

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 2017
Relazione N. 01



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Sezione di Milano

Via Corti, 12 – 20133 Milano

Milano, Maggio 2017

Concessione di stoccaggio di gas naturale
“Minerbio stoccaggio” (BO)
SPM - Monitoraggio sismico - Anno di esercizio 2017
Relazione N. 01

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 2017

INDICE

1. Introduzione	3
2. Inquadramento geologico strutturale e definizione dei domini di rilevazione	5
3. Monitoraggio microsismico	10
4. Rete di monitoraggio sismico integrata	16
Sistema di acquisizione.....	16
Analisi di rumore sismico ambientale	18
5. Analisi di detezione.....	21
Metodo	21
Risultati	27
6. Conclusioni.....	42
Bibliografia	44

1. Introduzione

La concessione di stoccaggio di gas naturale “Minerbio Stoccaggio”, con istanza di concessione conferita dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) a STOGIT S.p.A. in data 1/1/1997, interessa un’area di 68.61 km² situata in provincia di Bologna (MiSE-DGS-UNMIG, 2017). Il 65% dell’area della concessione viene a trovarsi nel territorio comunale di Minerbio mentre la restante parte è suddivisa tra i comuni di Malalbergo, Bentivoglio, Granarolo dell’Emilia, Budrio e Baricella. La concessione è ubicata circa 18 km a nord-est di Bologna e viene a trovarsi in una zona caratterizzata da intensa attività antropica, legata sia ad attività produttive che alla presenza di importanti vie di comunicazione (l’autostrada Bologna-Padova (A13) affianca l’area della concessione mentre la strada statale SS64 la attraversa). 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 con la perforazione di 36 pozzi, di cui 24 produttivi 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 F.ne 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 km² la cui superficie è situata per circa l’80% nel comune di Minerbio (Fig. 1).

In data 8/1/2013, STOGIT S.p.A. (da qui in poi denominato “Concessionario”), ha avviato presso il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) una procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) per “Ampliamento capacità di stoccaggio mediante incremento della pressione massima di esercizio (p_{max}) oltre la pressione statica (p_i) di fondo originaria del giacimento ($p_{max} = 1,07p_i$)” (MATTM, 2013). La procedura è stata avviata a seguito della realizzazione di un progetto di fattibilità, condotto dal Concessionario, comprendente una serie di studi e di interventi operativi, finalizzati alla raccolta dei dati per una accurata descrizione delle principali caratteristiche del giacimento: acquisizione di un rilievo sismico 3D per la caratterizzazione complessiva del giacimento (geometria, assetto strutturale), perforazione di un pozzo geognostico dedicato (prelievo di carote di fondo, log geofisici, misure geomeccaniche in situ), studi per la caratterizzazione petrofisica e geomeccanica della formazione argillosa di copertura, valutazione dell’integrità dei pozzi e delle facilities di superficie. I risultati dello studio geologico-strutturale dettagliato del campo, le analisi delle carote per la caratterizzazione della formazione argillosa di copertura, il conseguente studio di modellizzazione geomeccanica del giacimento e i risultati di un periodo di esercizio di sperimentazione in sovrappressione autorizzato dal MiSE, hanno assicurato la possibilità tecnica di raggiungere nel giacimento di Minerbio, in condizioni di totale sicurezza, un incremento di pressione statica di giacimento fino al 107% della pressione di scoperta (STOGIT, 2012).

Acquisito il parere positivo della Commissione Tecnica di Verifica dell’Impatto Ambientale, del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, e della Regione Emilia Romagna (RER), in data 14/3/2017 è stata decretata la compatibilità ambientale del progetto, subordinatamente al rispetto di una serie di prescrizioni (MATTM, 2017). In particolare, le prescrizioni indicate da RER richiedono la realizzazione di attività di monitoraggio da svolgere in accordo con quanto definito nel “Protocollo Operativo – Attività di Sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione *Minerbio Stoccaggio*”, sottoscritto da MiSE, RER e Concessionario in data 5/5/2016, che individua l’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) come Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) (RER, 2016a).

L’individuazione delle SPM per le attività antropiche di sottosuolo è stata prevista dal MiSE nel documento “Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell’ambito delle attività antropiche” (da qui in poi denominati “ILG”) che prescrive appunto un’attività di sperimentazione sia per le attività antropiche che prevedono la re-iniezione in sottterraneo dei fluidi di strato separati dagli idrocarburi prodotti, sia per lo stoccaggio di gas naturale in sottterraneo (MiSE-DGS-UNMIG, 2014). Per quanto riguarda il monitoraggio della sismicità, gli ILG introducono due

distinti volumi crostali di rilevazione: il Dominio Interno (DI) e il Dominio Esteso (DE). DI definisce il volume crostale all'interno del quale si ritiene possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta. Esso rappresenta perciò il volume di riferimento per il quale l'eventuale sismicità deve essere monitorata e analizzata con la massima sensibilità. DE viene introdotto invece allo scopo di contestualizzare i fenomeni di sismicità monitorati. Per le attività di stoccaggio, DI comprende la zona mineralizzata e una ulteriore fascia nell'intorno del giacimento fino ad una distanza di 2-3 km, in funzione dell'estensione del giacimento stesso. DE si deve estendere invece oltre DI per una fascia di ampiezza compresa tra 5 e 10 km, a seconda delle dimensioni del giacimento.

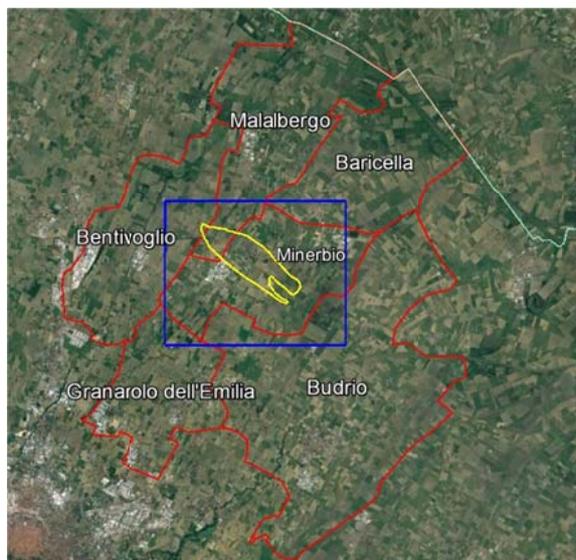


Figura 1. Concessione di stoccaggio di gas naturale “Minerbio Stoccaggio” (rettangolo blu) e proiezione in superficie del contatto gas-acqua (GWC) originario del *reservoir* (linea gialla). Il contatto GWC è localizzato a 1370 m di profondità e corrisponde ad un’area di circa 8 km². Vengono mostrati 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.

Il protocollo sottoscritto da MiSE, RER e Concessionario (RER, 2016a) si propone di: 1) applicare in via sperimentale gli ILG alla concessione “Minerbio stoccaggio”, quale caso pilota, al fine della loro prova in campo, regolando l’adeguamento e l’eventuale potenziamento della rete di monitoraggio esistente e disciplinando la conduzione dei monitoraggi; 2) condurre per almeno un anno il monitoraggio con la rete rispondente ai criteri indicati nelle linee guida allo scopo di definire le caratteristiche sismo-tettoniche dell’area; 3) fornire gli elementi necessari per un eventuale aggiornamento degli ILG in base all’esperienza acquisita, così come previsto dagli ILG stessi (RER, 2016b). Le fasi della sperimentazione prevedono: 1) la verifica delle reti di monitoraggio esistenti; 2) la programmazione dell’eventuale implementazione e potenziamento progressivo delle reti di monitoraggio, in base ai criteri degli ILG, con un approccio graduale e sulla base dei risultati sperimentali che verranno acquisiti; 3) la trasmissione diretta dei dati rilevati dalle reti di monitoraggio; 4) l’elaborazione ed interpretazione dei dati acquisiti durante il monitoraggio e dei dati di produzione e stoccaggio, geologici e di sottosuolo forniti dal Concessionario, unitamente ai risultati dei monitoraggi fin qui condotti dal Concessionario stesso.

Nella presente relazione vengono descritte le analisi condotte da INGV durante la fase di avvio dell’attività di sperimentazione. In particolare, a partire dall’inquadramento geologico-strutturale del giacimento di stoccaggio, vengono definiti i domini di rilevazione DI e DE, viene effettuata una prima analisi dei risultati dei monitoraggi fin qui condotti dal Concessionario, viene descritta la rete sismica di monitoraggio integrata (costituita dalla rete microsismica esistente, integrata con le stazioni della rete sismica nazionale) e viene presentata un’analisi preliminare di detezione per rete sismica esistente e per la rete sismica pianificata dal Concessionario. Quest’ultima sarà implementata nel corso dell’attività di sperimentazione degli ILG. In particolare, in questa relazione viene illustrato il sistema di acquisizione dati mentre il sistema di riconoscimento automatico degli eventi per l’analisi in tempo reale della sismicità, attualmente in fase di sperimentazione presso il centro di acquisizione dati INGV-MI (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Milano), sarà oggetto del prossimo rapporto.

2. Inquadramento geologico strutturale e definizione dei domini di rilevazione

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. In quest'area, attraverso una serie di fasi tettoniche successive, la collisione tra la placca Europea e la microplacca Adria e la conseguente evoluzione del bacino di avanfossa (Foreland basin) dell'Appennino settentrionale, hanno portato ad una graduale migrazione verso l'esterno della catena Appenninica a "pieghe e faglie" e allo sviluppo di depositi di accrezione asimmetrici. Dal Messiniano fino ad oggi, l'avanfossa appenninica può essere divisa in grandi e indipendenti depocentri strutturali, in corrispondenza dei quali la sedimentazione delle unità terrigene plio-quadernarie può raggiungere spessori rilevanti (fino a diverse migliaia di metri). Il depocentro della Pianura Padana - Avanfossa Adriatica, al quale appartiene l'area del serbatoio di Minerbio, è caratterizzato da spesse successioni di depositi torbiditici del Messiniano, Pliocene e Pleistocene (Ghielmi *et al.*, 2013). Questa regione ha subito anche una forte attività tettonica che, durante gran parte del Pliocene, ha portato alla deformazione, sollevamento, inclinazione e fagliazione dell'area che ospita il *reservoir*. Durante lo stesso periodo (Pliocene inferiore) stava continuando la deposizione dei sedimenti torbiditici, con la genesi delle formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi su gran parte dell'avanfossa. Successivamente, durante il Pliocene superiore - Pleistocene, un altro evento tettonico ha portato alla completa strutturazione della catena a "pieghe e faglie" di Ferrara e al sollevamento e al *tilt* dell'attuale zona di Bologna (Ghielmi *et al.*, 2013). La Fig. 2, estratta dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, mostra lo schema tettonico dell'area mentre in Fig. 3 viene illustrata la sezione C-C' che affianca il lato ovest della concessione (Boccaletti *et al.*, 2004).

La struttura che ospita il giacimento rappresenta la parte nord-occidentale di un'anticlinale fortemente asimmetrica allungata in direzione NW-SE, delimitata a NE da faglie inverse nord-vergenti (*thrust* di Selva-Minerbio) con dimensioni più o meno rilevanti, che creano notevoli dislocamenti verticali (fino a centinaia di metri) degli strati più profondi, probabilmente a seguito dell'evento tettonico del Pliocene superiore - Pleistocene. La chiusura mineraria della struttura è legata ad una trappola di tipo misto (stratigrafico-strutturale), nella quale gli elementi stratigrafici (geometrie lenticolari dei livelli sabbiosi con progressiva chiusura stratigrafica) si combinano alle strutture tettoniche plastiche (anticlinali asimmetriche) e rigide (faglie marginali nord-orientali) di cui sopra (POLITO-DITAG, 2011). In particolare, la copertura del giacimento è garantita dalla *facies* argilloso-siltosa del membro superiore della F.ne 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. Il giacimento, mineralizzato a gas, è composto da diversi livelli sabbiosi isolati compresi nella F.ne di Porto Garibaldi (livelli C, D ed E) e nelle Argille del Santerno inferiore (livello F), interposte tra la F.ne di Porto Garibaldi e la F.ne Porto Corsini. Nelle coperture sono presenti altri corpi sabbiosi mineralizzati a gas, noti come livelli PLQ1, A1, A2 e B. In Tab.1 viene riportata schematicamente la successione stratigrafica attraversata dai pozzi del campo (POLITO-DITAG, 2011).

Il *reservoir* principale del campo di Minerbio è rappresentato dal *Pool C*, un corpo sedimentario composto da più sequenze sabbiose di genesi torbiditica, caratterizzate dalla presenza di livelli argillosi di spessori variabili (F.ne Porto Garibaldi) che si sedimentarono tra il Pliocene medio ed il Pliocene superiore su un alto strutturale (Argille del Santerno inferiore). Il *Pool C* comprende 4 corpi sabbiosi principali, indicati come livelli C1, C2, C3, C3-1. Un quinto livello poroso (C3-2) è presente nella zona basale del *pool*, ma risulta in acqua. Interposti ai livelli principali vi sono 3 *layers* argillosi, correlabili su tutto il campo. 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. 4 vengono mostrate la topografia del livello sommitale del *Pool C* (F.ne Porto Garibaldi – top strutturale) e una sezione in direzione EW del giacimento (STOGIT, 2012).

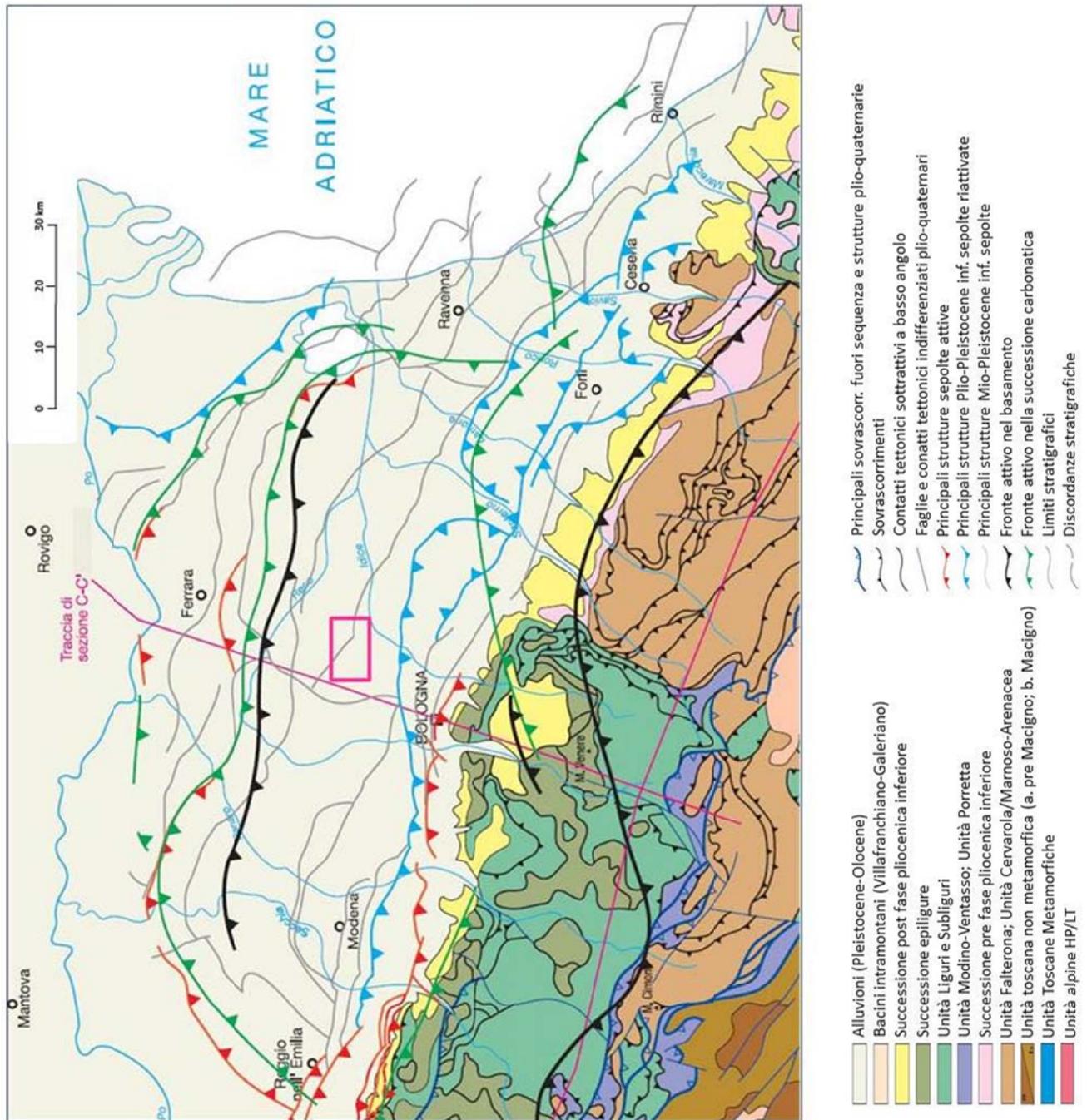


Figura 2. Impostazione strutturale nell'intorno della concessione "Minerbio Stocaggio" (rettangolo viola). Viene indicata la traccia della sezione C-C' mostrata in Fig.3 (modificata da Boccaletti *et al.*, 2004).

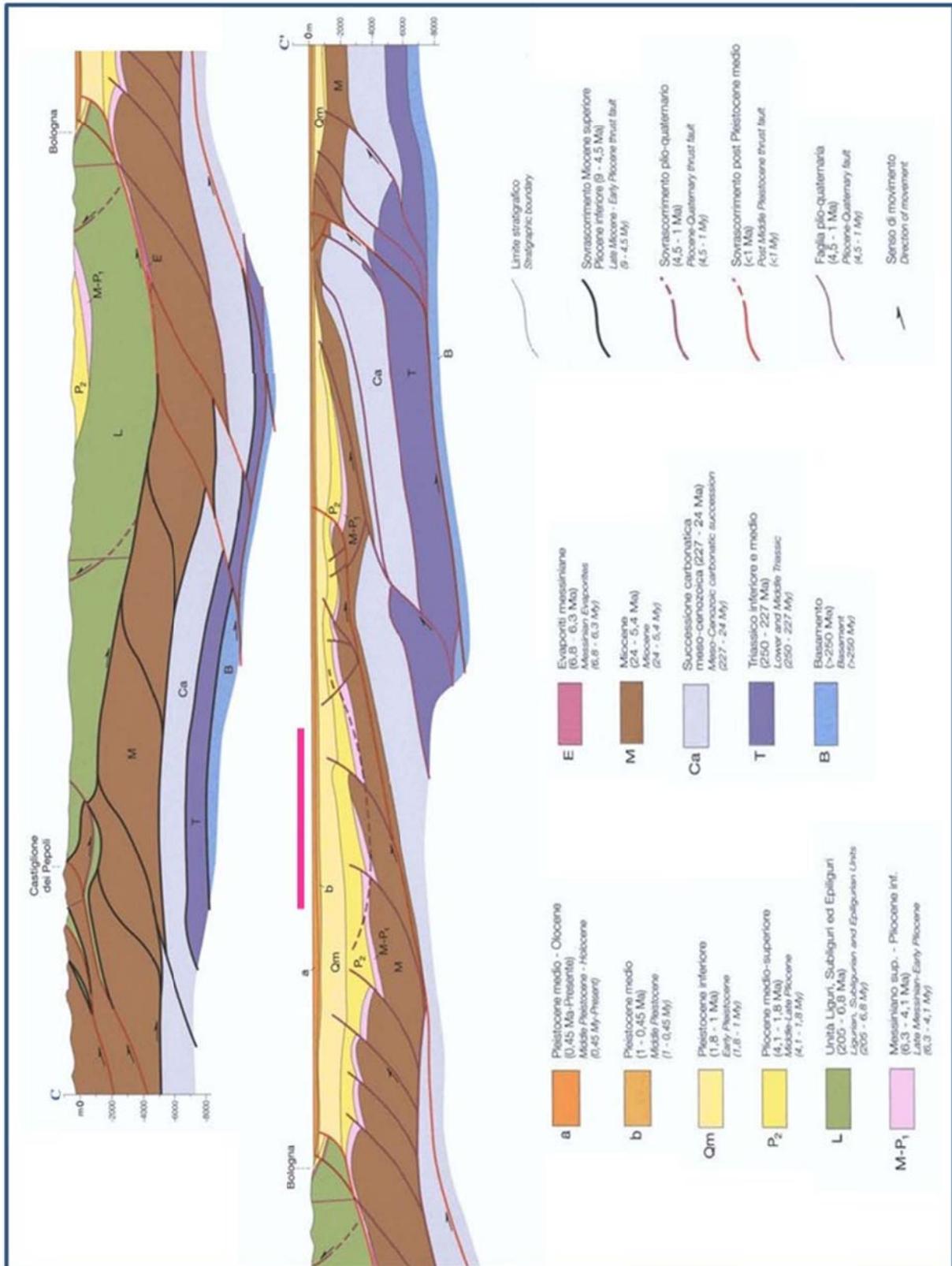
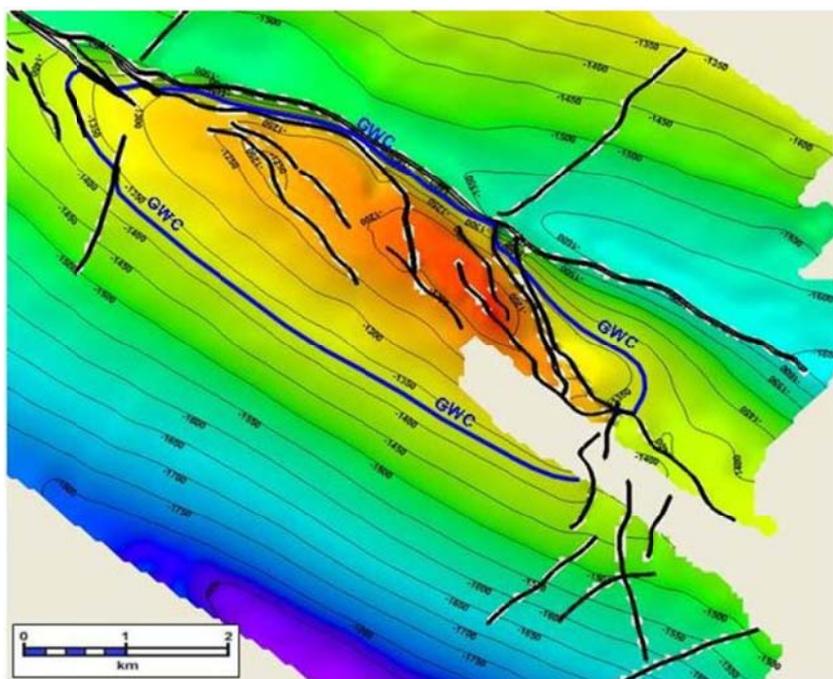


