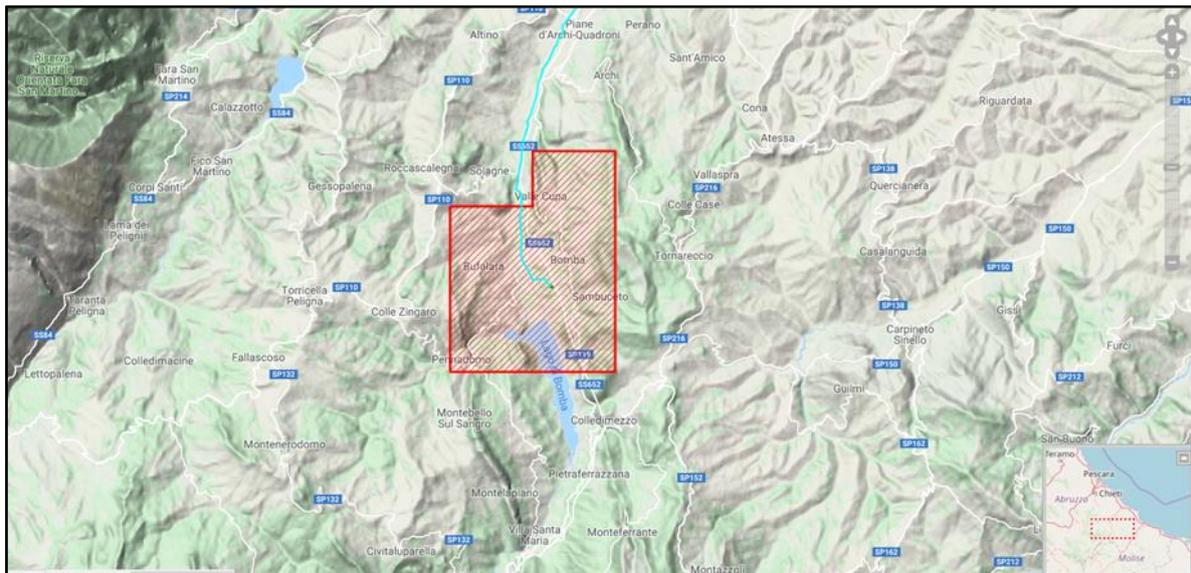


Concessione di coltivazione COLLE SANTO (CH)

Valutazione e Progettazione della rete di monitoraggio microsismico



INDICE

1. Introduzione – Obiettivi – Programma dello studio.....	3
2. Premessa	4
3. Valutazione della rete di monitoraggio ACEA.....	5
4. Progettazione ed ottimizzazione della rete di monitoraggio microsismico integrata.....	13
5. Considerazioni preliminari sulla strumentazione e l’operatività della Rete Microsismica su Colle Santo	18
6. Conclusioni – Suggerimenti per lavori futuri.....	20
7. Figure	22
8. Riferimenti bibliografici	35

1. Introduzione – Obiettivi – Programma dello studio

CMI Energia S.p.A. sta portando avanti il progetto di messa in produzione del giacimento di gas naturale sulla Concessione di coltivazione di idrocarburi denominata “Colle Santo”. La concessione si trova a terra ed è totalmente compresa nella Provincia di Chieti, in Abruzzo (Fig. 1).

Il reservoir si compone di carbonati organogeni fratturati di età Cretacica Superiore (Calcari di Monte Acuto), localizzati ad una profondità variabile fra 1,2 km e 1,5 km dal piano campagna.

La zona del giacimento, identificata durante le analisi geologiche preliminari e confermata dalle perforazioni esplorative, comprende l’area interessata dalla Diga di Bomba. Tale diga, costruita in terra alla fine degli anni ’50, sbarrava il corso del fiume Sangro per fini di produzione di energia elettrica. La diga è gestita da parte della Società ACEA.

Nell’ambito degli studi di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), sono stati definiti i Domini Interno ed Esteso (compatibilmente con le indicazioni delle Linee Guida MISE/DGS/Unmig, 2014 – Da qui in poi riferiremo a questo documento come “**Linee Guida MISE**”). Inoltre, ai fini del monitoraggio della zona della diga ed in particolare della sua subsidenza, state pianificate una serie di stazioni GPS, interferometria SAR ed anche una rete composta da 8 stazioni microsismiche (Fig. 2).

Gli obiettivi di questo studio sono i seguenti:

1. In una prima fase si vuole valutare, tramite apposite simulazioni, la qualità della rete microsismica progettata per il monitoraggio della Diga di Bomba, in termini di monitoraggio microsismico del giacimento e quindi in termini di potenziale di detezione e localizzazione di eventi sismici all’interno del Dominio Interno e Dominio Esteso, così come definiti dalle Linee Guida dagli studi precedenti. Nell’ambito dell’analisi, si vuole considerare la possibilità di includere i dati provenienti dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale esistenti in prossimità della Concessione.
2. In una seconda fase, qualora la geometria della rete microsismica valutata in Fase 1 non rispondesse pienamente alle esigenze di monitoraggio delle zone relative ai Domini di cui sopra, si vuole valutare la possibilità di un design di rete alternativo, tramite integrazione di stazioni supplementari ed ottimizzazione di quelle già esistenti.
3. Una fase di conclusioni, raccomandazioni sulle tecnologie di monitoraggio ad oggi disponibili e di suggerimenti per le attività future completerà lo studio.

2. Premessa

Un gran numero di documenti e Rapporti sono stati prodotti in passato a corredo dei vari studi eseguiti nell’ambito delle attività di gestione della Concessione in oggetto. Una lista della documentazione a noi resa disponibile è fornita al Capitolo 8, alla fine di questo rapporto.

