 2017 mentre le tracce registrate dalle stazioni della RMMS vengono acquisite in tempo reale a partire da Marzo 2018. L'archivio delle forme d'onda di tutte le stazioni della RSIMS è stato quindi completato mediante il trasferimento dei dati registrati prima della realizzazione del collegamento in tempo reale. A tal fine, sono stati effettuati il download dei dati della RSN e delle stazioni AlpArray, relativi al periodo Maggio 2015 - Febbraio 2017 e, ad opera del Concessionario, il trasferimento manuale presso INGV-MI dei dati della RMMS corrispondenti al periodo Maggio 2015 – Febbraio 2018.
3) Nelle analisi di detezione, condotte utilizzando la procedura descritta nel rapporto: "Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). SPM - Monitoraggio Sismico – Anno di esercizio 2017 – Relazione N.01" (INGV-MI, 2017a), sono state ipotizzate due diverse condizioni di rumore sismico ambientale (cfr. Tab.4). In condizioni sfavorevoli di rumore ambientale, assunte corrispondenti al 90° percentile della PDF complessiva del PSD di rumore ambientale osservato, la rete operativa fino a Marzo 2018 (RO: comprendente 4 stazioni in superficie e 1 in pozzetto) consente di localizzare con buona precisione eventi sismici fino a magnitudo 1.0 in corrispondenza del *reservoir* e fino a magnitudo 1.3 alla base del Dominio Interno (cfr. Tab.6). A parità di livello di rumore, e richiedendo una minor precisione nella localizzazione degli eventi, è possibile ottenere anche in DE un intervallo simile di soglie di localizzazione, cioè 1.1 alla profondità del *reservoir* e 1.3 alla base del Dominio Esteso (cfr. Tab.5). Con la rete microsismica inizialmente pianificata dal Concessionario (RP2017: comprendente 7 stazioni in superficie e 5 in pozzetto) nelle stesse condizioni di rumore di cui sopra si possono localizzare con buona precisione eventi sismici fino a magnitudo 0.8 in corrispondenza del *reservoir* e fino a magnitudo 0.9 alla base del Dominio Interno (cfr. Tab.5). Le analisi di detezione mostrano che in tale dominio gli stessi livelli di detezione possono essere raggiunti anche con la rete installata a partire da Marzo 2018 (RP2018: comprendente 4 stazioni in superficie e 4 in pozzetto). Nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI, la RP2018 risulta leggermente meno sensibile della RP2017, con differenze di soglie di localizzazione che generalmente risultano essere intorno al decimo di grado di magnitudo M_L. Si tratta di differenze trascurabili che ricadono nell'intervallo di incertezza delle stime di questo parametro, generalmente pari a 0.2 – 0.3 gradi. L'analisi della distribuzione areale dei valori di soglia mostra che la mancata installazione di alcune stazioni modifica la distribuzione areale della sensibilità della rete, aumentando leggermente la soglia di localizzazione ad Est e a Sud del *reservoir*, senza tuttavia compromettere la sensibilità media della rete.

4) La verifica dei livelli di rumore sismico ambientale registrato dalle stazioni della rete nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 è stata effettuata mediante il software PQLX (USGS, 2018), che consente di calcolare le *Probabity Density Functions* (PDF) dello spettro di potenza (PSD) del segnale registrato in diversi periodi di funzionamento della rete. Le analisi confermano l'elevato rumorosità dell'area di monitoraggio. Le stazioni MI01 e MI02 mostrano valori di PSD paragonabili a quelli delle curve di riferimento High Noise Model di Peterson (1993) mentre la MI03 si rivela più rumorosa, con livelli di PSD superiori di circa 10 dB. La MI04, installata in pozzetto a 100 m di profondità, è caratterizzata invece da livelli di rumore più contenuti, mediamente circa 10 dB al di sotto delle curve ottenute in superficie nella banda di frequenza 1-20 Hz. Nella medesima banda di frequenze anche la variazione giorno/notte si attesta mediamente attorno a circa 10 dB.
5) L'analisi della sismicità registrata nel periodo 1/1/2018 – 31/3/2018 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 347 eventi. 41 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 (34 eventi) e terremoti non inclusi nel medesimo (cfr.Tab.6). 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.6) ha permesso di procedere alla eventuale rilocalizzazione degli eventi sismici riconosciuti e conseguentemente alla loro eventuale collocazione nei domini di rilevamento. In definitiva, i 41 eventi registrati nel primo trimestre 2018 sono stati così suddivisi:
   - 27 eventi inclusi nel catalogo della RSN caratterizzati da $R \geq 50$ km e quindi esterni a DE;
   - 7 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;
   - 8 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.