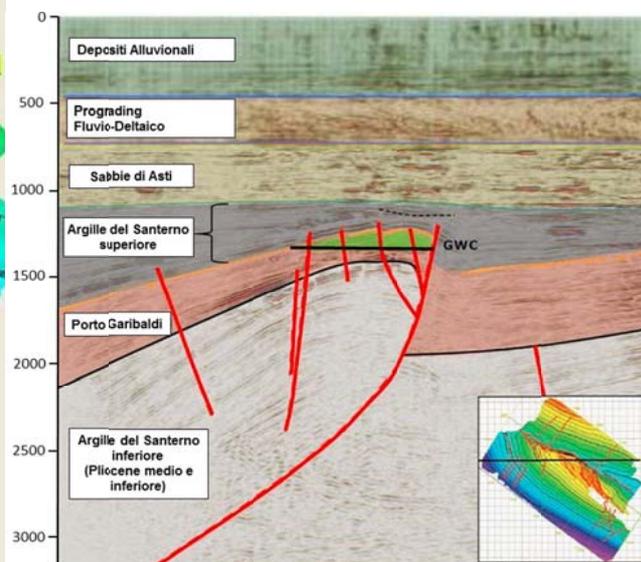
Figura 3. Linea C-C' del lavoro di Boccaletti *et al.* (2004), sulla quale è stata evidenziata la posizione della concessione "Minerbio Stocaggio" (linea viola) (cfr. Fig.2).

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	acqua	
			C3-2	gas	POOL D, E
C3-3					
C3-4					
C3-5					
Pliocene inferiore	Argille del Santerno (Inf.)	100	gas	POOL F	
	Fm. Porto Corsini	>150	<i>unconformity</i>		
Messiniano	Fm. Fusignano				

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



(a)



(b)

Figura 4. (a) mappa del top strutturale del giacimento di Minerbio; (b) sezione tettono-stratigrafica in direzione EW della struttura che ospita il giacimento (modificate da POLITO-DITAG, 2012).

In accordo con le prescrizioni contenute negli ILG, la definizione dei domini di rilevazione interno ed esteso, DI e DE rispettivamente, viene stabilita a partire dalla profondità e dall'estensione areale del GWC. Le dimensioni lineari della superficie interna alla linea GWC sono di circa 2 e 6 km nelle direzioni NE-SW e NW-SE, rispettivamente. Di conseguenza, considerata la proiezione in superficie del punto centrale, C, si definisce come DI un volume crostale di $(10 \times 10 \times 5) \text{ km}^3$ la cui proiezione in superficie risulta centrata attorno a C. Il volume DE viene definito estendendo DI in superficie e in profondità di 6 km, per un volume complessivo pari a $(22 \times 22 \times 11) \text{ km}^3$. Nelle Fig. 5 e 6 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).

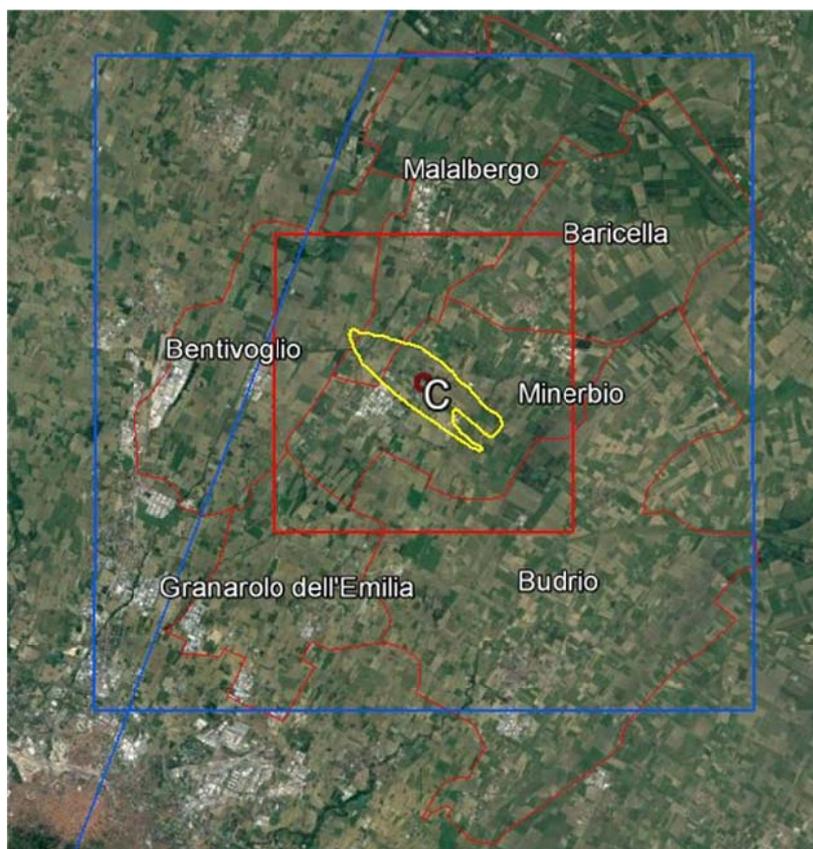


Figura 5. Proiezione in superficie dei domini di rilevazione interno (DI) ed esteso (DE) (box rosso e box blu, rispettivamente). DI e DE hanno dimensioni di $(10 \times 10 \times 5) \text{ km}^3$ e $(22 \times 22 \times 11) \text{ km}^3$ rispettivamente. Vengono mostrati la proiezione in superficie del 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).

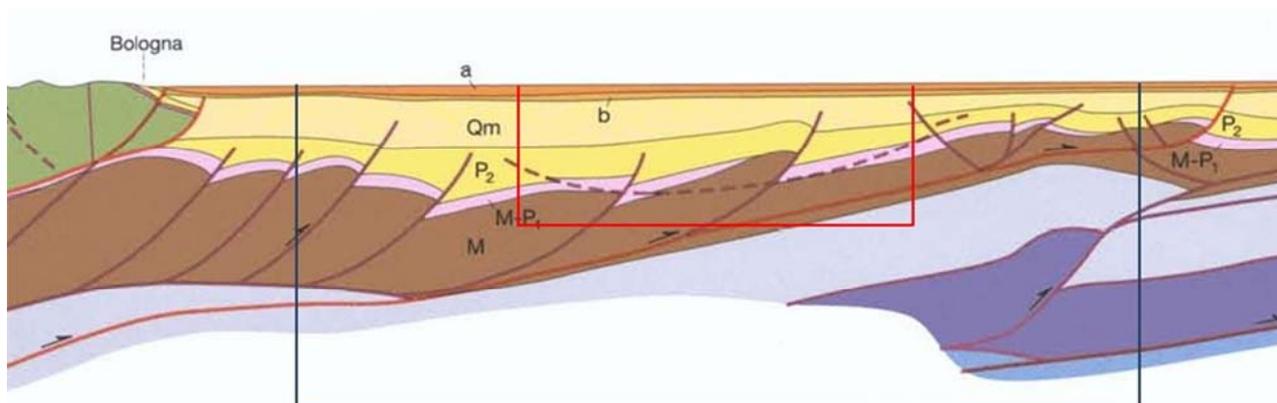


Figura 6. Proiezioni dei domini di rilevazione sulla sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004). Linea rossa: dominio interno; linea blu: dominio esteso. Le profondità dei domini DI e DE sono di 5 e 11 km, rispettivamente

3. Monitoraggio microsismico

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) km², centrata attorno alla proiezione in superficie del giacimento, 15 siti sono monitorati con stazioni della RSN (Fig.7 e Tab.3). Complessivamente sono stati installati 11 sensori velocimetrici (NDIM, CAVE, RAVA, SERM, FIU, IMOL, A307A, A308A, 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). Fra questi, SERM e IMOL sono dotati di sensore velocimetrico installato in pozzetto (a 135 e 175 m di profondità, rispettivamente). La minima distanza inter-stazione è mediamente di circa 21 km (INGV-CNT, 2017a). Come suggerito in MiSE-DGS-UNMIG (2014), tali stazioni dovranno integrare la rete microsismica “Minerbio Stoccaggio” allo scopo di aumentare le capacità di rilevazione, soprattutto nel dominio esteso.

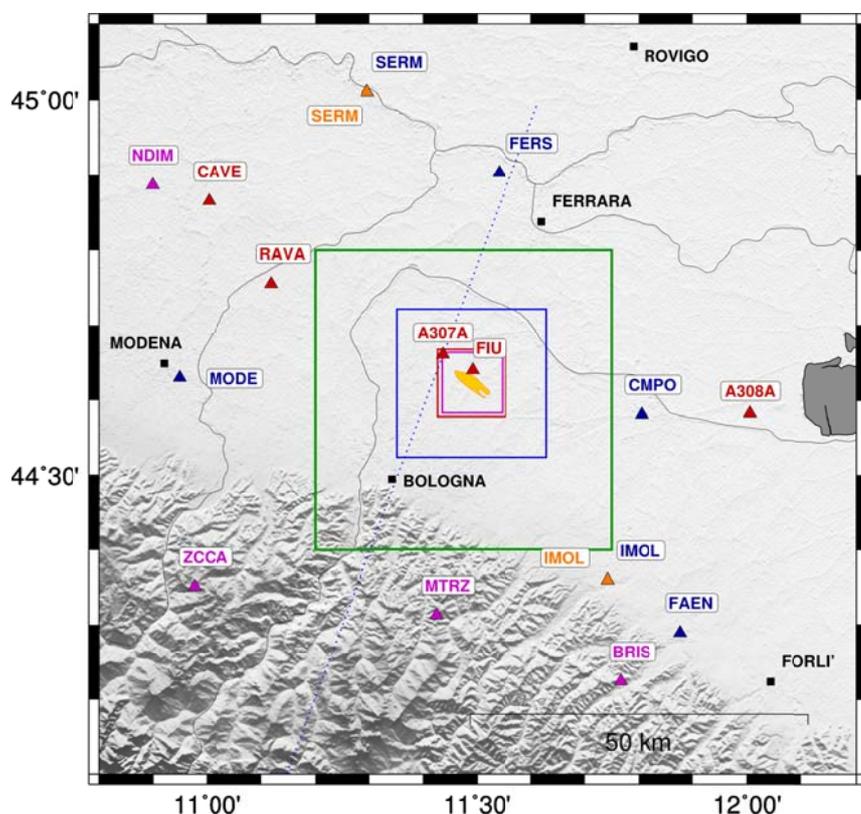


Figura 7. Stazioni della Rete Sismica Nazionale situate in un’area di (110 x 110) km² centrata attorno alla posizione del giacimento “Minerbio Stoccaggio”. Triangoli rossi: sensori velocimetrici posti in superficie; triangoli blu: accelerometri posti in superficie; triangoli viola: stazioni superficiali 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); il limite dell’area di indagine per l’analisi della sismicità rilevata dal Concessionario nel periodo 1979-2016 (linea verde); la traccia della sezione C-C’ di Boccaletti *et al.* (2004) (linea tratteggiata blu); la proiezione in superficie dell’area delimitata dalla linea di contatto GWC (area gialla) e il limite dell’area di installazione della rete di monitoraggio microsismico (linea viola).

Il monitoraggio microsismico è stato realizzato dal Concessionario mediante una rete di sensori velocimetrici che, nel periodo Giugno 1979- Giugno 1986, ha raggiunto un numero massimo di 7 stazioni (Fig.8a) (STOGIT 2016). Successivamente, la rete è stata ridotta ad una sola stazione, integrata con le stazioni di altre reti emiliane gestite dal Concessionario, situate a 40-50 km di distanza da Minerbio. A partire da Settembre 1990, la rete di Minerbio è stata implementata con l’installazione di 3 stazioni velocimetriche, inizialmente dotate della sola componente verticale e, da Luglio 1998, dotate di sensori triassiali. A partire da Aprile 2016, la rete è stata implementata con l’installazione di una stazione aggiuntiva in pozzetto (a 100 m di profondità) dotata di sensore velocimetrico triassiale. La configurazione attuale della rete microsismica è mostrata in Fig.8b (STOGIT 2016).

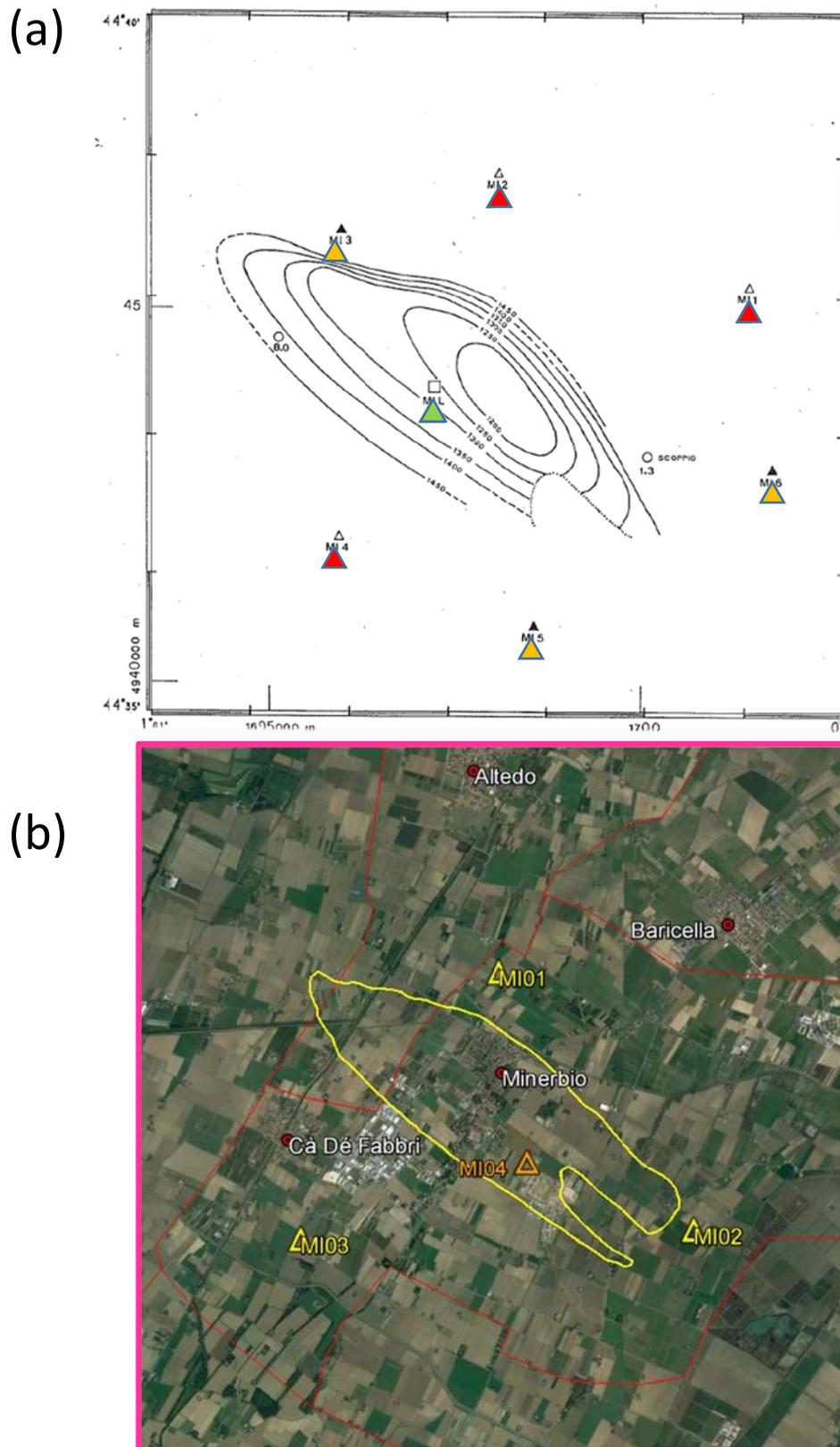


Figura 8. Configurazione della rete microsismica “Minerbio Stoccaggio”: (a) Stazioni operative nel periodo Giugno 1979 – Giugno 1986. Simboli rossi: stazioni con sensore monocomponente installate in superficie; simboli gialli: stazioni con sensore monocomponente installate in pozzetto; simbolo verde: stazione con sensore triassiale; (b) Configurazione attuale della rete microsismica. Simboli gialli: stazioni con sensore triassiale installate in superficie; simbolo arancione: stazione con sensore triassiale installata in pozzetto (profondità: 100m). I limiti dell’area rappresentata corrispondono al contorno indicato dalla linea viola di Fig.7.

L'evoluzione della rete microsismica è mostrata in Fig.9 (STOGIT 2016). Come si vede, le forme d'onda sono state acquisite in forma digitale a partire dal 1991 e l'acquisizione in continuo è stata avviata a partire da Maggio 2015. Nell'ambito delle attività di sperimentazione degli ILG sono state messe a disposizione le forme d'onda registrate dal 1992 al 2015 con modalità di acquisizione a trigger nel formato digitale Lennartz e, a partire dal 2015, i dati acquisiti in continuo nel formato miniSEED. Inoltre, sulla base delle informazioni contenute nei rapporti "Rete emiliana", redatti da Eni E&P dal 1979 al 2009, e nei bollettini annuali di interpretazione della microsismicità del periodo 2010-2016, il Concessionario ha fornito l'elenco dei sismi locali registrati dal 1979 al 2016 entro un raggio di 10 km dal *reservoir*. In questo paragrafo, al fine di contestualizzare la sismicità registrata, il catalogo degli eventi locali rilevati dalla rete microsismica (da qui in seguito denominato "Catalogo STOGIT") viene confrontato con il catalogo della Rete Sismica Nazionale prodotto da INGV (da qui in seguito denominato "Catalogo INGV", INGV-CNT, 2017b), per un'area di circa (44 x 44) km² che comprende la proiezione in superficie del Dominio Esteso di rilevazione (cfr. Fig.7, linea verde).