Ai fini di questo studio specifico, dunque, si ometterà volontariamente tutta la parte relativa all’inquadramento sismo-tettonico dell’area in oggetto e sulle generalità relative alla sismicità indotta dalle operazioni di coltivazione. Questo argomento è stato oggetto di uno studio recente di ottima fattura (Scrocca, 2017).

Si ometteranno analogamente tutte le considerazioni sugli studi precedenti, per esempio sul design della rete microsismica proposta da ACEA (da qui in avanti, per ragioni di semplicità, sarà usato il termine “**Rete ACEA**”) per il monitoraggio della Diga di Bomba (2010), oppure sulle considerazioni generali sulle tecniche di simulazione, modellizzazione e di elaborazione di dati microsismici nel quadro del monitoraggio microsismico (CMI Energia – Dream, 2017).

3. Valutazione della rete di monitoraggio ACEA

3.1. Introduzione – Obiettivi e requisiti della rete di monitoraggio

Si ricordano qui di seguito gli obiettivi generali di una rete di monitoraggio microsismico, seguendo le definizioni e requisiti stabiliti nelle Linee Guida MiSE, 2014.

Nel Dominio Interno:

- Rilevare eventi sismici con Magnitudo Locale compresa fra 0 ed 1
- Localizzare gli eventi con incertezza inferiore ad alcune centinaia di metri

Nel Dominio Esteso:

- Migliorare di 1 unità la magnitudo di completezza dalla RSN
- Incertezza massima di localizzazione dell'ipocentro di circa 1km

Si richiede inoltre la possibilità di integrare i dati della rete locale con quelli della Rete Sismica Nazionale.

Inoltre, si aggiunge che, per l'Operatore, una rete microsismica locale può essere molto utile per analizzare scientificamente fenomeni sismici che potrebbero erroneamente essere attribuiti alle attività di estrazione.

Infine, una rete di questo tipo deve essere robusta, con attività di manutenzione ridotte al minimo indispensabile ed anche semplice da operare da parte della Società Operatrice e dei suoi tecnici.

3.2. Analisi delle stazioni della Rete Sismica Nazionale e del rumore ambientale locale

A partire dalle informazioni pubblicate dagli Enti competenti (INGV), si sono selezionate una serie di stazioni nell'intorno della Concessione di Colle Santo (Fig. 3).

Le stazioni sono state selezionate per avere una copertura azimutale completa attorno alla zona di coltivazione. Le stazioni sono posizionate a distanze variabili da un minimo di 14 km ad un massimo di 57 dal centro della zona di coltivazione.

Si sono recuperati dati di alcune stazioni (laddove disponibili) per procedere ad un'analisi del rumore ambientale locale, la cui definizione è fondamentale per definire un quadro realistico durante le simulazioni successive. Il rumore ambientale è infatti un fattore fondamentale durante le operazioni di modellizzazione che saranno descritte al paragrafo successivo.

I dati di tre stazioni (IV.LPEL; IV.FRES; IV.TRIV) sono stati scaricati in due periodi di riferimento, in Aprile e in Ottobre, per avere un quadro sulla stagionalità del rumore. Per ciascun periodo si sono scaricati i dati su un lasso di tempo di 15 giorni, per avere un'informazione sulla variabilità giornaliera. Si sono calcolati e gli spettri di potenza seguendo la metodologia di Peterson (1993) ed in seguito le medie orarie per frequenze specifiche definite. Un esempio di tale analisi è fornito in Fig. 4.

L'analisi di questi dati ha permesso di quantificare in maniera oggettiva le soglie di rumore che si possono prevedere nell'area di Colle Santo. Si sono osservati livelli di rumore ambientale di media intensità, con un incremento verso le zone costiere. Si è notata una variabilità fra giorno e notte su tutte le stazioni ed una scarsa o nulla variabilità stagionale, in relazione ai periodi considerati.

In conclusione, delle analisi sul rumore ambientale, si sono potuti definire due scenari realistici di rumore ambientale, da utilizzare per le simulazioni seguenti di detezione e localizzazione di eventi microsismici, come segue:

- Scenario «rumoroso», 90° percentile: PSD = -115dB (m²/s⁴/Hz)
- Scenario «medio», 50° percentile: PSD = -126dB (m²/s⁴/Hz)

3.3. Modellizzazione microsismica sulla rete ACEA

3.3.1. Metodologia

L’obiettivo della modellizzazione è quello di simulare eventi sismici di magnitudo non particolarmente elevata ($ML = 0 \div 3$), in cui lunghezza e larghezza della superficie di faglia risultano confrontabili. Terremoti di moderata magnitudo presentano valori di $\Delta\sigma$ compresi nello stretto range 1-10 MPa (D’Alessandro et al., 2010). Si assume $\Delta\sigma = 1$ MPa come valore rappresentativo della caduta di sforzo di eventi sismici di magnitudo inferiore a 3.0. Per questi motivi, è stato adottato il modello a sorgente puntiforme di Brune (1970; 1971), grazie al quale si calcola lo spettro di Fourier in velocità β delle onde S registrate a distanza ipocentrale R dalla sorgente, secondo le relazioni:

$$V(f) = \frac{CM_o}{R} \frac{2\pi f}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} e^{\left(\sum \frac{-\pi R_i}{\beta_i Q_{o_i}}\right)} e^{(-k\pi f)}$$
$$f_c = \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{8.47M_o}\right)^{1/3} \quad C = \frac{F_S R \theta \omega}{4\pi \rho \beta^3} \quad (1)$$

ove la costante C dipende dalla velocità β , dalla densità del mezzo, ρ , dal fattore di forma della radiazione, $R\theta\omega$ e dal fattore F_S che rappresenta l’amplificazione di superficie libera.