   Gli eventi inclusi nel catalogo della RSN sono caratterizzati da distanze ipocentrali maggiori di 40 km, e profondità generalmente comprese fra 7.0 e 40 km. Gli eventi più vicini sono localizzati in corrispondenza della catena appenninica e della pianura padana emiliana e, in un raggio di 50 km da Minerbio si trovano 11 eventi caratterizzati da $1.4 \leq M_L \leq 2.7$ dei quali 1 con profondità compresa fra 5 e 11 km e 10 con profondità maggiore di 11 km (Fig.26). Il più vicino ($M_L = 2.7$) è localizzato a 22 km di distanza epicentrale e a 35 km di profondità.

   Come di vede dalla Tab.6, nel caso di un evento ritenuto localizzabile la procedura di classificazione adottata produce eventi appartenenti a DI (classe 1); appartenenti alla parte di DE non inclusa in DI (classe 2) o esterni a DE (classe 3). Nel primo trimestre 2018 tutti gli eventi registrati sono risultati di classe 3 e quindi esterni ai domini di rilevazione definiti nell'ambito del Protocollo Operativo.

Bibliografia

AlpArray (2016). The AlpArray initiative, http://www.alparray.ethz.ch/home/

Anderson J.G., Hough S. (1984). A model for the shape of Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bull. Seism. Soc. Am.,* 74, 1969-1994.

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.

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

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

Carannante S., Argnani A., Massa M., D'Alema E., Lovati S., Moretti M, Cattaneo M., Augliera P. (2015). The May 20 (MW 6.1) and 29 (MW 6.0), 2012, Emilia (Po Plain, northern Italy) earthquakes: New seismotectonic implications from subsurface geology and high-quality hypocenter location, *Tectonophysics*, 655, 107-123, https://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.05.015

Carannante S., D'Alema E., Lovati S., Massa M., Augliera P., Franceschina G. (2016).Feasibily study for the microseismic monitoring of the natural gas reservoir of "Sant'Alberto" (Po Plain, Italy), *Annals of Geophysics,* 60(2), S0217, doi: 10.4401/ag-7111

Castro R.R., Pacor F., Puglia R., Ameri G., Letort J., Massa M., Luzi L. (2013). The 2012 May 20 and 29, Emilia earthquakes (Northen Italy) and the main aftershocks: S-wave attenuation, acceleration source functions and site effects, *Geophys. J. Int.,* 195(1), 597-611, doi: 10.1093/gji/ggt245.

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.

Earthworm Central (2016). Earthworm, http://www.earthwormcentral.org/

Franceschina G., Augliera P., Lovati S., Massa M. (2015). Surface seismic monitoring of a natural gas storage reservoir in the Po Plain (Northern Italy), *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata,* 56(4), 489-504, doi: 10.4430/bgta0165.

Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M. (2013). Late Miocene–Middle Pleistocene sequences in the Po Plain–Northern Adriatic Sea (Italy): The stratigraphic record of modification phases affecting a complex foreland basin, *Marine and Petroleum Geology*, *42*, 50-81.

Hanks T.C., Boore D.M. (1984). Moment-magnitude relations in theory and practice. *J. Geophysical Res.*, 89, 6229-6235.

Husen S., Hardebeck J.L. (2010). Earthquake location accuracy, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, doi: 10.5078/corssa-55815573, http://www.corssa.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-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, 41 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 (2017c). 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/

IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology (2018c). Software Downloads, http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/software/downloads/sac/

Lay T., Wallace T.C. (1995). Modern global seismology, *International Geophysics Series*, *58*, Academic Press, San Diego (USA), 521 pp.

McNamara D.E., 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, 30pp.

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

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 (2018). Verifica della sperimentazione degli ILG nella Concessione Minerbio Stoccaggio, Verbale di Riunione (MiSE-DGS-UNMIG Sezione di Bologna, RER, Stogit S.p.A., INGV, Comune di Minerbio, Assomineraria), 27 Febbraio 2018, Bologna.

Peterson (1993). Observation and modelling of seismic background noise, *U.S.G.S. Tech. Rept.*, 93-322, 1-95.

POLITO-DITAG, Politecnico di Torino – Ingegneria del Territorio dell'Ambiente e delle Geotecnologie (2011). Studio di Impatto Ambientale – Allegato B. Campo di Minerbio - Pool C, modello statico a scala regionale e modello geomeccanico, http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77428; http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77429

POLITO-DITAG, Politecnico di Torino – Ingegneria del Territorio dell'Ambiente e delle Geotecnologie (2012). Studio di Impatto Ambientale – Allegato A. Campo di Minerbio. Modello statico ed analisi del comportamento dinamico per l'ottimizzazione della gestione operativa del livello di stoccaggio Pool C, http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77424; http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77425; http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77426; http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77427

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-attivita-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

Schorlemmer D, Mele F., Marzocchi W. (2010). A completeness analysis of the National Seismic Network of Italy, *J. Geophys. Res.*, 115, B04308, doi: 10.1029/2008JB006097.

STOGIT (2012). Studio di Impatto Ambientale – Allegato E. Concessione Minerbio Stoccaggio – Progetto Minerbio P > Pi – Management Summary, http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77435; http://www.va.minambiente.it/File/Documento/77436

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