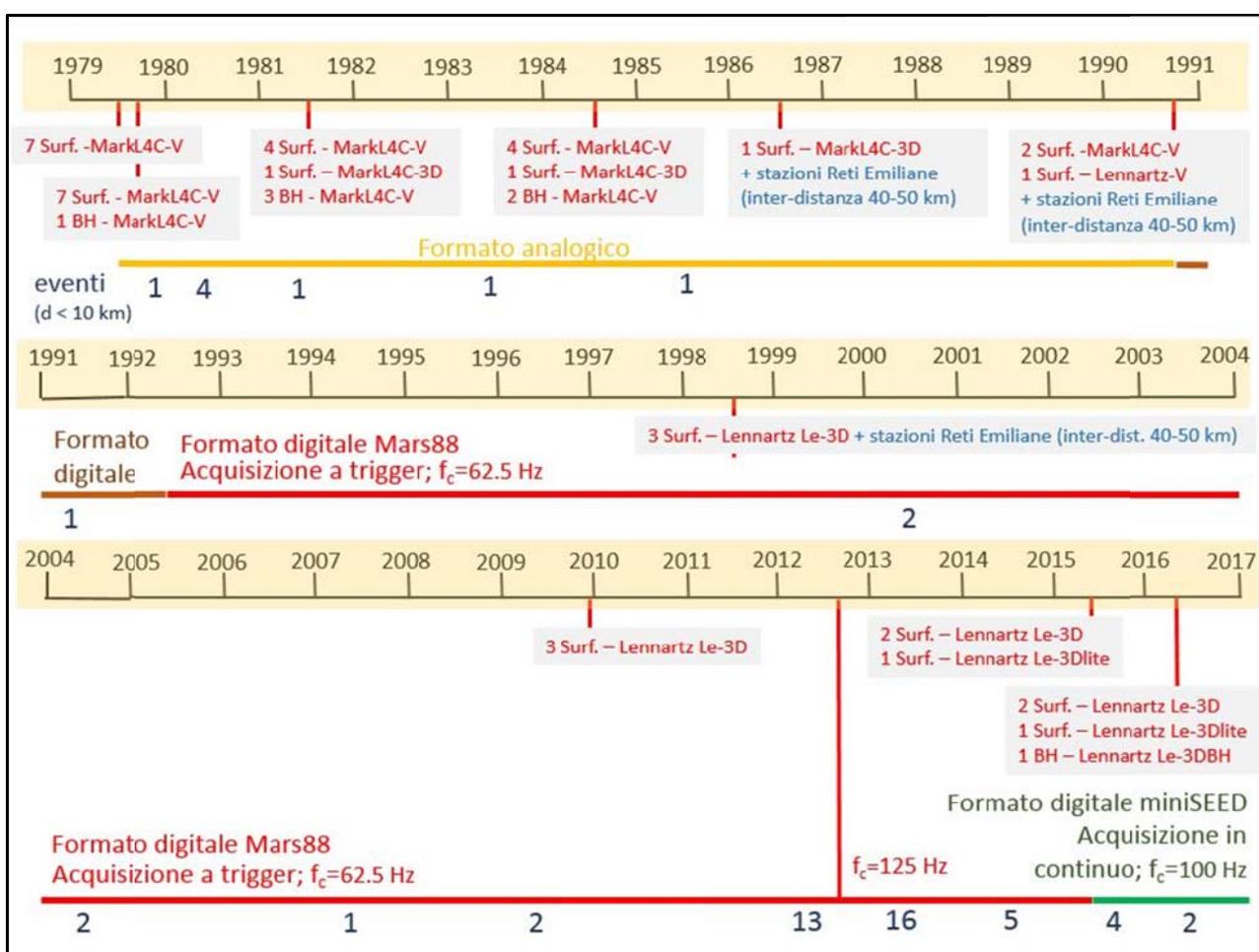


Figura 9. Evoluzione della rete microsismica "Minerbio Stocaggio". In corrispondenza dell'asse temporale vengono elencati i sensori velocimetrici installati (Surf. = sensore in superficie; BH = sensore in pozzetto); il formato dei dati acquisiti (analogico o digitale); la tipologia di acquisizione (a trigger o in continuo) e la corrispondente frequenza di campionamento f_c; il numero di eventi sismici registrati dalla rete e localizzati entro 10 km di distanza dal *reservoir*.

A partire dal Catalogo INGV presente sul sito istituzionale (INGV-CNT, 2017b), è stato effettuato innanzitutto un confronto per individuare eventuali eventi che, pur essendo presenti nel catalogo INGV e dunque registrati dalla RSN, risultassero invece assenti dal Catalogo STOGIT. A tal fine sono stati utilizzate anche le informazioni contenute nei rapporti "Rete emiliana" e nei bollettini annuali di interpretazione della microsismicità messi a disposizione dal Concessionario. In Tab.2 viene presentato il risultato delle analisi effettuate. Vengono riportati: gli eventi locali elencati nel Catalogo STOGIT, gli eventi registrati dalla RSN, gli eventi localizzati dalla rete microsismica e gli eventi registrati dalla rete microsismica ma non localizzati. Un'attenta lettura dei rapporti forniti dal Concessionario ha messo in evidenza l'assenza dal Catalogo STOGIT di 6 eventi: 4 di essi sono stati registrati ma non localizzati, uno di essi è stato localizzato ma poi non inserito nel catalogo, pur essendo stato classificato come locale rispetto alla rete in questione mentre il rimanente evento sismico (registrato anche dalla RSN durante la sequenza emiliana di Maggio-Luglio 2012) è stato localizzato ma poi non inserito nel catalogo, in accordo con la scelta operata dal Concessionario che ha classificato come *regionali* tutti gli eventi della sequenza emiliana.

In Fig.10 vengono mostrate la distribuzione della sismicità registrata dalla RSN nel periodo 1985-2016 e la distribuzione degli eventi contenuti nel Catalogo STOGIT. Vengono considerate un'area di circa (44 x 44) km² centrata attorno alla proiezione in superficie del giacimento (Fig.10a) e una sezione di 16 km che attraversa la struttura che ospita il giacimento (Fig.10b).

Come era prevedibile, il confronto tra i due cataloghi e l'analisi delle informazioni contenute nei rapporti messi a disposizione dal Concessionario, hanno rivelato che, durante tutto il periodo di funzionamento, la rete microsismica "Minerbio Stoccaggio" ha registrato molti più eventi di quelli che compaiono nel Catalogo INGV. Infatti, nel limitato volume crostale che viene considerato dal Catalogo STOGIT, la geometria della rete microsismica consente di monitorare in modo efficiente eventi sismici di magnitudo inferiore alla magnitudo minima di localizzazione che la RSN raggiunge in quest'area. Questo risulta evidente anche dalla Fig. 10, nella quale si vede che tutta la microsismicità compresa nell'area del dominio esteso è costituita quasi esclusivamente da eventi che compaiono solo nel Catalogo STOGIT (cerchi viola). La distribuzione in profondità mostra inoltre che quasi tutti gli eventi microsismici locali risultano più profondi rispetto al giacimento di stoccaggio. In particolare, ad esclusione di 3 eventi sismici, tutti gli eventi del Catalogo STOGIT sono stati localizzati a profondità maggiori di 4 km. Nel corso della sperimentazione degli ILG, verranno effettuate ulteriori verifiche sulla sismicità rilevata dal Concessionario, allo scopo di validare la stima della magnitudo e dei parametri di localizzazione.

#ID_SNA M.	DATA	ORA UTC	LATITUDINE	LONGITUDINE	Err. Epic (Km)	PROF (km)	Err. Prof (Km)	RMS	ML	Epicentro
1	1979-12-19	10:03:00	44.617167	11.518167	0.3	1.8	0.2	0.13	1.2	Minerbio
2	1980-03-13	02:02:05	44.621333	11.522833	0.4	5.5	0.1	0.13	1.4	Minerbio
3	1980-03-18	14:43:05	44.621333	11.450333	2.3	7.8	3.0	0.07	2.1	S.Giorgio in Piano
4	1980-04-05	04:47:41	44.642667	11.456500	1.4	6.9	1.6			Minerbio
5	1980-11-27	05:04:16	44.634500	11.542333	1.9	4.8	1.7			Minerbio
6	1981-10-31	18:34:12	44.650667	11.472500	1.0	5.1	1.0			Minerbio
7	1983-01-11	05:33:28	44.624000	11.454167	0.7	8.0	0.7	1.60		Minerbio
8	1985-03-25	04:19:00	44.634000	11.500667	0.7	3.0	1.6	1.20		Minerbio
9	1991-02-02	13:48:00	44.634000	11.505500	3.0	2.9	1.0			Minerbio
10	2000-05-26	02:30:25	44.641667	11.520833	0.2	7.7	0.2	0.02	0.3	Minerbio
11	2000-09-23	01:08:36	44.688500	11.538333	0.3	10.8	0.2	0.06	0.9	Malalbergo
12	2004-08-07	00:00:59	44.652167	11.458833	0.4	9.7	0.3	0.03	0.6	Minerbio
13	2004-08-07	16:57:11	44.652500	11.458333	0.3	9.7	0.2	0.02	2.0	Minerbio
14	2007-05-20	22:05:03	44.674500	11.535333	0.3	23.9	0.1	0.01	1.2	Malalbergo
	2009-12-07	16:37:00	44.675000	11.575000	0.4	8.0	0.6	0.03	1.6	Malalbergo
15	2009-12-07	22:56:34	44.652333	11.451667	0.0	6.5	0.0	0.00	0.5	Minerbio
16	2012-05-20	03:22:01	44.612000	11.423000		9.3			2.4	*Minerbio
17	2012-07-16	22:22:12	44.627500	11.500167	0.3	9.1	0.2	0.02	1.1	Minerbio
18	2012-07-17	04:04:01	44.644167	11.467833	0.3	9.5	0.2	0.02	1.2	Minerbio
19	2012-09-02	22:55:14	44.640500	11.537000	0.3	9.4	0.2	0.02	1.5	Minerbio
20	2012-10-16	16:39:19	44.638167	11.534167	0.3	9.3	0.2	0.02	1.4	Minerbio
21	2012-10-16	16:46:28	44.641000	11.538000	0.3	8.9	0.2	0.02	1.0	Minerbio
22	2012-10-18	04:58:09	44.653500	11.445500	0.2	8.1	0.1	0.01	1.3	S.Giorgio in Piano
	2012.10.19	17:57								NON LOCALIZZATO
23	2012-10-26	23:16:28	44.650333	11.437167	0.4	7.7	0.4	0.04	1.3	S.Giorgio in Piano
24	2012-10-27	01:40:48	44.650167	11.442500	0.2	7.7	0.2	0.01	1.0	S.Giorgio in Piano
25	2012-11-14	01:45:05	44.658500	11.461833	1.7	5.7	0.7	0.11	1.4	Minerbio
26	2012-11-15	01:34:54	44.644333	11.448167	0.1	8.0	0.1	0.01	1.3	S.Giorgio in Piano
27	2012-12-02	01:23:59	44.642500	11.450000	0.4	9.1	0.3	0.03	1.1	Minerbio
	2012.12.05	11:35								NON LOCALIZZATO
	2012.12.05	12:00								NON LOCALIZZATO
28	2012-12-09	03:24:36	44.649500	11.435000	0.4	9.7	0.2	0.04	1.1	S.Giorgio in Piano
29	2012-12-09	08:10:00	44.645333	11.433333	1.1	9.4	1.1	0.07	1.2	S.Giorgio in Piano
30	2013-01-07	04:01:29	44.639000	11.479500	0.2	9.0	0.1	0.02	1.1	Minerbio
31	2013-01-16	10:26:07	44.624333	11.493500	0.7	9.6	0.5	0.05	1.7	Minerbio
32	2013-01-16	10:30:29	44.627000	11.493500	0.7	9.0	0.5	0.06	3.2	Minerbio
33	2013-01-16	18:45:41	44.633333	11.480833	0.4	9.5	0.3	0.03	1.3	Minerbio
34	2013-02-05	18:32:28	44.630667	11.493500	0.8	8.6	0.7	0.06	2.1	Minerbio
35	2013-02-05	18:33:25	44.641167	11.474833	0.2	9.2	0.1	0.01	1.3	Minerbio
36	2013-02-05	18:41:21	44.643667	11.477167	0.4	8.9	0.2	0.03	1.5	Minerbio
37	2013-02-05	18:45:59	44.641167	11.480167	0.3	9.0	0.2	0.02	1.9	Minerbio
38	2013-02-06	03:09:40	44.641167	11.476667	0.5	9.2	0.3	0.03	1.2	Minerbio
39	2013-02-11	23:12:16	44.636333	11.481333	0.6	9.1	0.5	0.05	1.6	Minerbio
40	2013-02-14	08:58:05	44.635667	11.488667	0.3	9.0	0.1	0.01	1.9	Minerbio
41	2013-03-01	00:51:59	44.650000	11.454833	0.4	8.0	0.2	0.03	1.6	Minerbio
	2013.03.08	15:12								NON LOCALIZZATO
42	2013-03-09	06:25:18	44.655500	11.442667	0.1	7.8	0.1	0.01	1.2	S.Giorgio in Piano
43	2013-03-09	19:11:32	44.661667	11.439500	0.5	7.2	0.6	0.03	1.1	S.Giorgio in Piano
44	2013-03-12	13:20:06	44.654333	11.442167	0.3	8.0	0.3	0.02	1.7	S.Giorgio in Piano
45	2013-03-12	13:45:04	44.657500	11.434333	0.6	7.1	0.9	0.04	1.5	S.Giorgio in Piano
46	2014-04-01	10:23:33	44.661833	11.586000	1.3	5.5	0.8	0.13	1.5	Molinella
47	2014-04-27	17:01:57	44.711333	11.470500	0.3	6.1	5.0	0.14	1.2	Malalbergo
48	2014-09-14	20:14:51	44.695667	11.438833	0.4	6.4	2.0	0.07	2.0	S.Pietro in Casale
49	2014-09-18	01:20:30	44.687167	11.448833	0.3	5.2	0.1	0.02	0.9	Malalbergo
50	2014-12-13	15:17:19	44.701667	11.622833	1.4	8.0	4.1	0.07	1.4	Marrara
51	2015-09-22	19:02:54	44.683989	11.480000	1.4	4.7	0.3	0.04	2.7	Ponticelli
52	2015-09-22	19:05:14	44.701000	11.482000	0.8	4.7	0.2	0.03	1.4	Ponticelli
53	2015-09-24	05:20:08	44.700000	11.482000	0.9	4.7	0.2	0.03	2.5	Ponticelli
54	2015-10-18	03:20:08	44.692000	11.468000	2.5	5.0	0.4	0.00	0.7	Ponticelli
55	2016-01-06	18:46:10	44.614000	11.513000		7.4			0.9	Minerbio
56	2016-02-25	19:47:43	44.668000	11.572000		4.5			1.5	Baricella

Tabella 2. Elenco degli eventi locali (distanza epicentrale < 10 km) registrati nel periodo Giugno 1979-Dicembre 2016 dalla rete microsismica "Minerbio Stoccaggio". La lista degli eventi è stata integrata con le informazioni contenute nei rapporti messi a disposizione dal Concessionario (STOGIT 2016) e con i dati registrati dalla RSN (INGV-CNT, 2017b). In nero vengono riportati gli eventi locali elencati nel Catalogo STOGIT; in rosso gli eventi registrati dalla RSN, in blu gli eventi localizzati dalla rete microsismica; in verde gli eventi registrati dalla rete microsismica ma non localizzati.

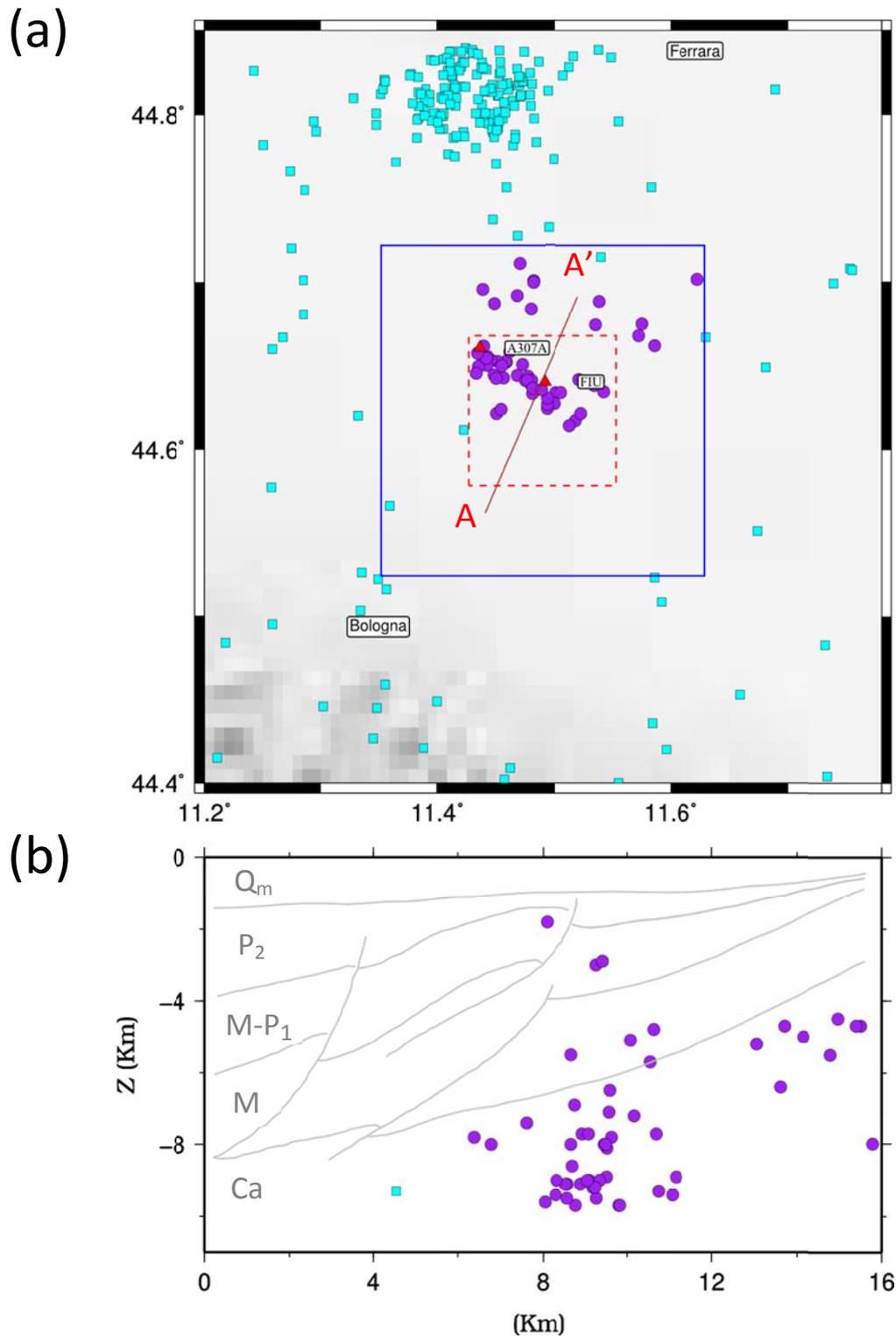


Figura 10. (a) Distribuzione della sismicità del periodo 1985-2016 in un'area di $(44 \times 44) \text{ km}^2$ comprendente la proiezione superficiale del Dominio Esteso di rilevazione (cfr. Fig. 7, linea verde), come desunta dal Catalogo INGV (quadrati azzurri) e distribuzione degli eventi contenuti nel Catalogo STOGIT (cerchi viola). Sono evidenziati i confini del Dominio Esteso (box blu) e del Dominio Interno (box rosso) nonché le posizioni delle uniche due stazioni della RSN presenti all'interno dell'area del DI (triangoli rossi); (b) Distribuzione in profondità della sismicità rilevata in DI, proiettata lungo la sezione A-A' (linea rossa in Fig.10a; STOGIT 2016). Le unità stratigrafiche sono indicate secondo Boccaletti *et al.* (2004) (cfr. Fig.3).

4. Rete di monitoraggio sismico integrata

Sistema di acquisizione

Le stazioni sismiche che compongono la rete integrata di monitoraggio dell'area in esame sono il risultato dell'unione di una parte della Rete Sismica Nazionale (RSN) gestita da INGV, e della rete microsismica "Minerbio Stoccaggio" gestita dal Concessionario. In particolare, per la RSN sono state selezionate tutte le stazioni con distanza da Minerbio entro un raggio di 55 km: entro tale distanza ricadono 13 stazioni sismiche. Inoltre, considerando che entro tale distanza sono presenti due stazioni sismiche INGV dedicate al progetto AlpArray (AlpArray, 2016), di cui l'istituto è membro (INGV, 2016), è stato chiesto ed ottenuto il permesso di utilizzare i dati di queste due stazioni per la localizzazione degli eventi e per il calcolo della magnitudo. Le stazioni delle rete microsismica "Minerbio Stoccaggio" attualmente installate nell'area del Dominio Interno di rilevazione sono 4. In Fig.7 viene mostrata la posizione delle stazioni che compongono la rete integrata mentre in Tab.3 vengono riportate le informazioni strumentali. In particolare, le stazioni della RSN hanno il codice di rete IV, quelle del progetto AlpArray hanno sigla Z3 mentre le stazioni della rete microsismica gestita dal Concessionario hanno il codice MI. Queste ultime, verranno poi integrate da altre 7 stazioni velocimetriche, da installare nell'area del Dominio Esteso, nel corso dell'attività di sperimentazione degli ILG. Il Concessionario ha infatti pianificato l'installazione di altre 3 stazioni in superficie e altre 4 stazioni in pozzetto a 150 m di profondità. In Tab.4 vengono elencate le posizioni delle nuove stazioni previste.

Attualmente, presso INGV-MI vengono acquisiti in tempo reale, su un server dedicato, i segnali delle 15 stazioni della RSN e a breve verranno acquisiti anche i segnali delle 4 stazioni operative della rete microsismica. I criteri adottati per la scelta e la relativa configurazione di tutto il sistema di acquisizione e monitoraggio sono stati quelli di usare software, logiche e hardware già ampiamente collaudati presso INGV ed in particolare presso la sezione di Milano, poiché basati su criteri internazionali riconosciuti ed adottati dai più importanti centri di ricerca sismologica.