Lo spettro in velocità dell’evento simulato viene confrontato con i livelli di rumore ambientale ottenuti dalle PPSD (Probabilistic Power Spectral Densities, Fig. 4 nel caso dello studio in oggetto), opportunamente convertite. Un evento è identificabile solo se il rapporto segnale rumore è maggiore di un valore soglia ($SNR > 3-5$, Fig. 5)

L’attenuazione viene parametrizzata utilizzando un fattore di qualità $Q(f)$ dipendente dalla frequenza secondo la relazione $Q(f) = Q_0 f$ (Lay e Wallace 1995) e il parametro k di decadimento spettrale (Anderson e Hough, 1984).

Per la sorgente si utilizza un modello di faglia circolare di raggio R sulla quale agisce uno stress di taglio impulsivo. La dimensione del raggio di faglia R è determinata dalla Magnitudo locale che si vuole considerare tramite il momento sismico scalare $M_o = 10^{(1.5ML+9.1)}$ e dallo Stress Drop statico $\Delta\sigma$ (Madariaga, 1976, Hanks and Kanamori, 1979).

Un evento è considerato localizzabile quanto viene identificato da un certo numero di stazioni (≥ 4 , Fig. 5). Maggiore è il numero di stazioni che rilevano l’evento, più è stabile e precisa è la localizzazione.

3.3.2. Parametrizzazione modello microsismico

Per quanto riguarda la parametrizzazione del modello in V_p , V_s e Q , si sono utilizzate diverse fonti di informazione come le relazioni geologiche e gli schemi strutturali locali sul giacimento ma anche le informazioni provenienti da pubblicazioni regionali e valori presi da fonti bibliografiche. Citiamo a questo riguardo:

- Chiarabba 1996, 1997, Annals of geophysics;
- Romano et al., 2009, Convegno annuale dei progetti sismologici, session S1;
- Coccia et al., 2010, J.App.Geoph;
- Valoroso et al., 2011, J.Geoph.Res.;
- Bourbié, Coussy and Zinszner, 1992, Acoustic of porous media, Gulf Publishing Company.

In Fig. 6 viene fornito lo schema strutturale locale (per riferimento sugli spessori utilizzati) e una tabella riassuntiva dei valori utilizzati per i diversi parametri.

3.3.3. Stima dell’incertezza di localizzazione

La modellizzazione descritta ai paragrafi precedenti fornisce una quantificazione teorica delle soglie di detezione e localizzazione degli eventi sismici per il modello utilizzato. Tali risultati, però, non tengono conto degli errori (o delle incertezze) intrinseci alle limitazioni tecniche delle metodologie utilizzate quando ci si trova a trattare dati reali, come ad esempio:

- Gli errori nelle procedure (automatiche o manuali) di elaborazione dei dati, quali ad esempio gli errori sull’identificazione dei tempi di arrivo delle fasi P e S (identificazione e picking delle fasi corrette), in particolare per eventi di piccola magnitudo ($M_L < 1$).
- Le imprecisioni del modello geofisico: la conoscenza del sottosuolo è limitata, in ambienti complessi come quello appenninico i parametri fisici e le geometrie reali delle formazioni sono estremamente difficili da identificare con accuratezza.
- L’orografia accidentata, che complica ulteriormente il quadro, aumentando ad esempio le incertezze sulla distanza sorgente-ricevitore ed anche la probabilità di esistenza di modi di propagazione molto più complessi che quelli simulati.

Tali errori ed incertezze si traducono in incertezze di localizzazione degli eventi, che possono essere quantificate tramite una modellizzazione diretta di tempi di arrivo di onde sismiche P e S, originate da posizioni note (“posizioni trial”), su cui vengono addizionati degli errori aleatori sui tempi di arrivo. A tale modellizzazione diretta si fa seguire una procedura di rilocalizzazione classica.

Nel caso specifico, si sono stabilite 9 posizioni trial, disposte approssimativamente a 90°, di cui una parte allineate sul lineamento ACBT (Abruzzo Citeriore Basal Thrust, Scrocca, 2017) e coprenti sia la zona mineralizzata che i Domini Interno ed Esteso e situate a profondità variabili fra livello del mare e 3km di profondità (Fig. 7).

Le incertezze sulla stima dei tempi di arrivo sono state definite seguendo le indicazioni contenute in Stabile et al., 2009, che a sua volta fa riferimento a precedenti valutazioni degli errori di picking e dei residui per reti locali e regionali (Steck et al. 2001, Zeiler, 2009). Le

incertezze sui tempi di arrivo in particolare aumentano al diminuire del rapporto segnale-rumore (SNR), sono cioè maggiori al diminuire dell'intensità degli eventi. In questo studio, considerando eventi di piccola intensità e dunque con SNR pari o minore di 5 (eventi indicativamente con magnitudo locale M_L pari o inferiore a 0.5) sono stati utilizzati dei valori di incertezza campionati da una gaussiana con deviazione standard pari a 0,2s sia per le fasi P che per le S. Questo valore comprende sia le incertezze di picking sia quelle sui tempi di transito. Il valore utilizzato è inferiore a quello utilizzato da Stabile et al., 2009 (si veda la loro Tab. 4) perché la rete qui considerata è di tipo locale, ovvero gli epicentri di interesse sono situati ad una distanza inferiore ai 10km dalle stazioni e dunque i tempi di transito sono più brevi.

Una volta calcolati i tempi di arrivo P ed S con gli errori associati, si è in seguito proceduto all'inversione della posizione degli ipocentri ed al calcolo delle regioni di incertezza.

La simulazione qui descritta, puramente cinematica, è ovviamente una semplificazione non solo dei fenomeni reali ma anche delle procedure operative che si mettono in atto durante la gestione di reti microsismiche. Nella pratica, infatti, per migliorare la localizzazione ed ottenere valori minori di incertezza, quello che viene fatto, è osservare sciame (sequenze) di piccoli eventi nel loro complesso, e (1) migliorare la stima dei tempi di arrivo tramite cross-correlazione delle tracce e (2) fare una rilocalizzazione congiunta tramite il metodo delle doppie differenze, che consente di trascurare gli errori sul modello di velocità e sui tempi di transito (dovuti all'orografia). Sarà possibile verificare l'applicabilità di tali tecniche alla specifica rete di monitoraggio microsismico per la concessione di Colle Santo solo con la messa in opera della Rete e con i risultati dei primi mesi di monitoraggio in situ.

3.3.4. Risultati modellizzazione sulla rete ACEA

In una prima fase, si sono estratte le carte relative alle soglie di localizzazione teoricamente ottenibili con la rete di 8 stazioni ACEA, in una zona leggermente più vasta di quella definita dal Dominio Esteso e per profondità ipocentrali di 0m, 1000m, 4000m e 8000m sul livello del mare. Tali profondità corrispondono approssimativamente e rispettivamente a:

- 200m di profondità dalla base dell'invaso della Diga di Bomba
- Prossimità della base della copertura del reservoir della zona mineralizzata
- Base del Dominio Interno
- Prossimità Base del Dominio Esteso

I risultati sono presentati in Fig. 8 e Fig. 9, rispettivamente per lo scenario di rumore “medio” e per quello “rumoroso” rispettivamente, come stabiliti precedentemente e grazie alle procedure dettagliate al Par. 3.2.

Le simulazioni mostrano che, nello scenario di rumore «medio», la configurazione attuale della rete ACEA con 8 stazioni fornisce soglie di localizzazione teoriche inferiore (migliore) di $M_L = -0.1$ nel Dominio Interno e $M_L \leq 0.2$ in quello Esteso. Nello scenario di rumore “elevato”,

invece, le soglie di localizzazione teoriche risultano inferiore (migliore) di $M_L = 0.5$ nel Dominio Interno e $M_L \leq 0.8$.

In prima approssimazione, dunque, grazie ai valori ridotti di rumore antropico attesi, la geometria della rete ACEA potrebbe fornire risultati in accordo con quanto raccomandato dalle Linee Guida Mise.

3.3.5. Risultati di stima dell'incertezza di localizzazione

Seguendo la procedura indicata al Par. 3.3.3., si è valutata tale incertezza stabilendo posizioni trial ed eseguendo una procedura di modellizzazione diretta ed inversa per la rilocalizzazione di eventi di posizione nota. Si ricorda che in questo caso gli eventi sono originati ad una profondità costante di 3 km da livello mare.

I risultati di questa modellizzazione sono forniti in Fig. 10. Si nota come gli errori nella rilocalizzazione orizzontale degli eventi siano importanti e costantemente (anche alla verticale della zona mineralizzata) maggiori di 1000 m, con punte intorno ai 2000 m. Si nota inoltre come gli eventi tendano ad essere rilocalizzati in generale in posizione più prossima alla zona della rete e quindi al giacimento.

Per quanto riguarda il monitoraggio della diga, una simulazione aggiuntiva eseguita posizionando gli eventi a livello mare, mostra un errore di rilocalizzazione orizzontale nell'ordine di circa 200 m per la posizione “ev 5”, all'immediato Nord della Diga stessa.

3.3.6. Integrazione delle Stazioni della Rete Sismica Nazionale (RSN)

Al fine di verificare se l'utilizzazione di stazioni della RSN potesse migliorare i risultati precedentemente ottenuti, si è ripetuta la procedura di stima dell'incertezza di localizzazione aggiungendo 6 stazioni della RSN (le medesime stazioni considerate per la valutazione del rumore ambientale, di cui al Par. 3.2.). Le stazioni sono state selezionate per la loro relativa prossimità geografica al sito in esame ed anche in modo da ottenere una copertura azimutale omogenea ed ottimale.

I risultati di questa modellizzazione sono forniti in Fig. 12. Si nota come gli errori siano considerevolmente diminuiti rispetto alla valutazione precedente, che utilizzava unicamente le stazioni della Rete ACEA. Le rilocalizzazioni epicentrali sono più accurate, con valori di errore medi che si attestano intorno ai 550 m nel Dominio Interno e 650 m in quello Esterno.

È importante però precisare che la metodologia utilizzata per questa stima è puramente cinematica e non tiene in considerazione due fattori molto rilevanti:

- L'intensità sismica degli eventi, che sono trattati tutti allo stesso modo, indipendentemente dalla loro intensità e dalla distanza dai punti di registrazione
- I fenomeni indotti di imprecisione descritti nel Par. 3.3.3., che si riflettono in errori di individuazione delle fasi e di picking, per esempio, che aumentano ovviamente con la distanza fra sorgente e ricevitore.

Si è quindi effettuato un calcolo di sensibilità sismica, in funzione della Magnitudo Locale e della distanza epicentrale delle stazioni di registrazione. Tale sensibilità è stata poi comparata alle soglie di rumore precedentemente individuate. Il risultato è fornito in Fig.12. Si può notare chiaramente come, nell’area di studio, solamente eventi sismici di $M_L \geq 2$ o 2,5 hanno una buona probabilità di essere osservati chiaramente dalle stazioni della RSN. Solamente la stazione più prossima, IV.LPEL, posizionata a circa 14 km ad Est del giacimento, potrebbe eventualmente rilevare eventi di $M_L \approx 1.5$.