L'acquisizione in tempo reale dei dati registrati delle singole stazioni avviene utilizzando il software Seedlink (IRIS, 2016a) che, supportando il protocollo TCP/IP, crea i nodi di acquisizione dati. Questi ultimi, se opportunamente configurati, possono avere funzioni di server o di client di dati tra più nodi. 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 che compongono la rete integrata. In modo analogo, le stazioni della rete microsismica confluiscono direttamente al nodo Seedlink di acquisizione realizzato presso il Concessionario. Il nodo Seedlink del Concessionario confluirà a breve direttamente nel nodo master INGV, in modo tale da avere su quest'ultimo tutte le stazioni (esistenti e future) che compongono la rete integrata. I dati in continuo di tutte le stazioni sismiche sono acquisiti nel formato standard miniSEED (IRIS, 2016b). Il vantaggio di utilizzare questo software, oltre alla sua enorme diffusione nel mondo scientifico, con conseguente validazione, è la sua natura Open Source, basata su piattaforme Linux.

A valle del sistema di acquisizione è stato installato e configurato un sistema di analisi e di elaborazione dati in tempo reale basato su Earthworm (Earthworm Central, 2016). Anche questo software ha una natura Open Source basata su sistemi Linux ed è uno standard internazionale poiché ampiamente diffuso presso i maggiori centri di monitoraggio sismico. Le funzioni principali di questo software sono: il riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale, il riconoscimento delle fasi sismiche e la localizzazione degli eventi, il calcolo della magnitudo e dei parametri di scuotimento del suolo quali PGA, PGV e PSD. Le tracce di ogni evento riconosciuto vengono automaticamente tagliate e convertite nel formato internazionale SAC (IRIS, 2016c) per poter essere utilizzate in elaborazioni successive. Infatti, per la creazione del bollettino sismico definitivo, ogni evento processato automaticamente sarà rivisto manualmente presso INGV-MI da un operatore qualificato, che avrà il compito di effettuare la validazione finale del calcolo della magnitudo e dei parametri di localizzazione e dell'evento.

La procedura che porterà alla creazione del bollettino sismico definitivo è basata sui seguenti passi:

- (1) Acquisizione in tempo reale delle stazioni della RSN.
- (2) Acquisizione in tempo reale delle stazioni del Concessionario.
- (3) Creazione di un archivio unico dei dati in continuo giornalieri di tutte le stazioni nel formato miniSEED.
- (4) Riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale, riconoscimento delle diverse fasi sismiche, localizzazione automatica e calcolo della magnitudo.
- (5) Taglio delle forme d'onda dell'evento e conversione dei dati nel formato SAC
- (6) Rilocalizzazione manuale dell'evento sismico, riconoscimento di eventuali falsi trigger e ricalcolo della magnitudo.
- (7) Creazione del bollettino sismico definitivo.

Allo stato attuale sono ancora presenti alcune problematiche, che riguardano la possibilità di accesso in tempo reale ai dati registrati dalle stazioni della rete microsismica, dovute alle diverse politiche di sicurezza informatica in uso presso INGV e presso il Concessionario. Di conseguenza, l'archivio dei dati della rete di monitoraggio integrata non viene attualmente aggiornato in tempo reale, dato che soltanto le stazioni INGV delle reti IV e Z3 sono acquisite in tal modo.

Il Concessionario ha comunque consegnato le forme d'onda nel formato miniSEED, registrate delle proprie stazioni nel periodo Maggio 2015 – Dicembre 2016 ed è stato quindi possibile creare l'archivio integrato dei dati sismici registrati fino al 31-12-2016 dalle reti IV, Z3 e MI presso il nodo master Seedlink. Dal 01-01-2017, i dati presenti presso tale nodo sono invece solo quelli delle reti IV e Z3.

STAZIONI RETE SISMICA INTEGRATA INGV – SNAM												
Net	Stazione	Latitude	Longitude	Quota	Profondità (m)	SiteName	Acquisitore	Velocimetro	Accelerometro	Distanza (Km)	Azimut (°)	Proprietà
IV	BRIS	44.224540	11.766570	260	0	Brisighella	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	50.20	153.93	INGV
IV	CAVE	44.865800	11.003100	18	0	CAVE	GAIA2	TRILLIUM-120S	xxx	46.59	304.46	INGV
IV	CMPO	44.580800	11.805600	2	0	Campotto Po	GAIA2	xxx	EPISENSOR-2G	25.60	102.24	INGV
IV	FAEN	44.289500	11.877000	41	0	Faenza	GAIA2	xxx	EPISENSOR-2G	48.80	140.82	INGV
IV	FERS	44.903500	11.540600	3	0	Ferrara	GAIA2	xxx	EPISENSOR-2G	30.70	7.47	INGV
IV	FIU	44.640310	11.491650	12	0	Fondo Fiumicello – Minerbio	GAIA1	LE3D-5S	xxx	1.15	6.50	INGV
IV	IMOL	44.359550	11.742480	27	175	Imola	GAIA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	36.17	146.25	INGV
IV	MODE	44.629722	10.949167	41	0	Modena	GAIA2	xxx	EPISENSOR-2G	42.84	270.15	INGV
IV	MTRZ	44.312800	11.424800	570	0	Monterenzio	TRIDENT	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	35.68	188.37	INGV
IV	NDIM	44.887300	10.898700	19	0	Novi di Modena	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	54.81	301.71	INGV
IV	RAVA	44.755870	11.118800	15	0	Ravarino	GAIA2	LE3D-5S	xxx	32.54	295.63	INGV
IV	SERM	45.009970	11.295820	7	135	Semide	GAIA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	44.99	340.14	INGV
IV	ZCCA	44.350850	10.976500	700	0	Zocca	GAIA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	51.26	232.87	INGV
Z3	A307A	44.660755	11.436312	9	0	Bentivoglio	REFTEK130	TRILLIUM-120C	xxx	5.45	308.86	ALPARRAY -INGV
Z3	A308A	44.582485	12.005684	-2	0	Longastrino	REFTEK130	TRILLIUM-120C	xxx	41.21	97.19	ALPARRAY -INGV
MI	MI01	44.639444	11.491667	11	0	Fondo Fiumicello - Minerbio	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	xxx	1.15	6.50	STOGIT
MI	MI02	44.607222	11.525556	9	0	San Martino in Soverzano - Minerbio	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	xxx	3.75	132.24	STOGIT
MI	MI03	44.606111	11.457222	14	0	Spettoleria - Minerbio	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S-MKIII	xxx	3.73	223.74	STOGIT
MI	MI04	44.615689	11.496575	10	100	Tintoria - Minerbio	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-BH	xxx	1.70	162.07	STOGIT

Tabella 3. Rete sismica integrata: stazioni della Rete Sismica Nazionale installate entro 55 km di distanza dal giacimento “Minerbio Stoccaggio” e stazioni della rete microsismica “Minerbio Stoccaggio”, gestita dal Concessionario, attualmente installate all’interno della proiezione superficiale del Dominio Interno di rilevazione.

Rete	Stazione	Latitudine N	Longitudine E	Quota	Profondità	Località
		[gradi]	[gradi]	[m]	[m]	
MI	MI05	44.645206	11.452786	13	150	Bentivoglio
MI	MI06	44.616639	11.400356	17	0	Bentivoglio
MI	MI07	44.561881	11.444197	22	150	Granarolo dell'Emilia
MI	MI08	44.557600	11.540072	17	150	Budrio
MI	MI09	44.621964	11.579697	8	0	Budrio
MI	MI10	44.679092	11.531453	7	150	Malalbergo
MI	MI11	44.677072	11.439917	9	0	San Pietro in Casale

Tabella 4. Posizione delle nuove installazioni previste dal Concessionario nell'area della proiezione superficiale del Dominio Esteso.

Analisi di rumore sismico ambientale

Grazie alla creazione di un archivio unico dei dati, è stato possibile installare e configurare il *tool* sismologico PQLX (USGS, 2016) che permette di effettuare rapidamente un'analisi di qualità dei segnali acquisiti. Le forme d'onda registrate dalle stazioni della RSN, acquisite in tempo reale presso INGV-MI e i dati acquisiti nel periodo Maggio 2015 – Dicembre 2016 delle stazioni attualmente operative della rete microsismica "Minerbio Stoccaggio" e messi a disposizione dal Concessionario in formato miniSEED, sono stati impiegati per caratterizzare il rumore sismico ambientale mediante PQLX. L'analisi è stata effettuata calcolando la densità dello spettro di potenza (PSD) del segnale registrato ad 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), che ha utilizzato dati di microtremore sismico registrati da 75 stazioni distribuite in diverse parti del mondo. Applicando l'algoritmo sviluppato da McNamara e Buland (2004), PQLX consente di calcolare le *Probability Density Functions* (PDF) dello spettro di potenza (PSD) del segnale (McNamara e Boaz, 2005). In Fig.11 sono rappresentate le PDF calcolate con la componente verticale registrata alle stazioni della RSN nel periodo Maggio 2015-Aprile 2017. Si possono notare: 1) l'elevata rumorosità degli accelerometri (CMPO; FAEN; FERS; MODE); 2) la differente risposta per periodi maggiori di 5-10s dei velocimetri a corto periodo (FIU; RAVA; SERM; IMOL) rispetto ai velocimetri a lungo periodo (BRIS; MTRZ; NDIM; CAVE; A307A; A308A); 3) la bassa rumorosità, anche in alta frequenza (periodi compresi tra 0.1 e 1s) dei velocimetri installati in area appennina (ZCCA; MTRZ; BRIS) o nella Pianura Padana ma in pozzetto (IMOL; SERM); 4) lo sdoppiamento della PDF nell'intervallo delle alte frequenze (periodi compresi tra 0.1 e 1s), dovuto alla variabilità giornaliera di origine antropica del rumore sismico ambientale.

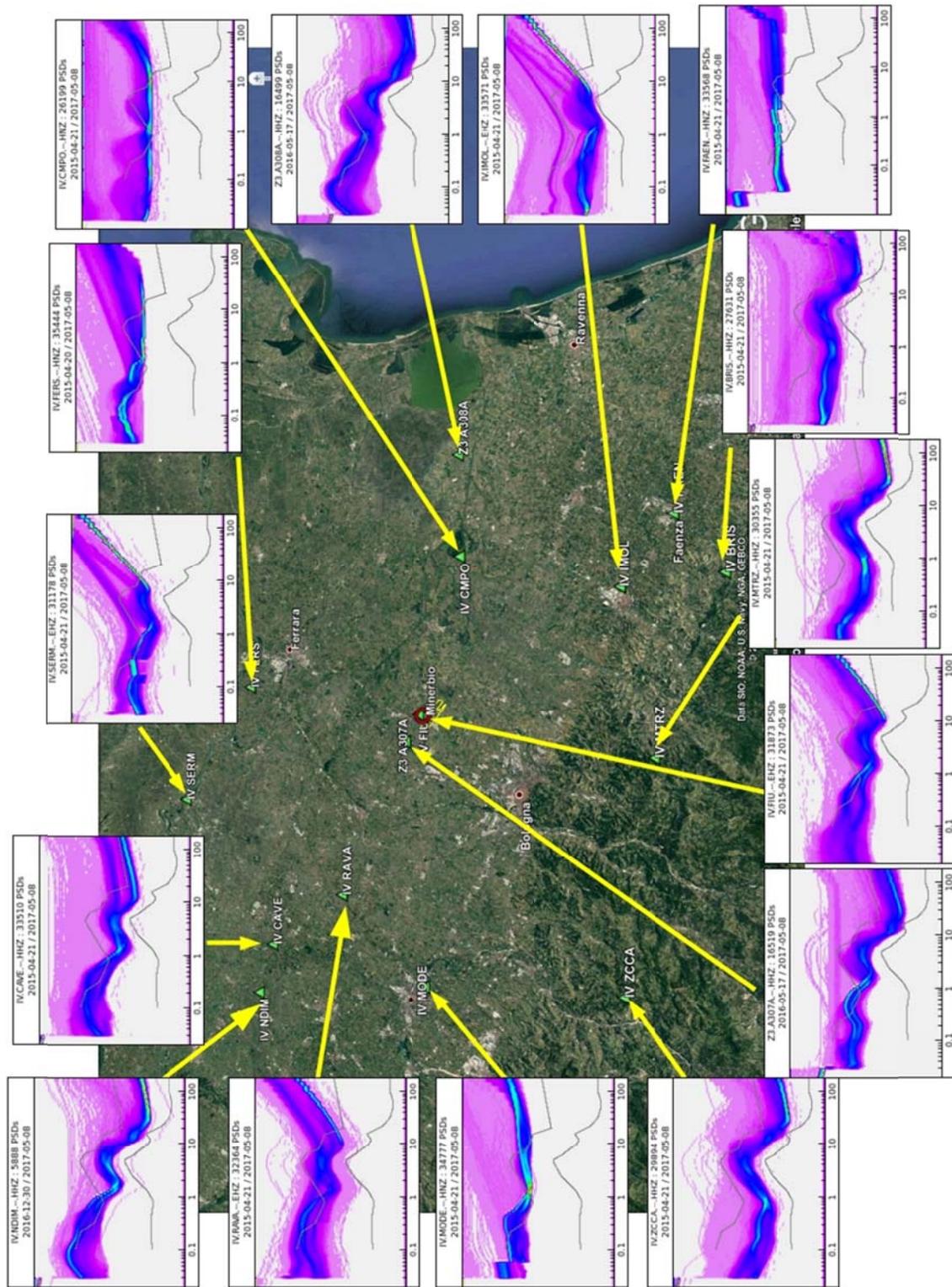


Figura 11. Distribuzione di probabilità (PDF) della densità di spettro di potenza (PSD) per le componenti verticali delle stazioni della Rete Sismica Nazionale installate in un'area di $(110 \times 110) \text{ km}^2$ comprendente il Domino Esteso di rilevazione. I valori spettrali, rappresentati in funzione del periodo (cfr. Fig. 12), si riferiscono allo spettro di potenza (PSD), misurato in $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ 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 (cfr. Fig.12). 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 PDF calcolate con la componente verticale registrata alle stazioni della rete microsismica nel periodo Maggio 2015 - Dicembre 2016, sono invece mostrate in Fig.12. Come si vede, 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 NHHM, mentre la stazione MI04, installata in pozzetto a 100 m di profondità, mostra un livello medio di rumore di circa -120 dB. Tuttavia, la MI04 mostra anche una elevata variabilità del livello di rumore (fino a 15 dB) per frequenze attorno a 5 Hz.

In generale quindi, le misure di rumore sismico ambientale realizzate con le stazioni attualmente installate nell'area della concessione, evidenziano una situazione di elevato livello di disturbo, caratteristica di tutte le aree che presentano una intensa attività antropica. Come già verificato in altre zone della Pianura Padana, anche in quest'area le installazioni in pozzetto (profondità: 100 -200 m) consentono di ottenere una diminuzione del livello medio di rumore di circa 0.1 dB/m nell'intervallo di frequenze 1-30 Hz (Franceschina et al., 2015).

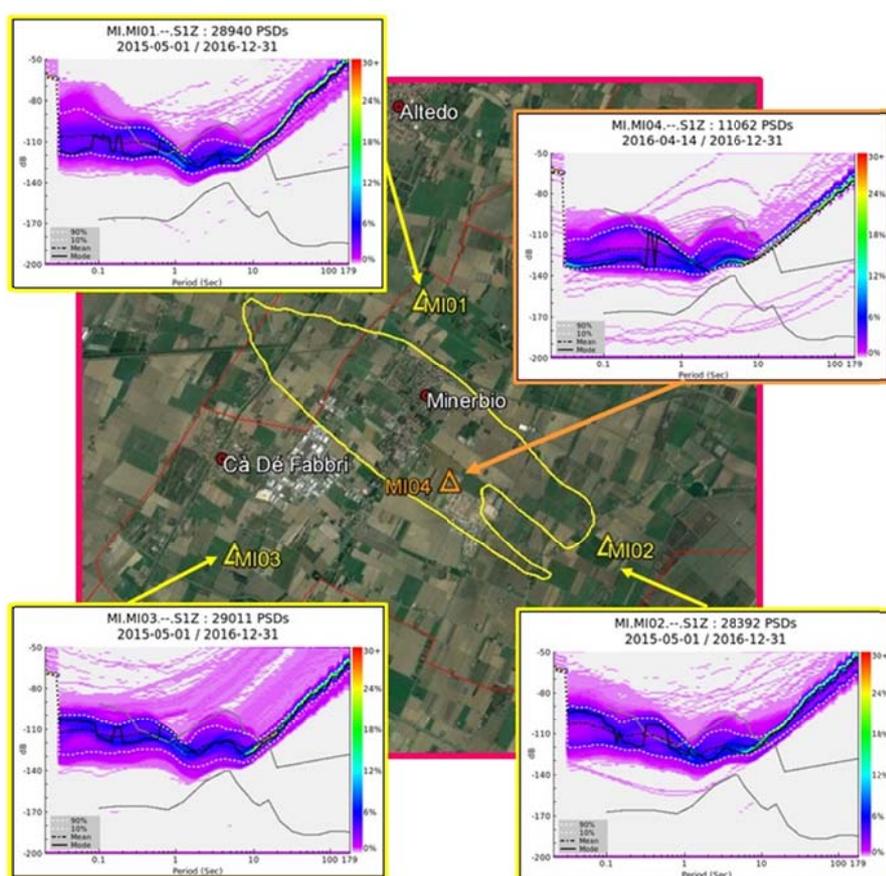


Figura 12. Distribuzione di probabilità (PDF) della densità di spettro di potenza (PSD) per le componenti verticali delle stazioni della rete microsismica “Minerbio Stocaggio”. I valori spettrali, rappresentati in funzione del periodo, si riferiscono allo spettro di potenza (PSD), misurato in $(m/s^2)^2/Hz$ 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 NHHM (New High Noise Model) e NLNM (New Low Noise Model), in alto e in basso rispettivamente, ottenute da Peterson (1993).

5. Analisi di detezione

Metodo

Le analisi di rumore sismico ambientale presentate nel paragrafo precedente sono state impiegate per valutare la sensibilità della rete microsismica attualmente installata nell'area della concessione e della rete microsismica pianificata dal Concessionario nell'ambito delle attività di sperimentazione degli ILG. Le analisi di sensibilità sono state effettuate confrontando lo spettro di potenza del rumore sismico osservato con lo spettro di potenza di terremoti simulati in tutto il Dominio Esteso di rilevazione. In Fig.13 vengono mostrate le PDF ottenute dai dati registrati alle stazioni MI01, MI02, MI03 e MI04 e alle stazioni FIU e A307A della RSN, utilizzando la componente EW del moto (cfr. Fig.7). A307A è stata inclusa nelle analisi di detezione della rete microsismica. Nell'analisi di detezione sono state utilizzate le curve corrispondenti al 90° percentile delle PDF osservate a MI01 (coincidente con FIU), MI02, MI03, MI04 e A307A e le curve corrispondenti alla mediana della PDF registrata nelle ore notturne alle medesime stazioni. Sono state simulate in tal modo due situazioni opposte per quanto riguarda la probabilità di detezione di eventi sismici. Le curve rappresentative del livello di rumore sismico ambientale sono state considerate per frequenze comprese fra 1 e 30 Hz.

Poiché vengono simulati terremoti di magnitudo non particolarmente elevata, è stato utilizzato un modello a sorgente puntiforme, adottando la forma funzionale prevista da Brune (1970; 1971) per definire lo spettro di Fourier dell'evento. Il modello, ampiamente utilizzato nella pratica ingegneristica quando si intendano trascurare gli effetti di finitezza della faglia e gli effetti di direttività della rottura, è completamente definito da due parametri: il momento sismico del terremoto, M_0 , legato alla magnitudo, e la frequenza d'angolo, f_c , legata alle dimensioni lineari della sorgente. Alternativamente, lo spettro di sorgente può essere definito dai valori di M_0 e della caduta di sforzo, $\Delta\sigma$, dato che risulta $\Delta\sigma \sim M_0 f_c^3$. È importante notare che lo spettro di Fourier in velocità presenta un massimo assoluto in corrispondenza della frequenza d'angolo dell'evento. Quest'ultima può essere perciò definita come la frequenza caratteristica delle onde sismiche emesse dalla sorgente. Lo spettro in accelerazione presenta un andamento proporzionale a f^2 per frequenze minori di f_c e risulta costante per frequenze superiori. L'applicazione di una legge di scala, che regola il rapporto fra le dimensioni della sorgente (M_0) e la dinamica della rottura (f_c), consente di ridurre ad uno il numero di parametri necessari per definire lo spettro di sorgente. La legge di scala comunemente impiegata nelle simulazioni a sorgente puntiforme assume che, al variare di M_0 , la caduta di sforzo $\Delta\sigma$ rimanga costante. In questo lavoro si assume $\Delta\sigma = 1$ MPa come valore rappresentativo della caduta di sforzo di eventi sismici di magnitudo inferiore a 4.0. L'attenuazione delle onde sismiche viene simulata introducendo un termine moltiplicativo, dipendente dalla frequenza e dalla distanza, nella definizione dello spettro di Fourier, allo scopo di rappresentare gli effetti di diffusione geometrica, di attenuazione anelastica e di dispersione. Secondo un'approssimazione ampiamente utilizzata, l'attenuazione può essere parametrizzata mediante due soli parametri: il fattore di qualità per $f=1$ Hz, Q_0 (Lay e Wallace, 1995), e il parametro di decadimento spettrale, k (Anderson e Hough, 1984). Complessivamente, l'ampiezza dello spettro di Fourier in velocità delle onde S registrate a distanza ipocentrale R dalla sorgente viene calcolata dalla relazione:

$$V(f) = \frac{C \cdot M_0}{R} \frac{2\pi \cdot f}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi \cdot R}{\beta \cdot Q_0}\right) \cdot \exp(-k\pi f) \quad (1)$$

nella quale β rappresenta la velocità delle onde S e la costante C dipende da β , dalla densità del mezzo, ρ , dal fattore di forma della radiazione, $R_{\vartheta\varphi}$ e dal fattore F_s che rappresenta l'amplificazione di superficie libera ($F_s=2$ per stazioni poste in superficie; $F_s=1$ per stazioni in pozzo).