Si conclude dunque che il contributo delle stazioni della RSN, seppur verificato teoricamente, nello specifico dell’area in esame, risulta molto limitato e solamente per eventi sismici notevoli. A fini microsismici, ed in particolare per la rilevazione di eventi di lieve entità, con $M_L \leq 1$, il contributo atteso della RSN è nullo.

3.4. Analisi e valutazione della rete microsismica locale ACEA - Conclusioni

Le simulazioni effettuate indicano che la Rete di monitoraggio ACEA (Rete ACEA) rispetta le indicazioni delle linee guida per quanto riguarda le soglie di localizzazione (magnitudo locale minima).

Resta comunque da confermare che i bassi livelli di rumore ambientale osservati nelle stazioni della RSN intorno alla zona di studio (ed applicati per le simulazioni) siano effettivamente applicabili nella zona della Concessione Colle Santo, ed in particolare alle stazioni sismiche poste sulla verticale della zona mineralizzata.

La geometria della rete ACEA non può considerarsi ottimale per i fini di monitoraggio microsismico del giacimento, soprattutto per quanto riguarda l'incertezza di localizzazione di potenziali eventi situati nel DI e nel DE. I risultati delle simulazioni mostrano infatti errori piuttosto elevati (chilometrici) e superiori a quanto indicato nelle Linee Guida MiSE. Tale inadeguatezza è logicamente dovuta al relativo concentramento delle stazioni intorno alla zona della Diga di Bomba, con una conseguente mancanza di copertura nelle zone circostanti dei Domini Interno ed Estesero.

Per quanto riguarda il monitoraggio della Diga, invece, i test di rilocalizzazione di eventi a livello mare mostrano che la Rete ACEA risulta adeguata, fornendo errori ettometrici di entità compatibile sia con la geometria della rete (inter-distanze chilometriche fra sensori attivi) che con le incertezze del modello di sottosuolo.

L'integrazione delle stazioni RSN è risultata fattibile e possibile, grazie all'utilizzazione dei dati disponibili tramite il “webservice” (informazioni disponibili al link <http://terremoti.ingv.it/webservices> and software). Tale contributo consente di migliorare la copertura azimutale sull'area di coltivazione dunque di ridurre gli errori di localizzazione.

Purtroppo, le stazioni della RSN sono nella maggior parte dei casi distanti dalla zona del giacimento. Gli eventi originati nell'area della zona mineralizzata che tali stazioni sono in grado di rilevare sono di intensità media, indicativamente superiore a M_L 1.5. A fini microsismici, ed in particolare per la rilevazione di eventi di lieve entità, con $M_L \leq 1$, il contributo atteso della RSN è nullo.

4. Progettazione ed ottimizzazione della rete di monitoraggio microsismico integrata

4.1. Introduzione – Obiettivi e metodologia

Come si è dimostrato nei lavori di cui al capitolo precedente, l'efficacia della geometria della Rete ACEA è abbastanza limitata per i fini di monitoraggio microsismico del giacimento.

Il problema è riconosciuto in uno scarso potenziale di localizzazione degli eventi microsismici, dovuto non tanto al numero di stazioni globali ma piuttosto alla loro concentrazione nei pressi della Diga di Bomba. Tale concentrazione limita grandemente il potenziale di localizzazione degli eventi a causa della scarsa copertura azimutale di questa geometria.

Essendo la problematica individuata nella copertura azimutale e non nelle soglie di rumore attese (elemento comunque da verificare in situ in caso di passaggio in fase operativa) si comprende come il fatto di collocare le stazioni sulle posizioni esistenti ma in pozzetti profondi, non migliorerebbe in maniera sostanziale la performance della rete ACEA.

Esistono invece due possibilità per migliorare e ottimizzare la performance di tale rete: la prima, tramite il collocamento di stazioni aggiuntive, su posizioni ben pianificate per aumentare la copertura azimutale. Chiameremo questa soluzione “Rete ACEA ESTESA”; la seconda quella di eliminare qualche stazione della Rete ACEA, pur mantenendo la performance globale della rete globale in termini perfettamente accettabili per i fini del monitoraggio della diga e del giacimento. Chiameremo questa soluzione “Rete ACEA OTTIMIZZATA”

In una prima fase, si dunque sono stabilite 8 nuove posizioni di stazioni microsismiche, tramite criteri di copertura azimutale, di distanza da fonti attese di rumore ed anche di facilità di accesso per l'installazione e la manutenzione dei sensori e del materiale di supporto. 5 di queste stazioni sono collocate sul perimetro del Dominio Interno, 3 invece in forma triangolare in una zona compresa fra i due Domini (Fig. 13).

Si sono in seguito eseguite delle modellizzazioni sulla rete delle 5 stazioni perimetrali (benchmark) e poi permutando le varie stazioni, con combinazioni diverse, fino ad ottenere una combinazione ottimale in termini di migliore risultato con il minimo di stazioni impiegate.

4.2. Modellizzazione su Rete ACEA ESTESA

Il risultato finale della fase preliminare di cui al paragrafo precedente è mostrato in Fig. 14. In aggiunta alle stazioni della rete ACEA si sono aggiunte 3 stazioni (DE1, DE2, DE3), collocate con una geometria triangolare in zona esterna al perimetro del Dominio Interno.

I risultati della modellizzazione su questa nuova rete, eseguiti con modalità identiche a quelli esposti nel capitolo precedente, sono riassunti nelle Figure 15, 16, 17 e 18.

La performance della rete ACEA ESTESA è eccellente come soglie di localizzazione teoriche per tutte le profondità considerate e quindi all’interno dei Domini Interno ed Esteso.

Inoltre, la incertezza di localizzazione risulta grandemente diminuita, con errori attesi, per eventi posizionati a 3km di profondità, di 400-500 nel Dominio Interno e comunque inferiori al km nel Dominio Esteso, in totale coerenza con quanto suggerito nelle Linee Guida Mise.