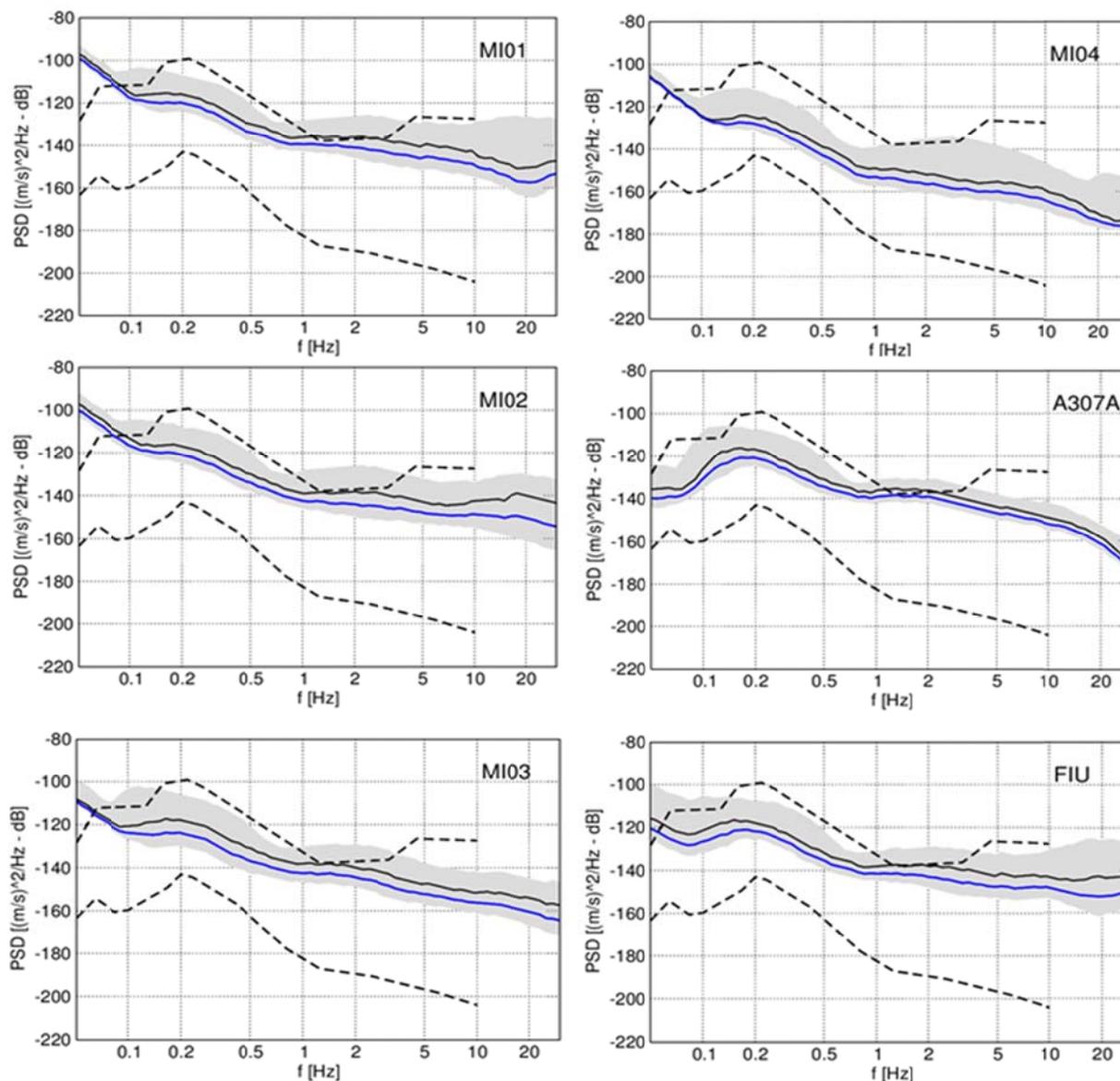


Figura 13. Confronto fra le curve standard NHHM – NLNM (curve tratteggiate) e lo spettro di potenza del segnale di velocità registrato alle stazioni MI01, MI02, MI03, MI04, A307A e FIU. Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera), la curva mediana della 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 EW del moto.

Il momento sismico è stato ricavato a partire dalla magnitudo locale, M_L , utilizzando la relazione:

$$\begin{aligned} \text{Log } M_o &= 1.5 M_L + 9.0 \quad (M_L \geq 3.0) \\ \text{Log } M_o &= 1.0 M_L + 10.5 \quad (M_L < 3.0) \end{aligned} \quad (2)$$

nella quale il tratto corrispondente alle alte magnitudo rappresenta la definizione di magnitudo momento introdotta da Hanks e Kanamori (1979) mentre alle magnitudo inferiori viene adottata una pendenza unitaria, in accordo con gli studi sulle leggi di scala di eventi sismici di bassa magnitudo (Hanks e Boore, 1984).

Per quanto riguarda l'attenuazione, recenti studi relativi all'area in esame indicano $Q_0 \approx 80$ (Castro et al., 2013) mentre il valore del parametro k di decadimento spettrale può essere definito sulla base delle informazioni disponibili riguardanti la geologia locale. Gli studi relativi a tale parametro mostrano infatti che k dipende principalmente dalle condizioni di sito, con valori generalmente variabili tra 10 ms (siti "rock") e 120 ms (sedimenti alluvionali profondi), e mostra un debole incremento con la distanza epicentrale (dell'ordine di 0.15 ms/km). Considerate le modeste distanze in gioco, in questo studio viene assunto per il parametro k un valore indipendente dalla posizione della sorgente. L'area di installazione risulta infatti sostanzialmente omogenea e caratterizzata da livelli di attenuazione intermedi, tipici dei sedimenti consolidati. In questo lavoro, il valore di k è stato fissato sulla base di alcune stime preliminari già effettuate nella medesima area (Carannante *et al.*, 2016). Per questo parametro è stato impiegato un valore costante pari a 80 ms in tutte le simulazioni. I valori di β e di ρ invece, sono stati desunti dal modello monodimensionale di Carannante *et al.* (2015): sono stati impiegati $\rho=2.4 \text{ g/cm}^3$ e $\beta=2.2 \text{ km/s}$.

Le analisi di detezione sono state effettuate considerando la rete microsismica attualmente installata nella concessione "Minerbio Stoccaggio", che comprende 4 stazioni di cui una con sensore in pozzetto a 100 m di profondità, e la rete microsismica pianificata dal Concessionario nell'ambito del progetto di sperimentazione degli ILG, che comprende 11 stazioni di cui 5 con sensore in pozzetto (una a 100 m e 4 a 150 m di profondità). In entrambi i casi, la rete microsismica è stata integrata con le stazioni della RSN operanti nell'area (cfr. Fig. 7). Per effettuare le simulazioni, le sorgenti sismiche puntiformi sono state poste in corrispondenza di 169 punti di 5 grigliati regolari ricoprenti un'area di $(24 \times 24) \text{ km}^2$ 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. Le profondità di 1.5 km, 5 km e 11 km corrispondono alla profondità del giacimento di stoccaggio, alla base del Dominio Interno e alla base del Dominio Esteso, rispettivamente. Per ogni sorgente e per ogni stazione sono stati simulati gli spettri di potenza prodotti da eventi sismici di magnitudo locale compresa fra -1.0 e 3.0, utilizzando l'eq. (1) per calcolare l'ampiezza dello spettro di Fourier della fase S, e considerando una durata di 4 s per la stima dello spettro di potenza. 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 è stata definita quindi 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, in questo studio sono stati 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 due configurazioni di rete analizzate sono stati dunque considerati i casi riportati in Tab.5, utilizzando le PDF calcolate con le registrazioni del periodo Maggio 2015 - Dicembre 2016 per le simulazioni relative alla rete microsismica operativa. Per le nuove installazioni pianificate invece, è stato arbitrariamente utilizzato il livello di rumore sismico misurato da FIU, ipotizzando un tasso di diminuzione del rumore pari a 0.1 dB/m per le stazioni in pozzetto.

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 5. 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 rete microsismica operativa e della rete microsismica pianificata dal Concessionario.

La Fig. 14 mostra le configurazioni di rete e il grigliato utilizzato per le simulazioni mentre, a titolo di esempio, nelle Fig.15 (per i casi A1 e B1) e 16 (per i casi A2 e B2), vengono mostrate le soglie di deteazione e di localizzazione ottenute per la rete microsismica attualmente operativa, simulando eventi sismici alla profondità di 3.0 km. Come si vede da queste due ultime figure, fissata la profondità, le soglie di localizzazione sono sempre superiori rispetto alla soglia di deteazione. Nel caso in esame, la deteazione dipende in modo evidente dalla presenza della stazione installata in pozzetto (arriva fino a 0.4 oppure a -0.6 a seconda del livello medio di rumore sismico ambientale). La localizzazione invece, risulta condizionata dalla presenza delle stazioni in superficie e la scelta del numero minimo di detezioni richieste determina una soglia più o meno alta. In DI, si passa mediamente da 1.0 a 1.2 con 3 e 4 stazioni rispettivamente nel caso di rumore elevato (B1 e A1, rispettivamente) oppure da 0.2 a 0.4 con 3 e 4 stazioni rispettivamente nel caso di rumore favorevole (B2 e A2, rispettivamente). Come già accennato, i casi A1 e A2, che corrispondono a soglie di magnitudo più elevata rispetto ai corrispondenti B1 e B2, sono tuttavia caratterizzati da stime più affidabili dei parametri ipocentrali. I criteri empirici che vengono solitamente impiegati per valutare l'affidabilità della stima di tali parametri riguardano infatti il numero di fasi utilizzate (arrivi P ed S), il GAP (massimo angolo senza osservazioni), la distanza dell'epicentro dalla stazione più vicina, l'ampiezza media dei residui fra tempi di viaggio osservati e stimati (Husen e Hardebeck, 2010). 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°.

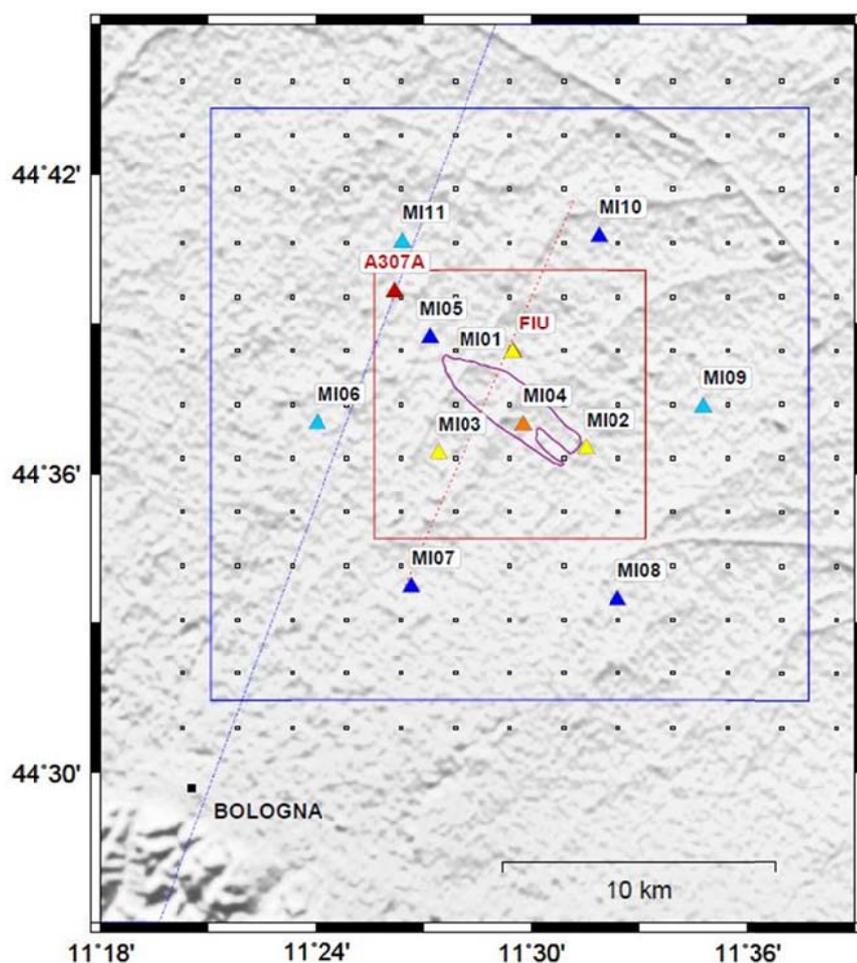


Figura 14. Configurazione delle reti microsismiche e posizione del grigliato utilizzato per le simulazioni. Rete operativa: stazioni in superficie (simboli gialli) e stazioni in pozzetto (simboli arancioni). Rete pianificata dal Concessionario: stazioni in superficie (simboli azzurri) e stazioni in pozzetto (simboli blu). Il sensore di MI04 è installato a 100 m di profondità mentre i sensori di MI05, MI07, MI08, MI10 verranno installati a 150 m di profondità.

Vengono mostrati la proiezione in superficie del Dominio Interno (linea rossa continua); del Dominio Esteso (linea blu continua) e della traccia del GWC (linea viola). Le tracce della sezione di Boccaletti *et al.* (2004) e della sezione A-A' di Fig.10 sono indicate dalla linea blu tratteggiata e dalla linea rossa tratteggiata rispettivamente.

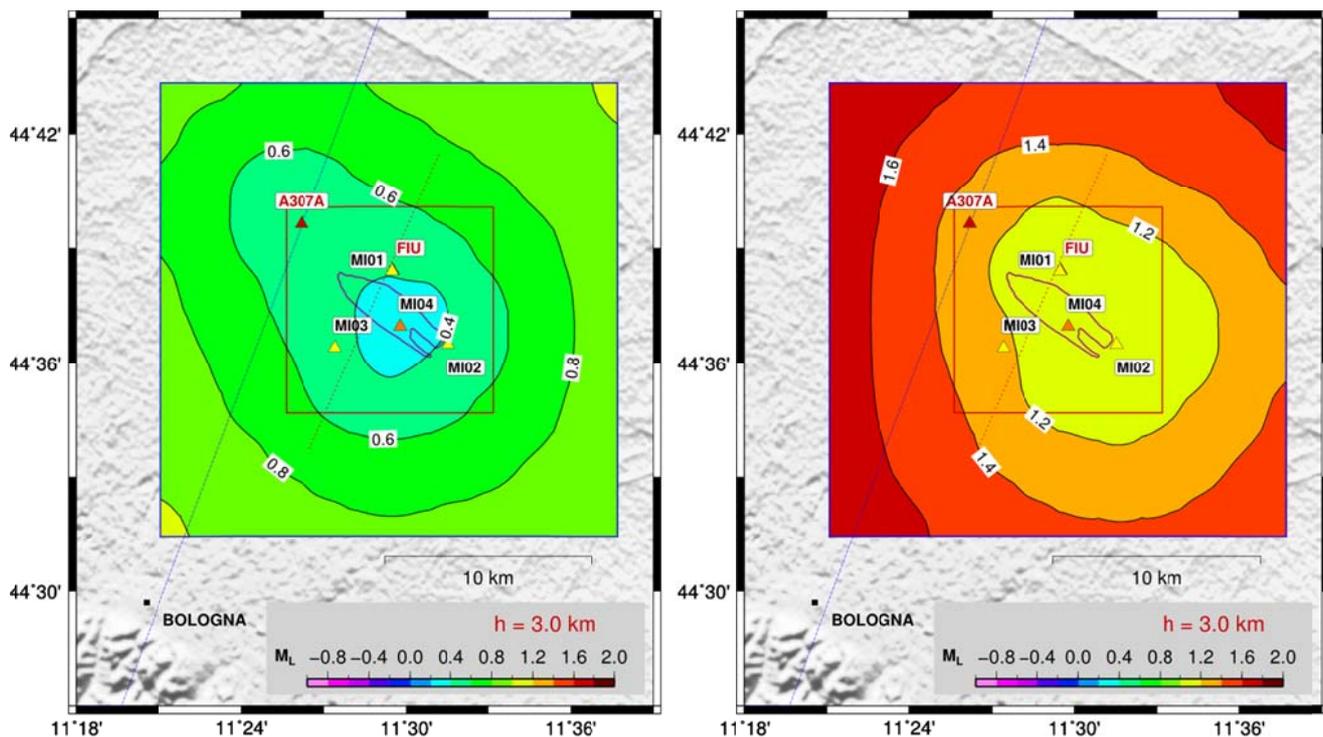
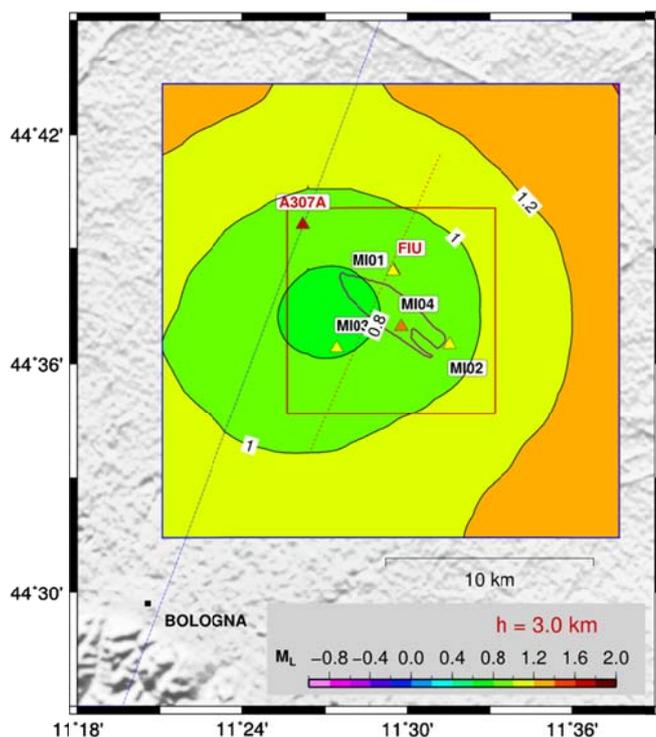


Figura 15. Soglia di detezione (riquadro in alto a sinistra) e di localizzazione (riquadri a destra) per eventi sismici localizzati alla profondità di 3.0 km, espressa in unità di magnitudo M_L . Per ogni stazione della rete microsismica attualmente operativa sono stati impiegati i livelli di rumore sismico ambientale osservati corrispondenti al 90° percentile della PDF calcolata con i dati registrati nel periodo Maggio 2015 – Dicembre 2016 (casi A1 e B1 di Tab.5). Le soglie di localizzazione sono state calcolate imponendo la detezione dell'evento sismico con almeno 4 (riquadro in alto a destra) o almeno 3 (riquadro in basso a destra) stazioni della rete (casi A1 e B1 di Tab.5, rispettivamente).