Un’analisi addizionale per eventi localizzati a livello del mare, in corrispondenza dunque di una profondità di circa 200m dalla base dell’invaso della Diga di Bomba, evidenzia delle incertezze di rilocalizzazione orizzontale nell’ordine di 100m-200m in prossimità della Diga (Fig. 18). Tale risultato è coerente con la spaziatura delle stazioni in superficie, che è variabile da circa 750m a 1750m circa.

Qui di seguito si presenta una Tabella con le posizioni geografiche della Rete di monitoraggio ACEA ESTESA.

STAZIONI RETE ACEA					
Stazione	Coordinate Gauss Boaga Fuso Est (EPSG:3004)		Coordinate geografiche (WGS84)		Quota [m slm]
	Easting [m]	Northing [m]	Longitudine	Latitudine	
SR01	2465293	4654736	14.339023	42.042027	261
MS06	2465781	4653584	14.345027	42.031686	185
WEST	2464138	4653082	14.325226	42.027052	460
MS05	2466180	4652852	14.349914	42.025117	201
MS01	2466952	4652914	14.359237	42.025729	322
OLMO	2467149	4651925	14.361707	42.016832	309
MS14	2466264	4651870	14.351015	42.016278	203
SOUTH	2465985	4650605	14.347760	42.004869	448

RETE MICROSISMICA INTEGRATA – STAZIONI ADDIZIONALI					
Stazione	Coordinate Gauss Boaga Fuso Est (EPSG:3004)		Coordinate geografiche (WGS84)		Quota [m slm]
	Easting [m]	Northing [m]	Longitudine	Latitudine	
DE1	2471365	4658794	14.41205	42.07897	384
DE2	2460038	4652971	14.27572	42.02575	809
DE3	2471695	4647809	14.41694	41.98006	668

Tabella 1: Coordinate ed elevazioni della Rete di monitoraggio ACEA ESTESA.

4.3. Modellizzazione su Rete ACEA OTTIMIZZATA

In un’ottica di ottimizzazione, si è studiata la risposta in di una geometria di rete che, al tempo stesso, potesse rispondere contemporaneamente agli obiettivi di monitoraggio microsismico della Diga di Bomba e a quelle del giacimento.

Si sono valutate differenti opzioni e si è mantenuta la soluzione seguente:

- Mantenimento delle tre stazioni a triangolo DE1, DE2 e DE3, che assicurano un’ottima copertura azimutale per il monitoraggio del giacimento, come verificato precedentemente.
- Mantenimento delle 4 stazioni MS01, MS05, MS14 e OLMO in prossimità della diga, per assicurare il monitoraggio in prossimità del corpo principale.
- Mantenimento delle Stazioni SR01 e SOUTH, che assicurano la copertura azimutale su direzioni non completamente coperte dalla rete di 3 stazioni a triangolo di cui sopra
- Esclusione delle stazioni MS06 e WEST, perché allineate sulle stesse direttrici azimutali di altre stazioni e quindi considerate come ridondanti

Ne risulta una rete con 9 stazioni, come illustrato in Fig. 19, che chiamiamo Rete ACEA OTTIMIZZATA.

I risultati della modellizzazione su questa nuova rete, eseguiti con modalità identiche a quelli esposti nei capitoli precedente, sono riassunti nelle Figure 20, 21, 22 e 23.

I risultati delle varie simulazioni sulla Rete ACEA OTTIMIZZATA è ancora una volta eccellente come soglie di localizzazione teoriche che, per lo scenario di rumore “medio”, risultano negative o prossime allo 0 per tutte le profondità considerate e all’interno dei Domini Interno ed Esteso. Per lo scenario di rumore “rumoroso”, si denotano valori pienamente congruenti con le raccomandazioni delle Linee Guida MiSE, con soglie di localizzazione sul perimetro del Dominio Esteso di $M_L = 0,8$, mentre nella zona della diga i valori si attestano vicino allo 0 o negativi.

I test sulle incertezze di localizzazione sono molto soddisfacenti e simili a quelli ottenuti con la Rete ESTESA, con errori attesi, per eventi posizionati a 3km di profondità, di 400-500 nel Dominio Interno e comunque ben inferiori al km nel Dominio Esteso, in totale coerenza con quanto suggerito nelle Linee Guida Mise (Fig. 22).

Un’analisi addizionale per eventi localizzati a livello del mare, in corrispondenza dunque della base dell’invaso della Diga di Bomba, evidenzia ancora delle incertezze di rilocalizzazione nell’ordine di 100m-200m in prossimità della Diga (Fig. 23).

Qui di seguito si presenta una Tabella con le posizioni geografiche della Rete di monitoraggio ACEA OTTIMIZZATA.

STAZIONI RETE ACEA					
Stazione	Coordinate Gauss Boaga Fuso Est (EPSG:3004)		Coordinate geografiche (WGS84)		Quota [m slm]
	Easting [m]	Northing [m]	Longitudine	Latitudine	
SR01	2465293	4654736	14.339023	42.042027	261
MS05	2466180	4652852	14.349914	42.025117	201
MS01	2466952	4652914	14.359237	42.025729	322
OLMO	2467149	4651925	14.361707	42.016832	309
MS14	2466264	4651870	14.351015	42.016278	203
SOUTH	2465985	4650605	14.347760	42.004869	448

RETE MICROSISMICA INTEGRATA – STAZIONI ADDIZIONALI					
Stazione	Coordinate Gauss Boaga Fuso Est (EPSG:3004)		Coordinate geografiche (WGS84)		Quota [m slm]
	Easting [m]	Northing [m]	Longitudine	Latitudine	
DE1	2471365	4658794	14.41205	42.07897	384
DE2	2460038	4652971	14.27572	42.02575	809
DE3	2471695	4647809	14.41694	41.98006	668

Tabella 2: Coordinate ed elevazioni della Rete di monitoraggio ACEA OTTIMIZZATA.