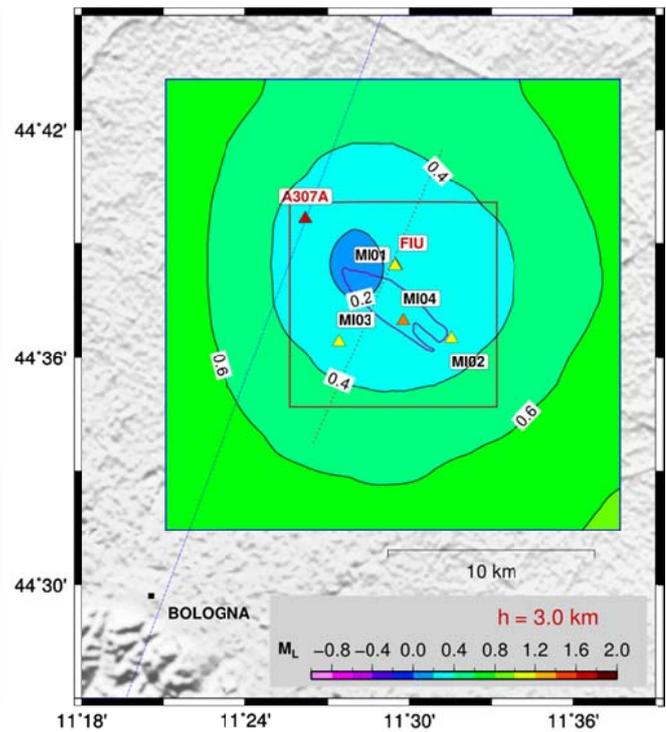
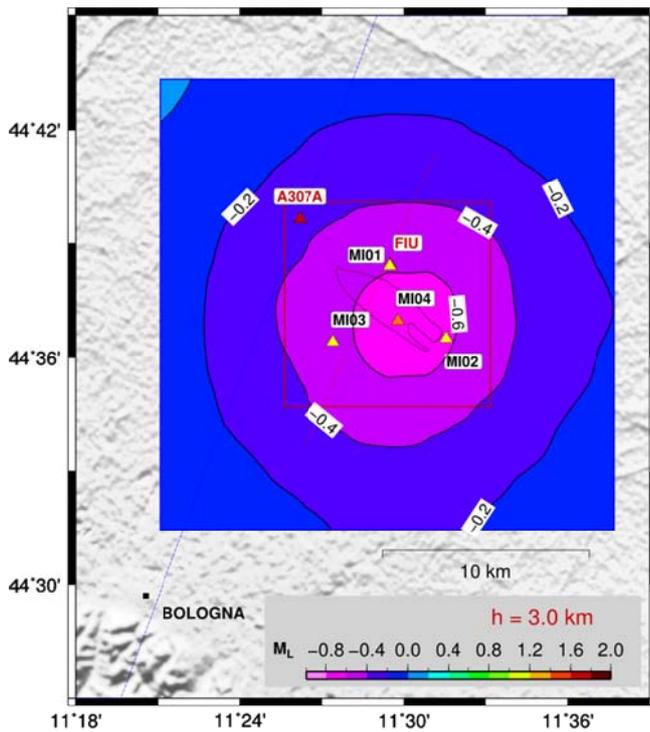
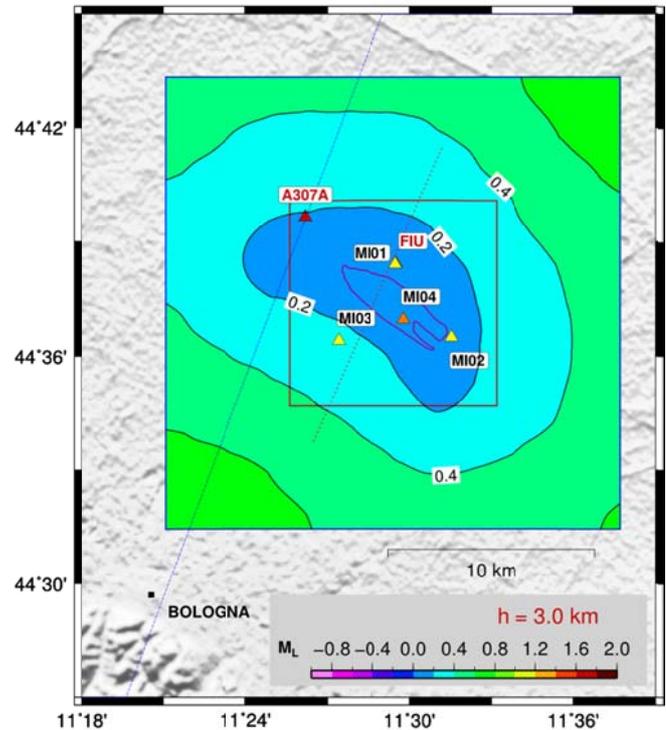


Figura 16. Soglia di detezione (riquadro in alto a sinistra) e di localizzazione (riquadri a destra) per eventi sismici localizzati alla profondità di 3.0 km, espressa in unità di magnitudo M_L . Per ogni stazione della rete microsismica attualmente operativa sono stati impiegati i livelli di rumore sismico ambientale osservati corrispondenti alla curva mediana della PDF calcolata con i dati registrati nelle ore notturne nel periodo Maggio 2015 – Dicembre 2016 (casi A2 e B2 di Tab.5). Le soglie di localizzazione sono state calcolate imponendo la detezione dell'evento sismico con almeno 4 (riquadro in alto a destra) o almeno 3 (riquadro in basso a destra) stazioni della rete (casi A2 e B2 di Tab.5, rispettivamente).



Risultati

I risultati ottenuti dalle simulazioni dei casi elencati in Tab.5 per le profondità di 1.5, 3.0, 5.0, 8.0 e 11.0 km e per le reti operativa e pianificata, sono sintetizzati in Tab.6. 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. Le mappe di localizzazione vengono mostrate da Fig.17 a Fig.21 per la rete operativa e da Fig. 22 a Fig. 26 per la rete pianificata.

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, corrispondente a localizzazioni meno precise, 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, la 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 rete pianificata, 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: 0.9 (alla profondità del giacimento), 1.0 (alla base del DI) e 1.2 (alla base del DE).

Le figure 27, 28 e 29 mostrano il confronto fra le mappe di localizzazione corrispondenti a diverse configurazioni di rete nei casi di rumore sismico sfavorevole (A1 e B1) per le profondità di 1.5, 5.0 e 11.0 km, rispettivamente. Si noti l'abbassamento di 0.4 unità della soglia di magnitudo di localizzazione alla base del Dominio Interno (5.0 km), che consente alla rete pianificata di coprire tutto DI con una magnitudo minima di localizzazione pari a 1.0 anche in condizioni di rumore sfavorevole (Fig. 28 - riquadri a sinistra). In un'ottica di sperimentazione degli ILG, vale comunque la pena di sottolineare che un risultato ancora più efficiente poteva essere ottenuto spostando le 3 installazioni previste in pozzetto per le stazioni MI07, MI08 e MI10, esterne a DI, nei siti attualmente occupati da MI01, MI02 e MI03.

Rete Operativa								
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
z = 1.5 km	1.02	1.43	0.80	1.11	0.22	0.55	0.09	0.41
z = 3.0 km	1.10	1.45	0.86	1.13	0.26	0.58	0.16	0.43
z = 5.0 km	1.27	1.49	0.93	1.16	0.37	0.62	0.26	0.48
z = 8.0 km	1.44	1.60	1.06	1.23	0.54	0.70	0.43	0.58
z = 11.0 km	1.60	1.69	1.20	1.31	0.62	0.80	0.60	0.69
Rete Pianificata								
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
z = 1.5 km	0.78	1.04	0.70	0.95	-0.06	0.19	-0.20	0.06
z = 3.0 km	0.83	1.07	0.75	0.98	0.02	0.22	-0.10	0.10
z = 5.0 km	0.94	1.12	0.88	1.04	0.09	0.29	0.00	0.16
z = 8.0 km	1.06	1.21	1.02	1.14	0.21	0.36	0.15	0.24
z = 11.0 km	1.20	1.28	1.20	1.23	0.31	0.42	0.20	0.33

Tabella 6. Reti operativa e pianificata. Valori medi delle soglie di localizzazione in unità di magnitudo M_L , calcolati per diverse profondità, z , nei casi di Tab. 5, 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.

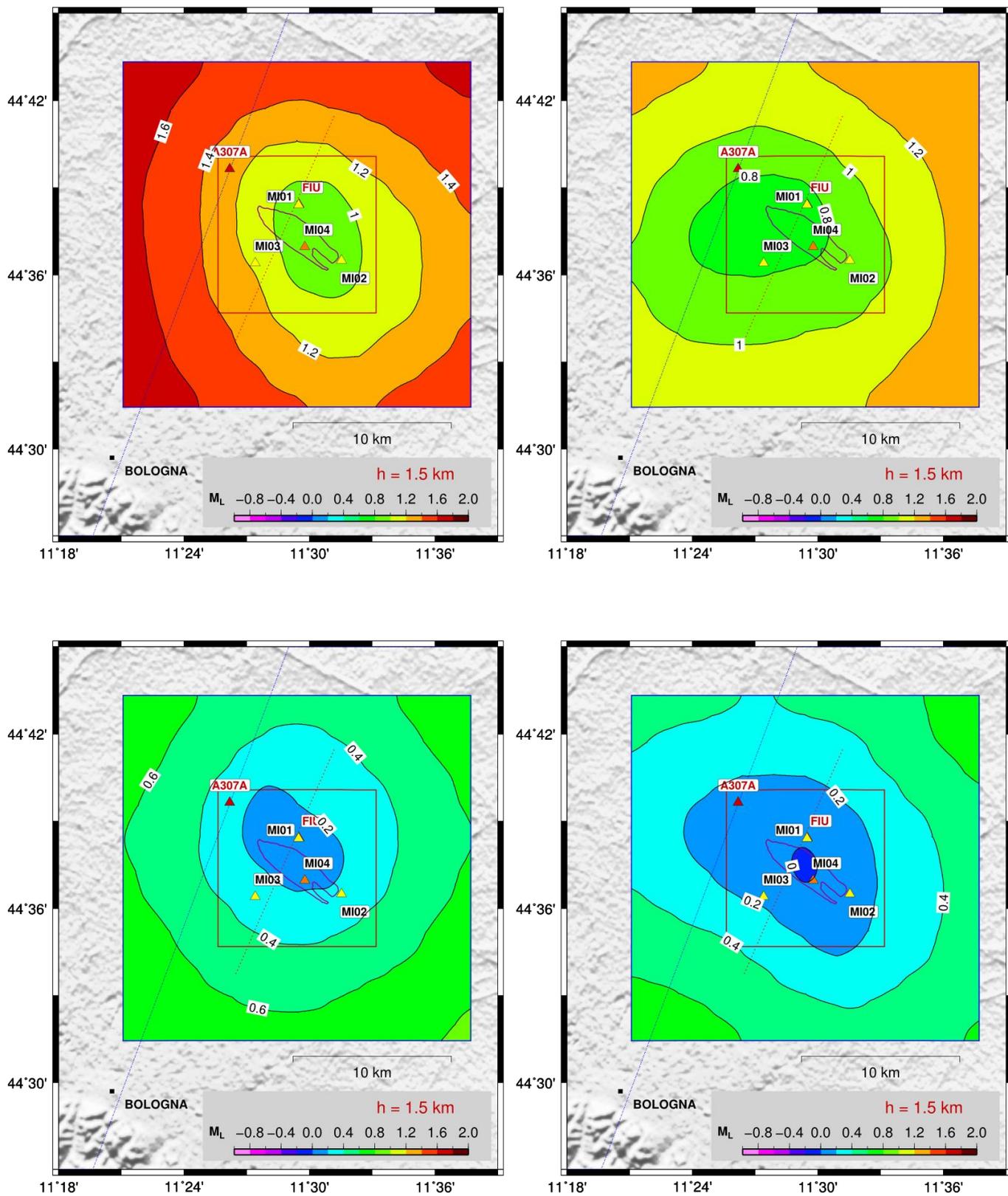


Figura 17. Rete operativa: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 1.5 km (profondità del *reservoir*). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

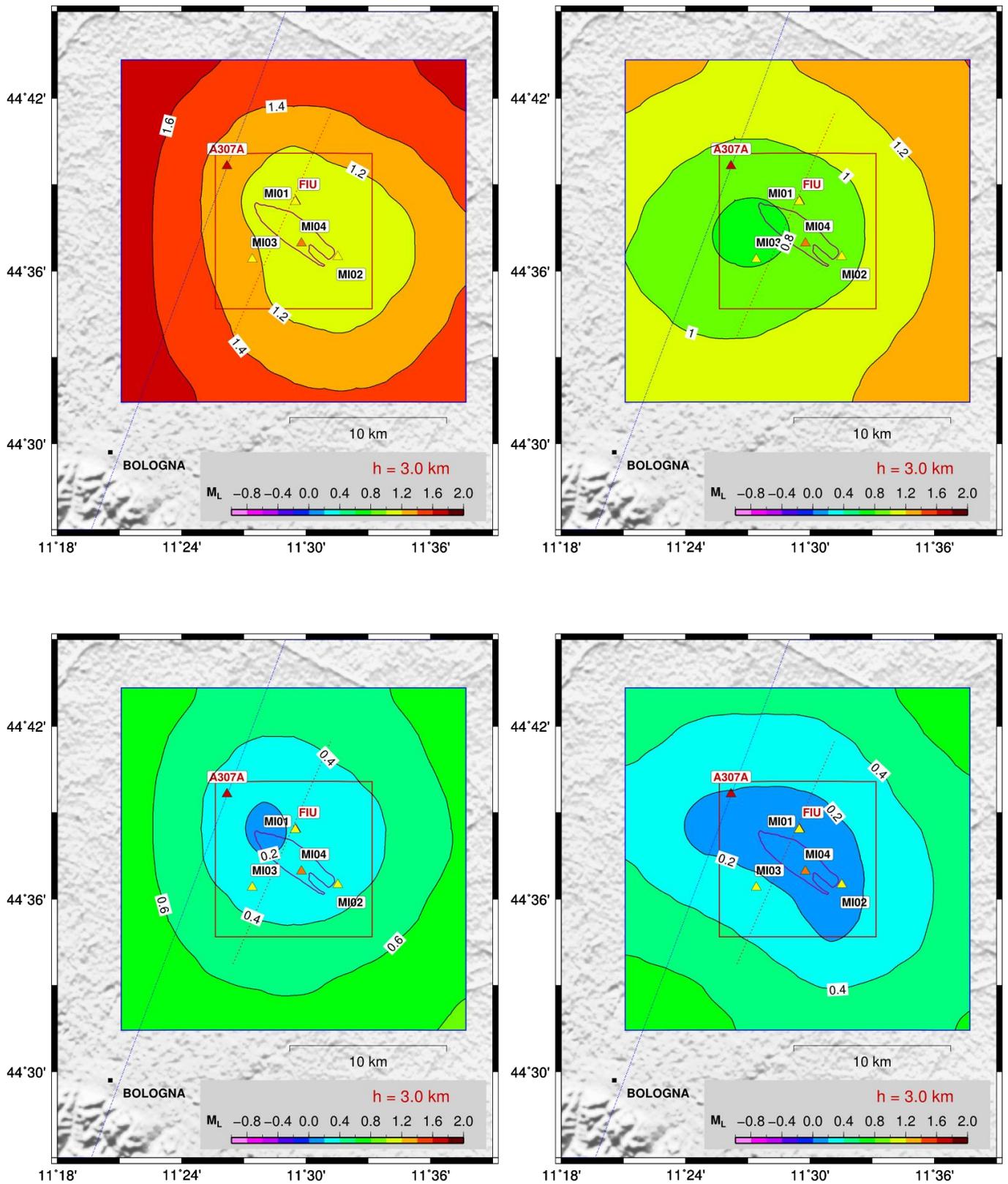


Figura 18. Rete operativa: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 3.0 km. In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

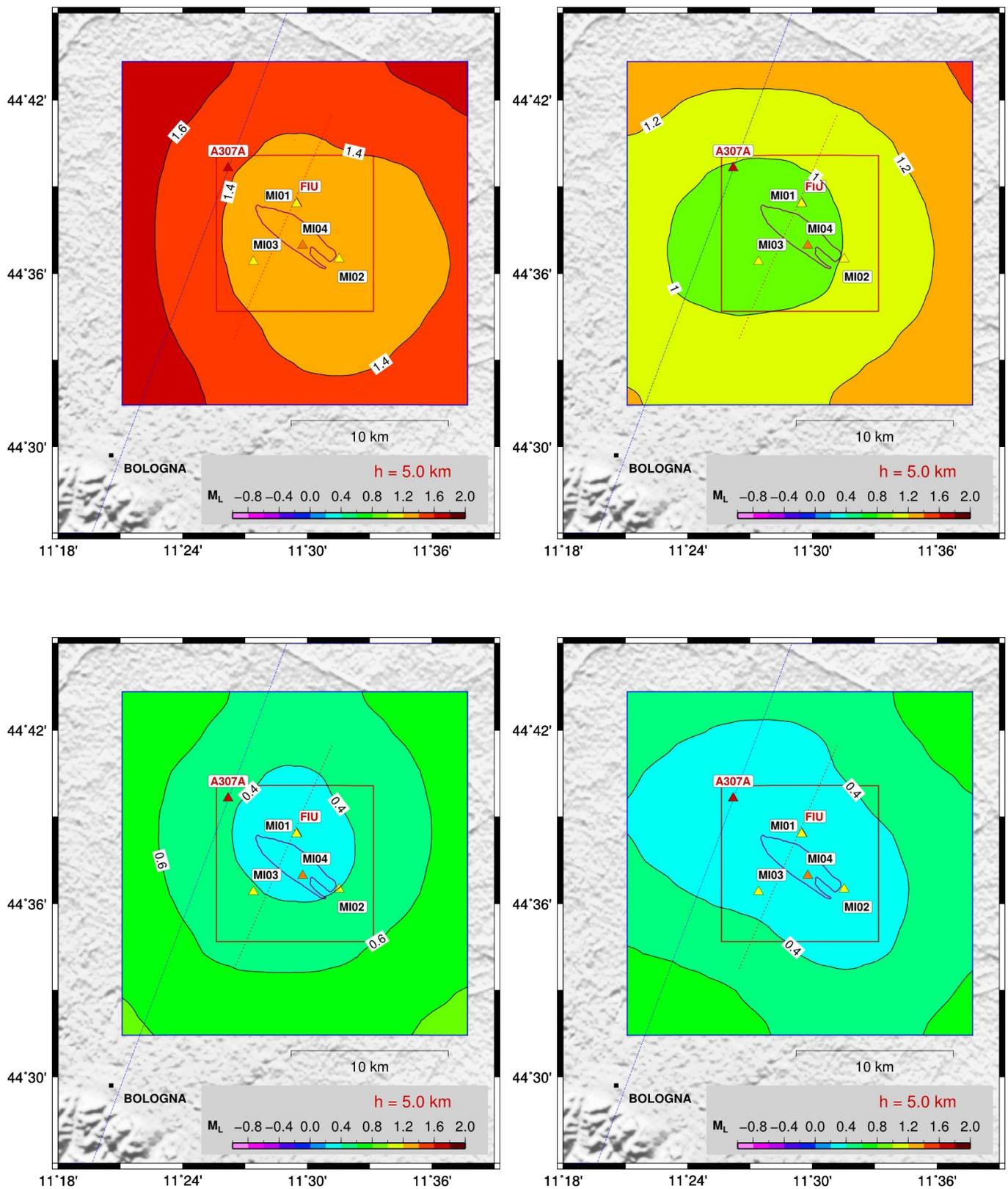


Figura 19. Rete operativa: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 5.0 km (DI - bottom). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

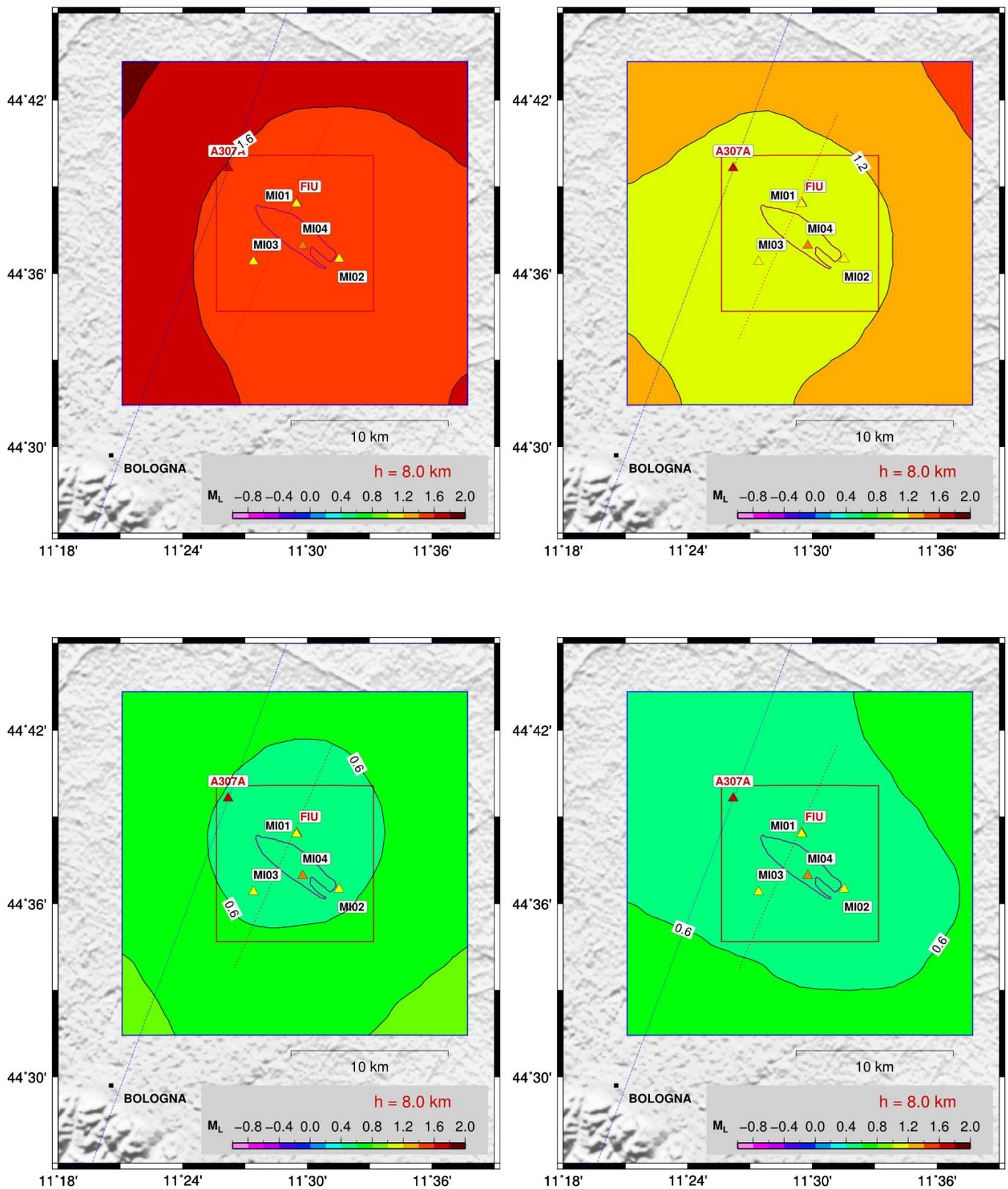


Figura 20. Rete operativa: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 8.0 km. In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