4.4. Rete Microsismica integrata - Conclusioni

Si è valutata la possibilità di un miglioramento della Rete ACEA, per rispondere allo stesso tempo ai requisiti di monitoraggio microsismico della Diga di Bomba e a quelli del giacimento più in profondità.

In un primo tempo si è studiata l'estensione della Rete ACEA, dapprima con una serie di stazioni aggiuntive e via via degradandone il numero e la disposizione fino ad ottenere un risultato ottimale per un efficace monitoraggio nei Domini Interno ed Esteso. La soluzione denominata Rete ACEA ESTESA, composta dalle 8 Stazioni ACEA con l'aggiunta di 3 Stazioni aggiuntive opportunamente posizionate, fornisce eccellenti risultati di simulazione, con soglie di detezione e localizzazione teoriche negative in prossimità della zona della Diga e con incertezze di localizzazione attese ridotte a qualche centinaio di metri nel Dominio Interno e ben inferiori al km in quello Esteso.

In un secondo tempo si è valutata l'ottimizzazione della geometria precedente, essenzialmente tramite l'esclusione di due stazioni ritenute ridondanti ai fini del monitoraggio. Si è dunque riconosciuto il migliore compromesso tramite l'utilizzo di 3 stazioni microsismiche, da associare a 6 stazioni convenzionali già predefinite sulle localizzazioni dalla rete ACEA.

I risultati delle varie simulazioni hanno confermato che tale Rete ACEA OTTIMIZZATA risponde pienamente alle esigenze di monitoraggio microsismico della Diga ed al tempo stesso del giacimento, fornendo risultati di modellizzazione sostanzialmente analoghi a quelli della Rete ESTESA.

Sulla base di questo studio, si suggerisce dunque di mantenere lo scenario di Rete ACEA OTTIMIZZATA come scenario geometrico di riferimento per il monitoraggio microsismico della zona in esame. Nel capitolo successivo, analizzeremo tale scenario anche in termini di strumentazione geofisica che potrebbe essere installata per garantirne la performance ottimale.

5. Considerazioni preliminari sulla strumentazione e l’operatività della Rete Microsismica su Colle Santo

5.1. Introduzione

In accordo con le Nostre esperienze operative consolidate (Isamgeo e Realtimeseismic gestiscono svariate Reti microsismiche in Europa) ma avendo analizzato per il momento solamente le foto satellitari della zona in esame, possiamo affermare che non si prevedono particolari problemi per l’installazione, buon funzionamento e manutenzione delle stazioni microsismiche nella zona della Concessione di Colle Santo.

Nell’ambito di questo studio, si intendono dare alcune informazioni di massima sulla strumentazione disponibile ed una preliminare proposta di implementazione tecnica, da verificare comunque grazie ad uno studio ulteriore di fattibilità operativa.

5.2. Generalità applicative sulle installazioni microsismiche e sensoristica

In accordo con le Linee guida MiSE le stazioni sismiche devono essere equipaggiate con sensori multicomponenti a 1Hz e, laddove necessario, alimentate da pannelli fotovoltaici e relative batterie tampone. In Fig. 24 si presenta un esempio schematico di stazione microsismica ed un’installazione di terreno in Regione Abruzzo. L’utilizzo di una stazione a banda larga (frequenza > 20-40 sec) è raccomandata nella Linee Guida, per integrazione con la RSN. L’utilizzo di velocimetri e/o di accelerometri deve essere considerato sulla base delle situazioni locali. L’acquisizione deve essere in modalità continua ed un protocollo standard stabilito ed applicato per il recupero remoto, lo stoccaggio in sicurezza di tutti i dati registrati, l’elaborazione dei dati ed il reporting (Fig. 27).

Differenti tipi di sensori per sismica passiva sono disponibili sul mercato specializzato. Essi differiscono per manifattura, caratteristiche tecnologiche ed ovviamente per costo. Esempi di strumentazione sono forniti in Fig. 25. Un elemento diagnostico chiave per la scelta dei sensori è quello della frequenza propria di oscillazione. Nell’ambito degli studi sismologici e per le installazioni per fini microsismici classici (monitoraggio di reservoir durante operazioni di produzione o per lo stoccaggio di idrocarburi) si raccomandano (Linee Guida MiSE) sensori triassiali a 1Hz mentre per studi geo-tecnici o per la sismica a riflessione sono frequentemente utilizzati geofoni a 4,5Hz o maggiori. Per queste installazioni, l’utilizzo di uno o più accelerometri potrebbe rivelarsi di utilità, per verificare l’effettiva accelerazione in situ, in occasione di eventi sismici notevoli nella regione circostante a quella della diga.

La scelta dei sensori per un’installazione come quella prevista su Colle Santo deve seguire le Linee Guida ma deve anche adattarsi alla specificità del progetto integrato. Come abbiamo visto in precedenza, infatti, le stazioni in prossimità della Diga di Bomba avranno lo scopo di monitorare la diga ma, allo stesso tempo, dovranno assicurare la qualità del monitoraggio del giacimento in profondità.