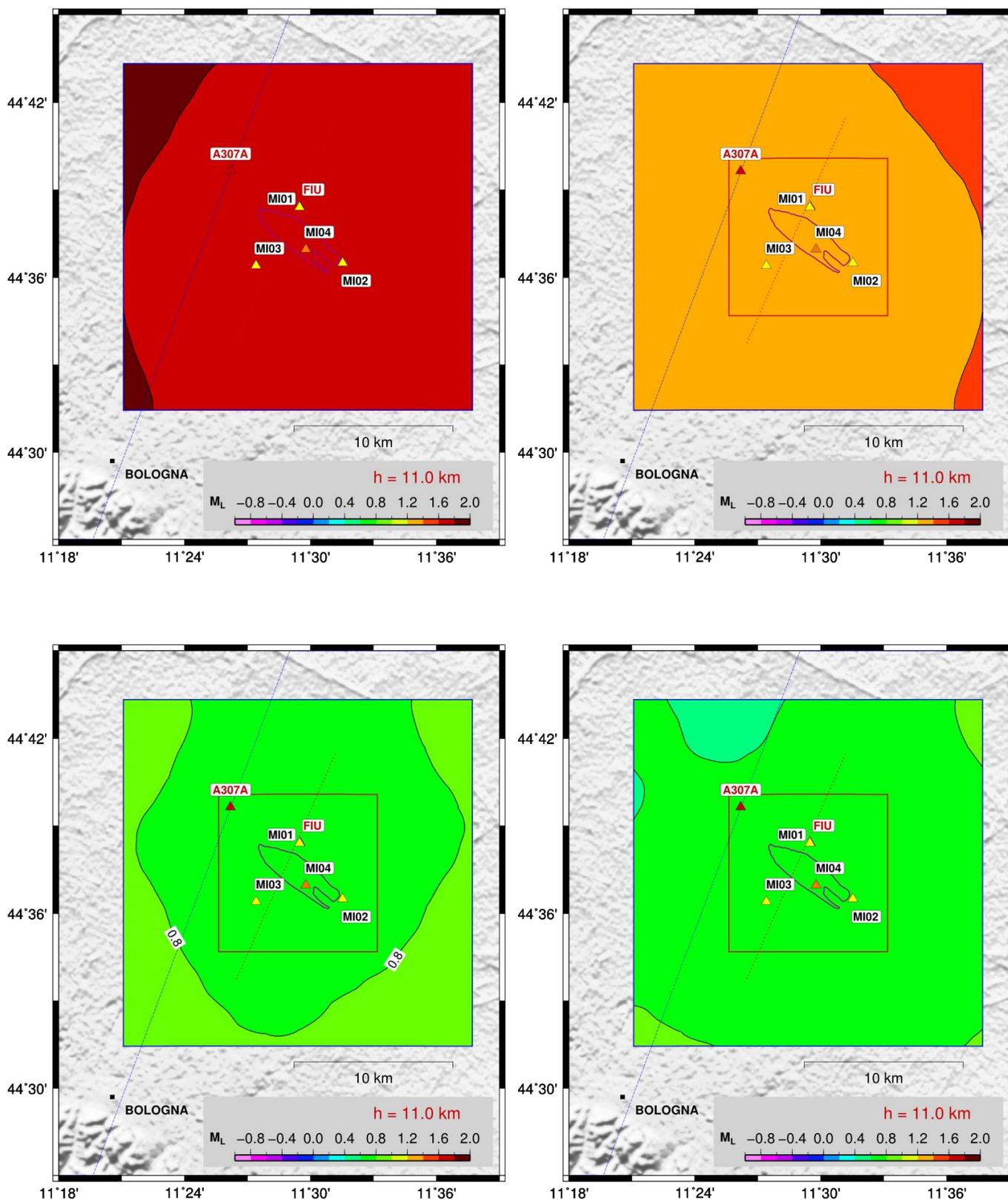


Figura 21. Rete operativa: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 11.0 km (DE – bottom). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

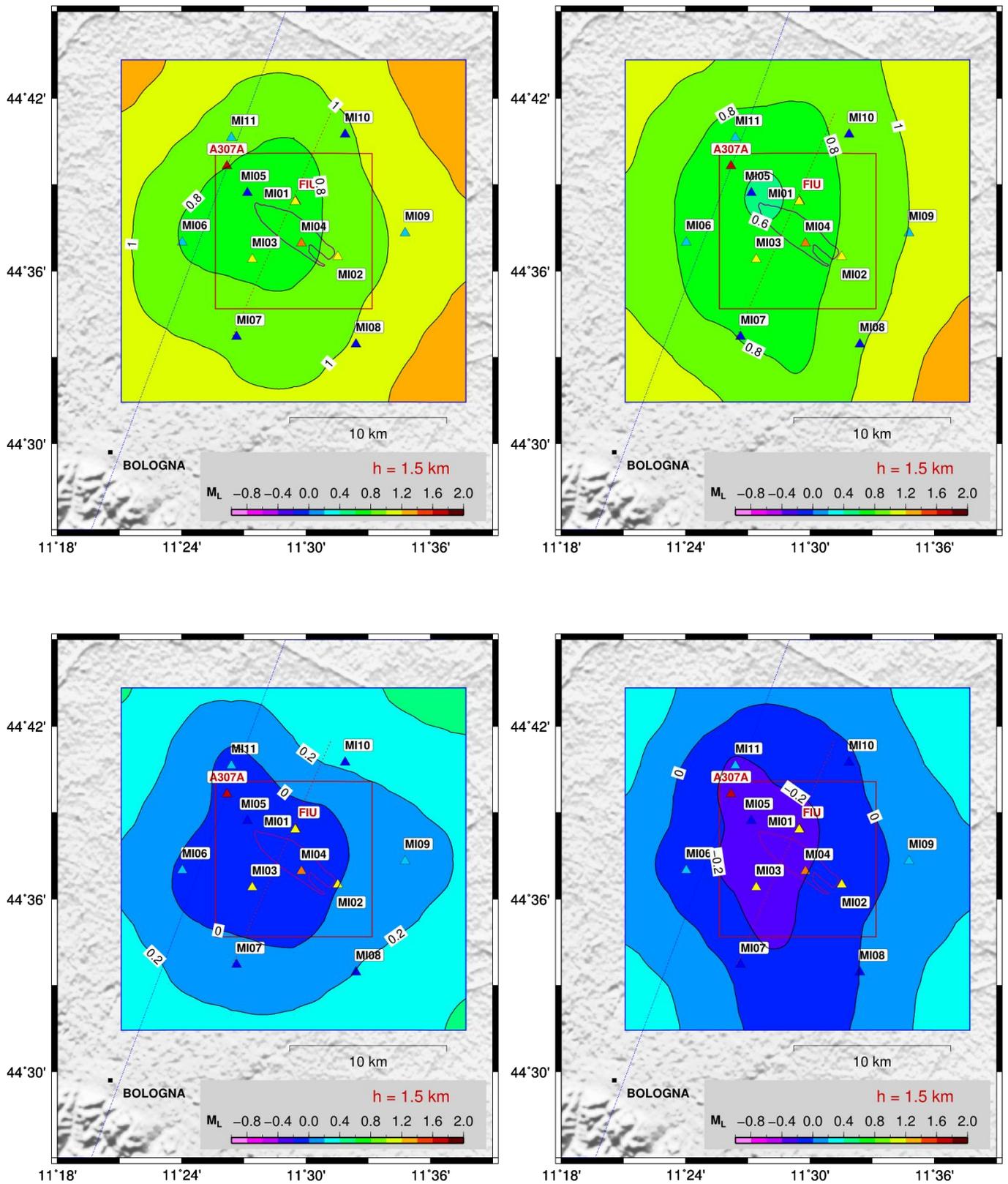


Figura 22. Rete pianificata: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 1.5 km (profondità del *reservoir*). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

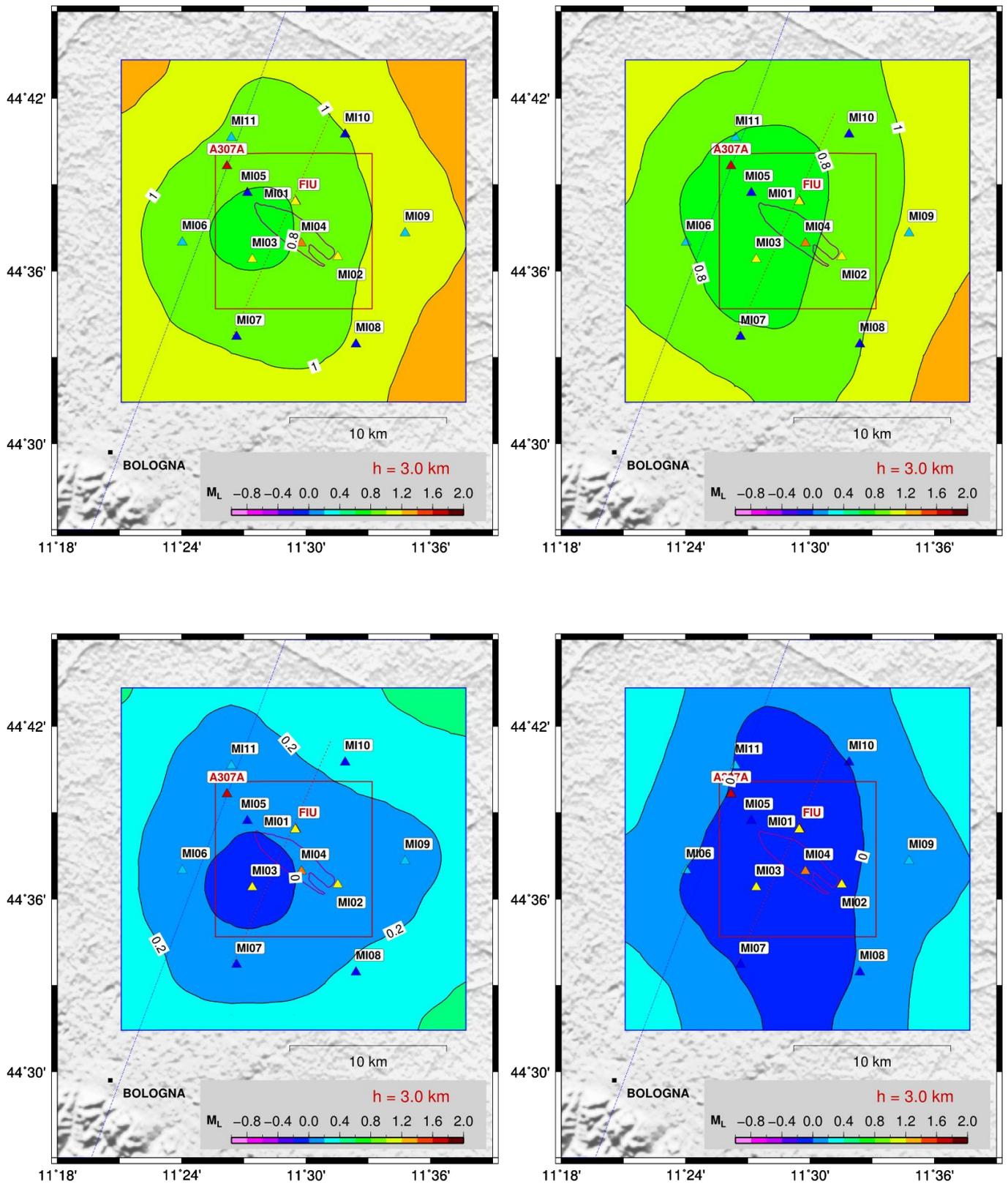


Figura 23. Rete pianificata: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 3.0 km. In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

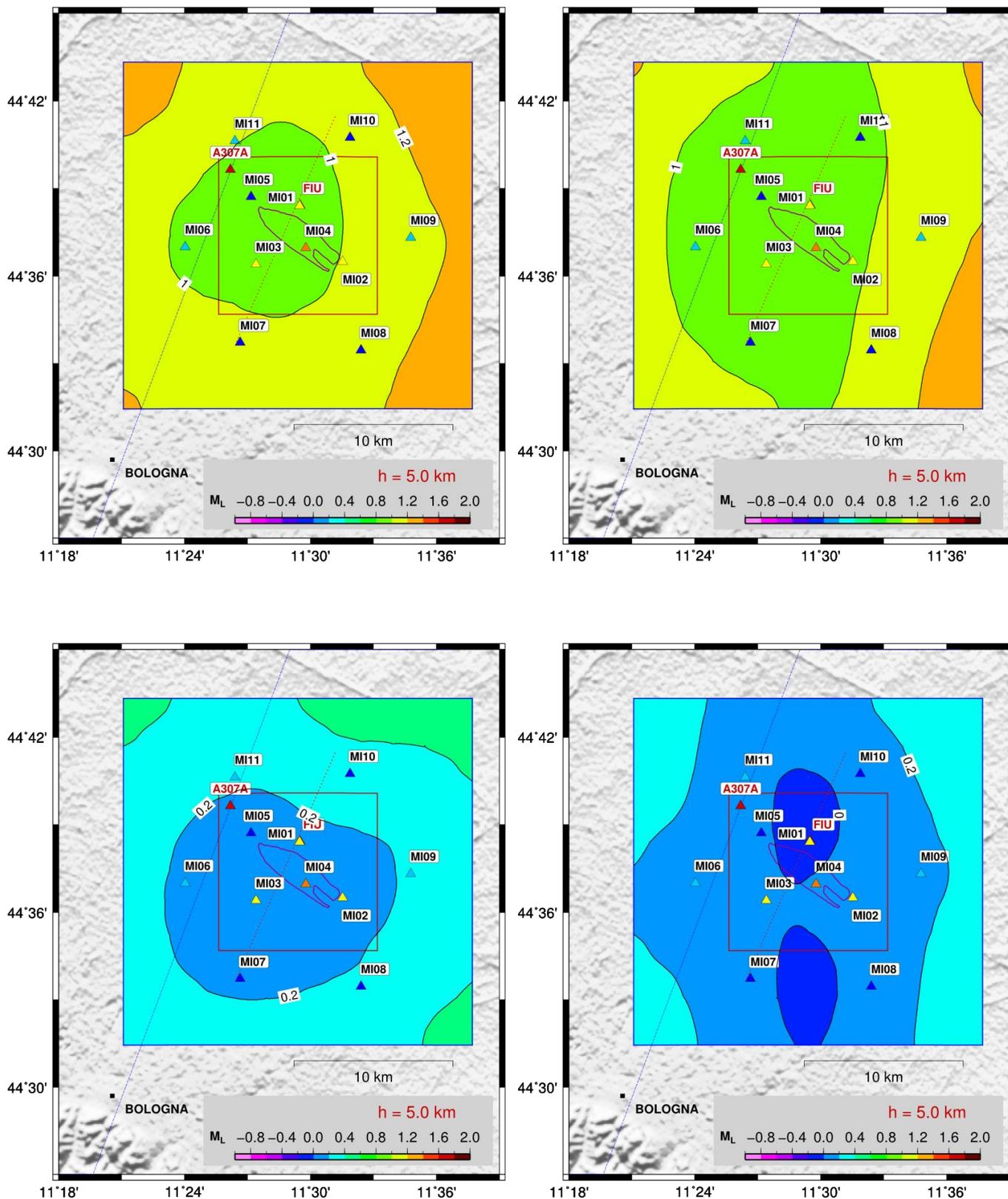


Figura 24. Rete pianificata: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 5.0 km (DI - bottom). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

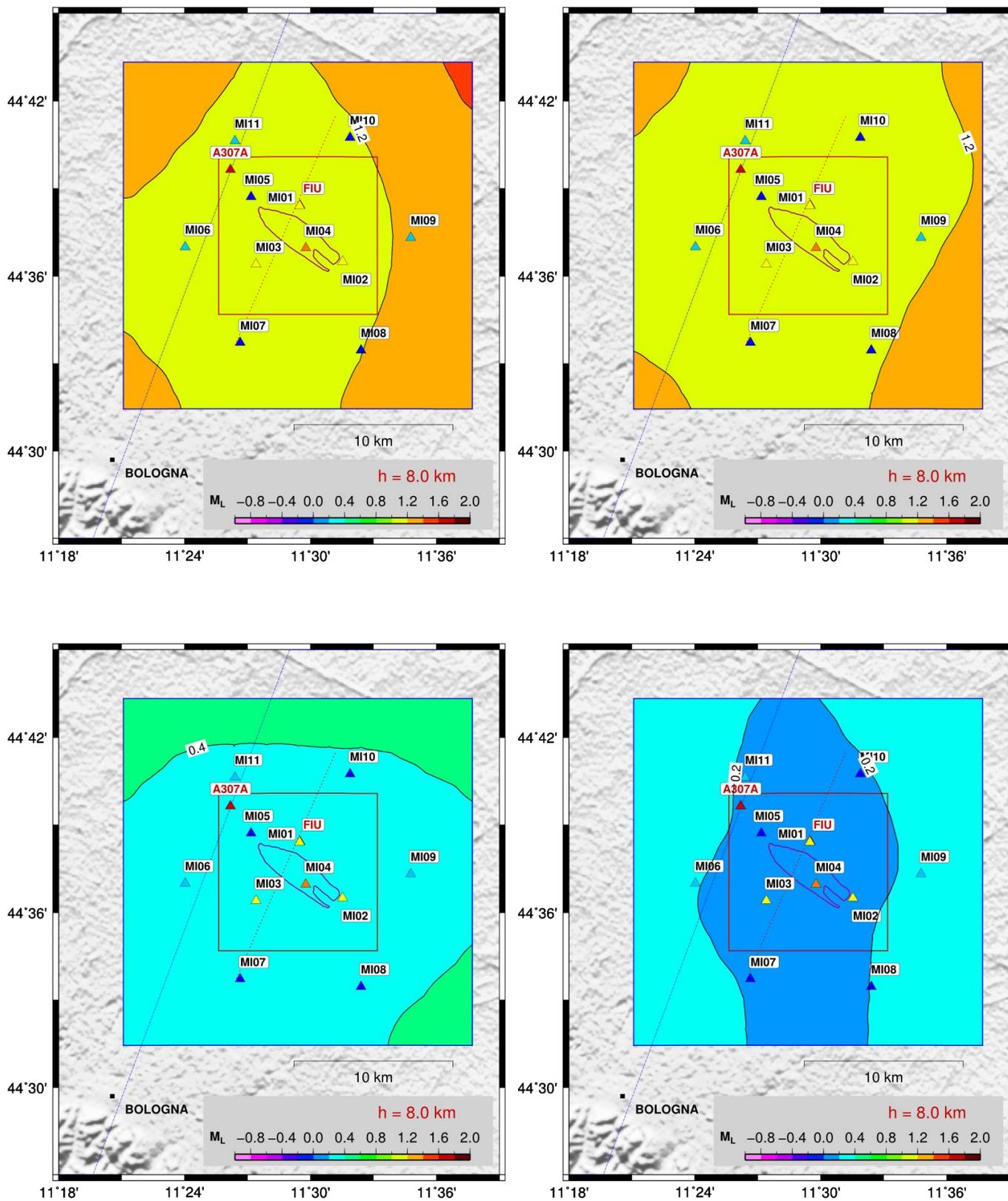


Figura 25. Rete pianificata: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 8.0 km. In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra), caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

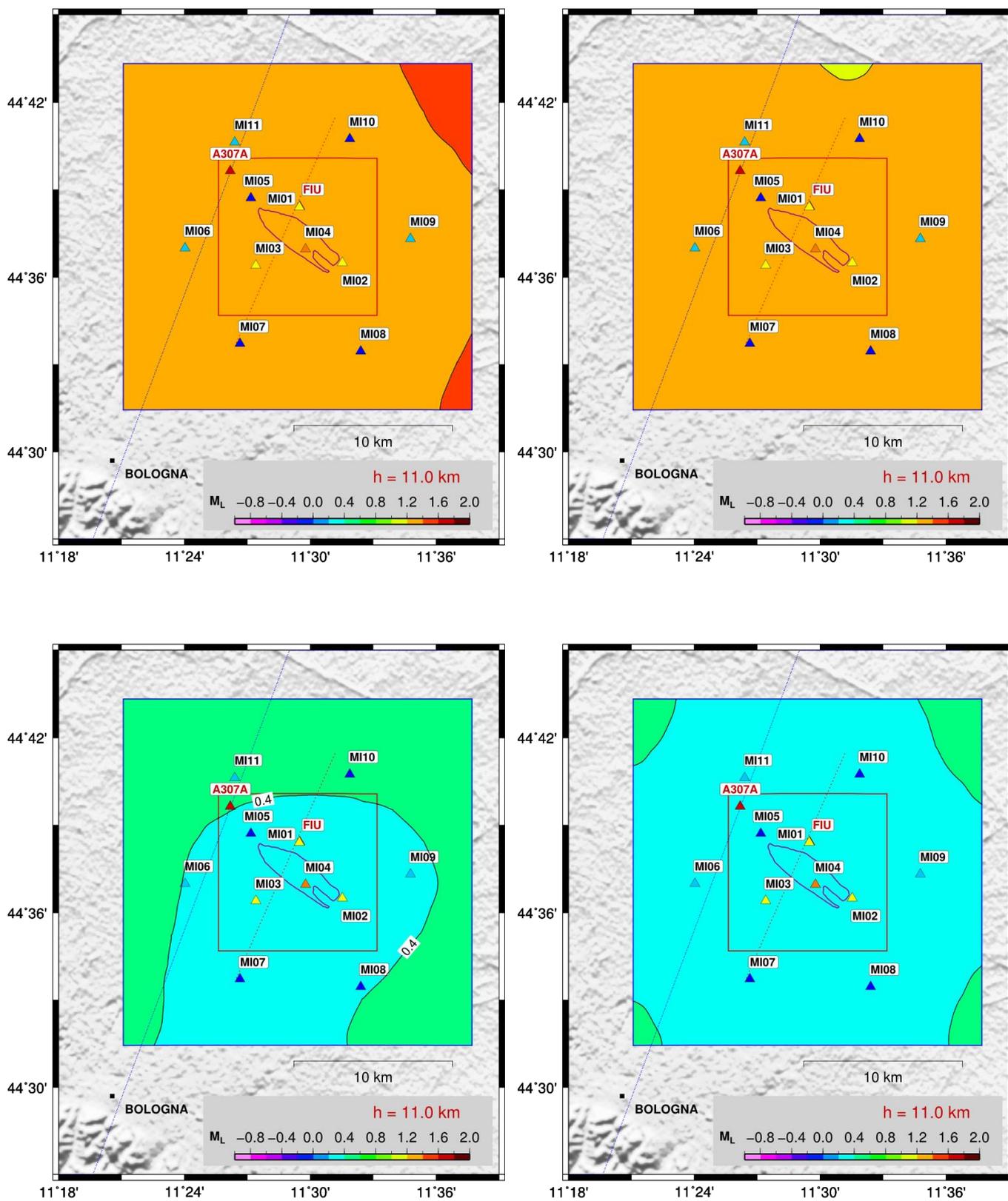


Figura 26. Rete pianificata: mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 11.0 km (DE – bottom). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (in alto a sinistra); caso B1 (in alto a destra); caso A2 (in basso a sinistra); caso B2 (in basso a destra).

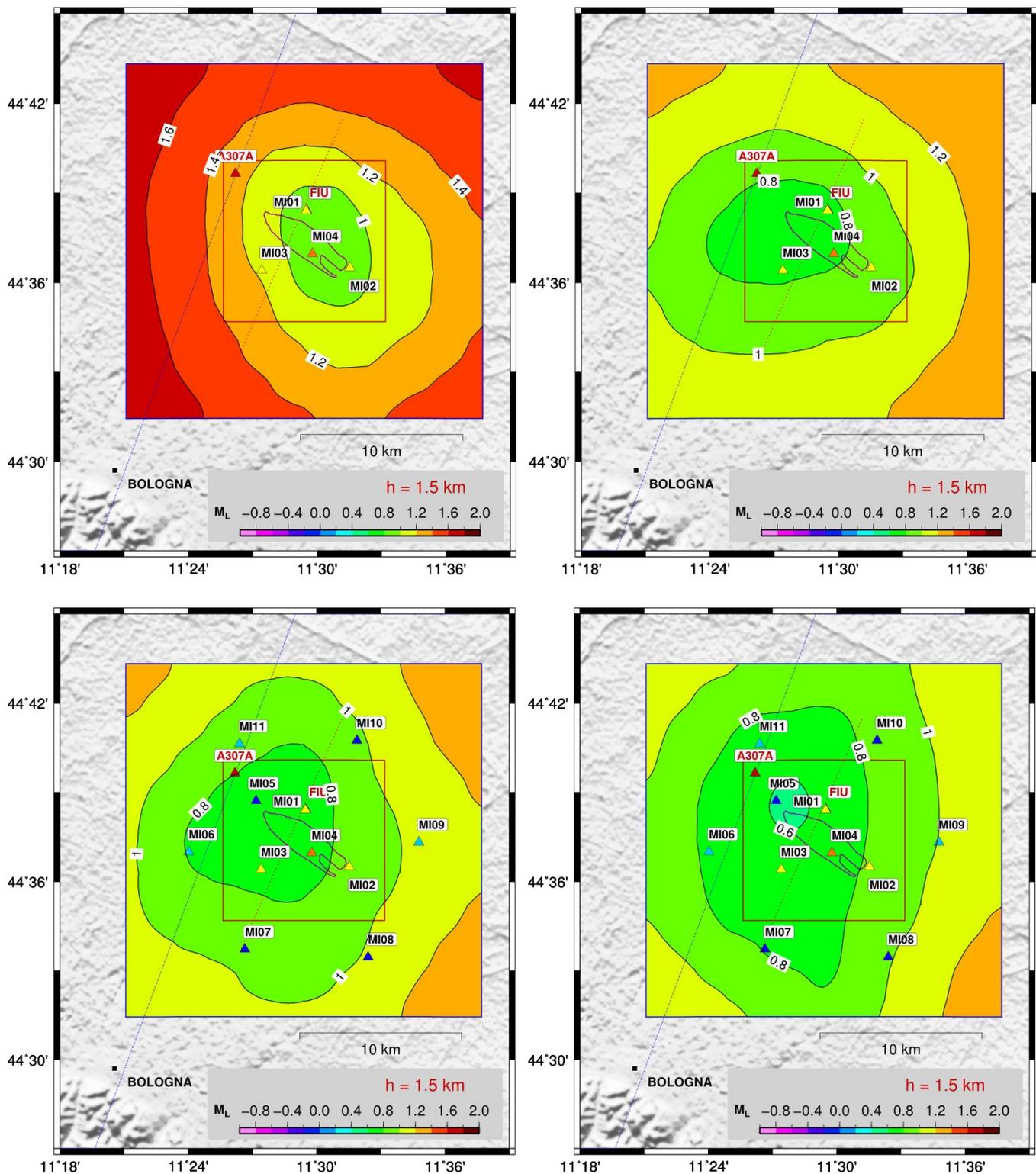


Figura 27. Rete operativa (riquadri superiori) e rete pianificata (riquadri inferiori): mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 1.5 km (profondità del *reservoir*). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (a sinistra), caso B1 (a destra).

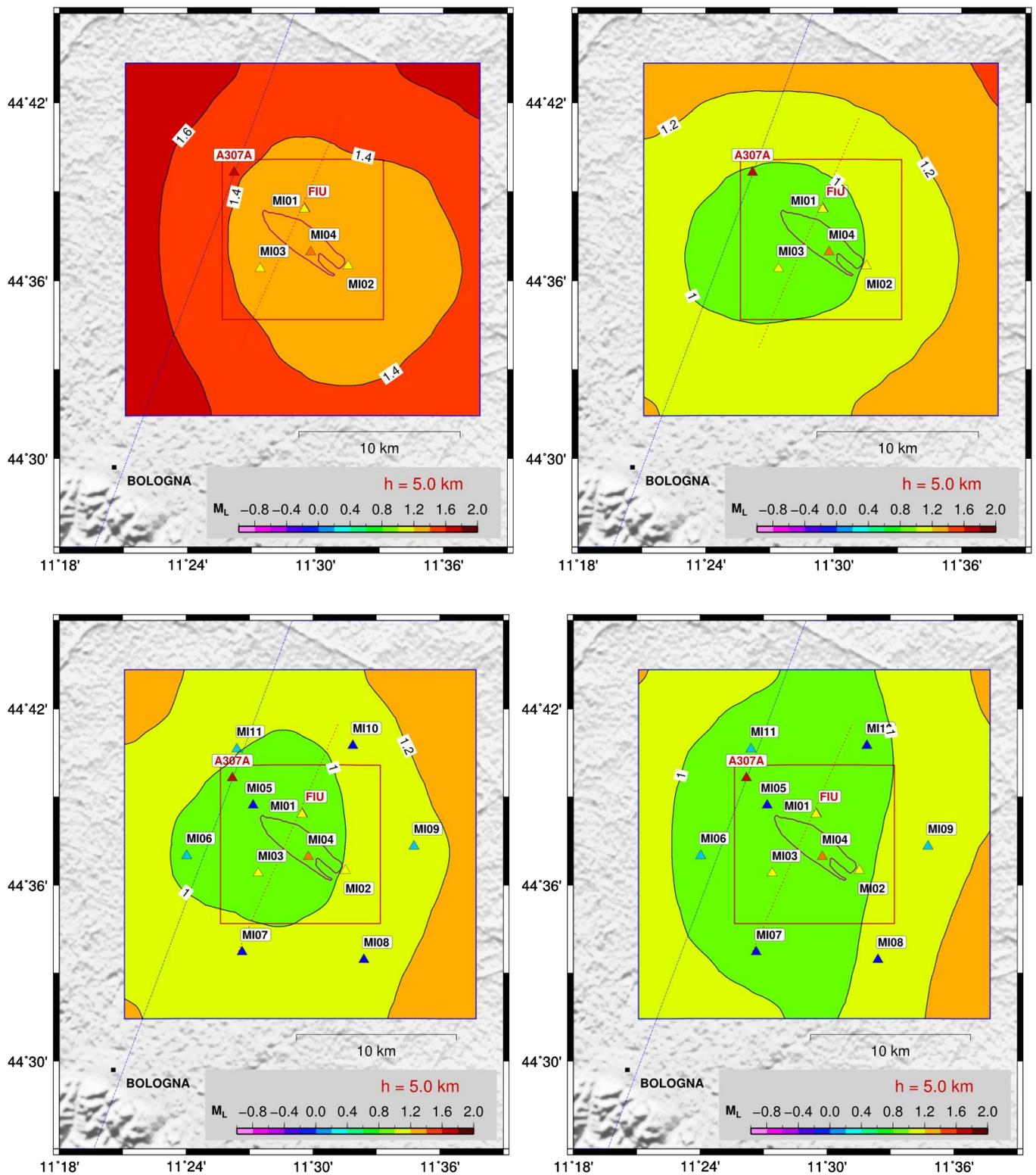


Figura 28. Rete operativa (riquadri superiori) e rete pianificata (riquadri inferiori): mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 5.0 km (DI - bottom). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (a sinistra), caso B1 (a destra).

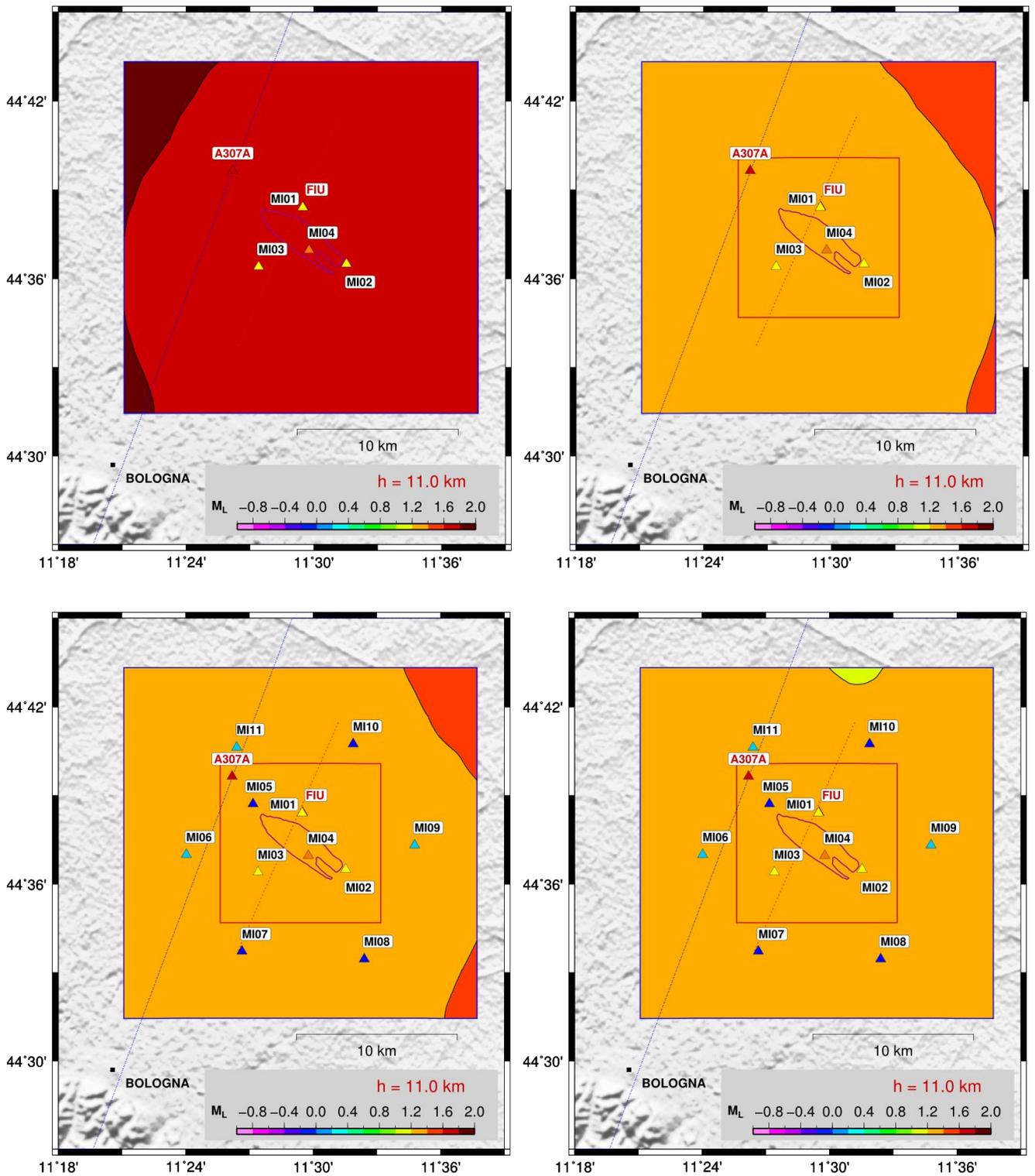


Figura 29. Rete operativa (riquadri superiori) e rete pianificata (riquadri inferiori): mappe di localizzazione, in termini di magnitudo M_L , per eventi sismici localizzati alla profondità di 11.0 km (DE – bottom). In riferimento alla Tab.5: caso A1 (a sinistra), caso B1 (a destra).

6. Conclusioni

Le analisi condotte da INGV-MI durante la fase di avvio dell'attività di sperimentazione degli ILG, prevista dal "Protocollo Operativo – Attività di Sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione *Minerbio Stoccaggio*", sottoscritto da MISE, RER e STOGIT S.p.A in data 5/5/2016 e avviato in data 11/7/2016, hanno evidenziato che:

- 1) La topografia del livello sommitale del Pool C (l'intervallo stratigrafico del campo di Minerbio adibito a stoccaggio) si estende su un'area approssimativamente ellissoidale di dimensioni $(2 \times 6) \text{ km}^2$ con linea di contatto GWC a 1370 m di profondità. In accordo con gli ILG, il Dominio Interno di rilevazione è stato perciò definito a partire dalla proiezione in superficie del punto centrale, C (coordinate: 44.623 N; 11.490 E) di tale topografia, considerando un volume crostale di $(10 \times 10 \times 5) \text{ km}^3$ la cui proiezione in superficie ($10 \times 10 \text{ km}^2$) risulta centrata attorno a C (Fig.5). Il Dominio Esteso è stato definito estendendo DI in ogni direzione di 6 km, per un volume complessivo pari a $(22 \times 22 \times 11) \text{ km}^3$ (Fig.5).
- 2) L'analisi del catalogo degli eventi sismici localizzati dalla rete microsismica "Minerbio Stoccaggio", installata dal Concessionario a partire dal 1979, mostra che durante tutto il periodo di funzionamento, la rete microsismica ha registrato molti più eventi di quelli che compaiono nel catalogo della RSN. Il catalogo fornito comprende 56 eventi sismici, di magnitudo locale compresa tra 0.3 e 3.2, la maggior parte dei quali (53) sono stati localizzati ad una profondità maggiore di 4 km (Fig.10). Mediante l'analisi delle forme d'onda registrate dalla rete e messe a disposizione dal Concessionario, nel corso della sperimentazione degli ILG, verranno effettuate ulteriori verifiche sulla sismicità rilevata, allo scopo di validare la stima della magnitudo e dei parametri di localizzazione.
- 3) Le analisi di rumore sismico ambientale effettuate con i dati delle 4 stazioni attualmente operative della rete microsismica "Minerbio Stoccaggio" forniti dal Concessionario e con le forme d'onda acquisite in tempo reale dalle 15 stazioni della RSN operanti nell'area, evidenziano, nella zona della concessione, livelli di rumore sismico ambientale piuttosto elevati, con valori di PSD paragonabili a quelli delle curve di riferimento High Noise Model di Peterson (1993). La stazione installata in pozzetto è caratterizzata 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.
- 4) In condizioni sfavorevoli di rumore ambientale, assunte corrispondenti al 90° percentile della PDF complessiva del PSD di rumore ambientale osservato, la rete attualmente operativa (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.6).
- 5) Con l'installazione della rete pianificata dal Concessionario (che comprenderà 7 stazioni in superficie e 5 in pozzetto), nelle stesse condizioni di rumore di cui sopra si potranno 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.6). In condizioni analoghe a quelle ipotizzate nel punto precedente, sarà possibile ottenere in DE soglie di localizzazione che vanno da 0.9 alla profondità del *reservoir* a 1.2 alla base del Dominio Esteso (cfr. Tab.6).
- 6) In condizioni di rumore sismico ambientale favorevole (assunte corrispondenti alla mediana della PDF misurata nelle ore notturne del PSD di rumore ambientale - casi A2 e B2), si ottiene in generale un notevole miglioramento della detezione, con abbassamenti delle soglie di localizzazione che possono arrivare anche fino a un grado di magnitudo.

L'attività di sperimentazione degli ILG continuerà nei prossimi mesi avendo come obiettivo prioritario il completamento della procedura per la produzione del bollettino sismico degli eventi localizzati dalla rete microsismica. A tal fine, sarà necessario completare la fase di acquisizione in tempo reale dei dati mediante l'integrazione delle stazioni della RSN, già collegate al nodo Seedlink realizzato presso INGV-MI,

con le 4 stazioni della rete microsismica attualmente operativa. In tal modo sarà possibile disporre di un archivio unico dei dati in continuo giornalieri di tutte le stazioni nel formato miniSEED. Verrà quindi completata la configurazione del software Earthworm, per il riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale e il calcolo della magnitudo e dei parametri ipocentrali, già installato presso il centro di acquisizione dati. Parallelamente, verranno analizzate le forme d'onda già registrate dalla rete microsismica, allo scopo di validare la stima della magnitudo e dei parametri di localizzazione.

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). Feasibility 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 (Northern 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.
- 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.
- Hanks T.C., Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale, *J. Geophysical Res.*, 84, 2348-2350.
- 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 (2017a). Italian Seismic Network, <http://cnt.rm.ingv.it/instruments/network/IV>
- INGV-CNT, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Centro Nazionale Terremoti (2017b). Lista Terremoti, <http://cnt.rm.ingv.it/>
- IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology (2016a). SeedLink, <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink>
- IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology (2016b). Data Formats, <https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/data/formats/>
- IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology (2016c). 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.

- MATTM, Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2013). Valutazioni Ambientali: VAS-VIA. Concessione Minerbio Stoccaggio – Ampliamento capacità di stoccaggio mediante incremento della pressione massima di esercizio (p_{max}) oltre la pressione statica (p_i) di fondo originaria del giacimento ($p_{max} = 1,07p_i$), <http://www.va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Info/1167>
- MATTM, Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2017). Decreto Ministro – Registrazione 0000055 del 14/03/2017, <http://www.va.minambiente.it/File/Documento/200297>
- 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>
- 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>
- STOGIT (2016). Rapporti “Rete Emiliana” 1979-2009 (Eni E&P) e bollettini annuali di interpretazione della microsismicità del periodo 2010-2016.
- USGS - United States Geological Survey (2016). PQLX: A Software Tool to Evaluate Seismic Station Performance, <https://earthquake.usgs.gov/research/software/pqlx.php>