5.3. Suggerimenti preliminari per l’installazione su Colle Santo

Avendo analizzato le specificità del progetto di monitoraggio integrato, in accordo alla nostra esperienza su progetti attualmente in corso di svolgimento e considerate le varie opzioni tecniche disponibili, possiamo in via del tutto preliminare suggerire un’implementazione tecnica come segue (Fig. 26):

- Per le stazioni DE1, DE2 e DE3, situate come abbiamo visto in precedenza su un pattern triangolare poco al di fuori del perimetro del Dominio Interno, si suggeriscono Velocimetri Triassiali corto periodo 1 Hz.
- Sulla stazione MS01 (o MS05, da valutare in seguito durante uno studio di fattibilità operativa di dettaglio), situata a Nord della Diga, Velocimetro Triassiale corto periodo 1 Hz, sensore Banda Larga + Accelerometro Triassiale
- Per le Stazioni SR01, MS05 (o MS01, vedi sopra), OLMO, MS14 e SOUTH, Velocimetri a corto periodo 4,5Hz.

Si ribadisce che, ai fini della progettazione finale della rete di rilevamento, sarà necessario uno studio di fattibilità operativo di dettaglio, in cui siano previsti sopralluoghi e misure del rumore ambientale locale (o rumore sismico di fondo). Tale studio dovrà valutare le soluzioni operative locali in termini di accessi, infrastrutture, copertura rete telefonia mobile per la trasmissione dei dati ed anche la necessità di installazione di uno o più sensori in pozzetti di profondità adeguata, in funzione dei livelli di rumore effettivamente presenti.

Tale valutazione dettagliata, associata all’analisi della strumentazione, in tutte le sue componenti (non solo i sensori sismici ma anche gli elementi di supporto, come l’alimentazione e la trasmissione dei dati, per esempio) garantirà la migliore scelta nelle posizioni finali, la scelta ottimale della sensoristica e l’ottimizzazione di altri importanti dettagli operativi per un’installazione pienamente soddisfacente, in termini di rapporto costi / benefici.

6. Conclusioni – Suggerimenti per lavori futuri

In accordo con gli obiettivi del progetto di Studio, definiti nel Capitolo 1 di questo Rapporto, sono stati eseguiti lavori di modellizzazione ed analisi sulla rete di monitoraggio microsismico sulla Concessione idrocarburi di Colle Santo.

In una prima fase, si sono valutate, tramite simulazioni di eventi sismici opportunamente distribuiti nei Domini di riferimento, le soglie di localizzazione teoricamente raggiungibili nel contesto specifico di Colle Santo sulla rete di monitoraggio così come attualmente concepita per il monitoraggio della Diga di Bomba (definita Rete ACEA). Si è concluso che tale rete, seppur teoricamente efficace per la detezione e localizzazione di eventi sismici di piccola entità, in accordo alle soglie definite dalle Linee Guida MiSE, risulta insufficiente quando si considera la rilocalizzazione di eventi in un contesto realistico, in presenza dunque di fattori di errore nelle procedure di analisi ed elaborazione dei dati microsismici.

Si è analizzato il contributo della Rete Sismica Nazionale alla Rete ACEA locale, concludendo che tale contributo risulta assai limitato, a causa della distanza importante delle stazioni della RSN dalla zona di studio.

Si è in seguito studiata l'estensione della rete ACEA per i fini del monitoraggio microsismico integrato del giacimento e della diga. Una rete di 11 stazioni (8 stazioni in prossimità della diga + 3 stazioni più periferiche) costituisce la migliore soluzione per questa rete, che abbiamo definito Rete ACEA ESTESA e che fornisce risultati di modellizzazione in piena osservanza delle Linee Guida MISE.

Si è in seguito valutata la possibilità di ottimizzazione della rete precedentemente definita, concludendo che risultati sostanzialmente analoghi ed ancora di ottima qualità possono essere ottenuti con una disposizione di 9 stazioni (6 stazioni in prossimità della diga + 3 stazioni più periferiche). Tale disposizione, che abbiamo definito Rete ACEA OTTIMIZZATA, appare chiaramente il migliore compromesso tecnico, in termini di costi / benefici, per il monitoraggio integrato della diga e del giacimento.

Si sono infine considerate rapidamente le soluzioni tecnologiche più idonee, in termini di sensoristica, che possano rappresentare il miglior compromesso fra costi e benefici, con il duplice obiettivo di monitoraggio della diga ma anche del giacimento e si è proposta una soluzione preliminare per l'installazione su Colle Santo.

In termini di suggerimenti per le attività future, Nel caso che il progetto avanzi in una fase di sviluppo, sarà necessario eseguire uno studio di fattibilità operativa di dettaglio, che includa:

- La conferma sul terreno della fattibilità del posizionamento delle stazioni teoriche.
- La registrazione, su qualche punto opportunamente selezionato e con modalità idonee (durata di ascolto, analisi fonti di rumore locale) del rumore ambientale.

- Le soluzioni operative locali in termini di accessi, infrastrutture, copertura rete telefonia mobile per la trasmissione dei dati ed anche la necessità di installazione di uno o più sensori in pozzetti di profondità adeguata, in funzione dei livelli di rumore effettivamente presenti.
- La progettazione operativa della rete microsismica, includendo il sistema di gestione dei dati, di “triggering” degli eventi, di identificazione automatica delle fasi, di elaborazione manuale degli eventi significativi, di analisi e reporting interno tramite stazione dedicata e di reporting esterno tramite piattaforma web (in Fig. 27 viene fornito un esempio di architettura e flusso di dati relativo ad un nostro sistema di monitoraggio microsismico).
- Una valutazione dettagliata dell’hardware, in tutte le sue componenti (fondamentali e di supporto).
- Una stima dettagliata ed ottimizzata dei costi dell’installazione, gestione e manutenzione della rete nel lungo periodo.

Il presente studio è stato realizzato in collaborazione da Isamgeo Italia Srl e RealTimeGeo Srl, con il supporto tecnico di Realtimeseismic sas.

Firenze, 20 Dicembre 2019.

7. Figure

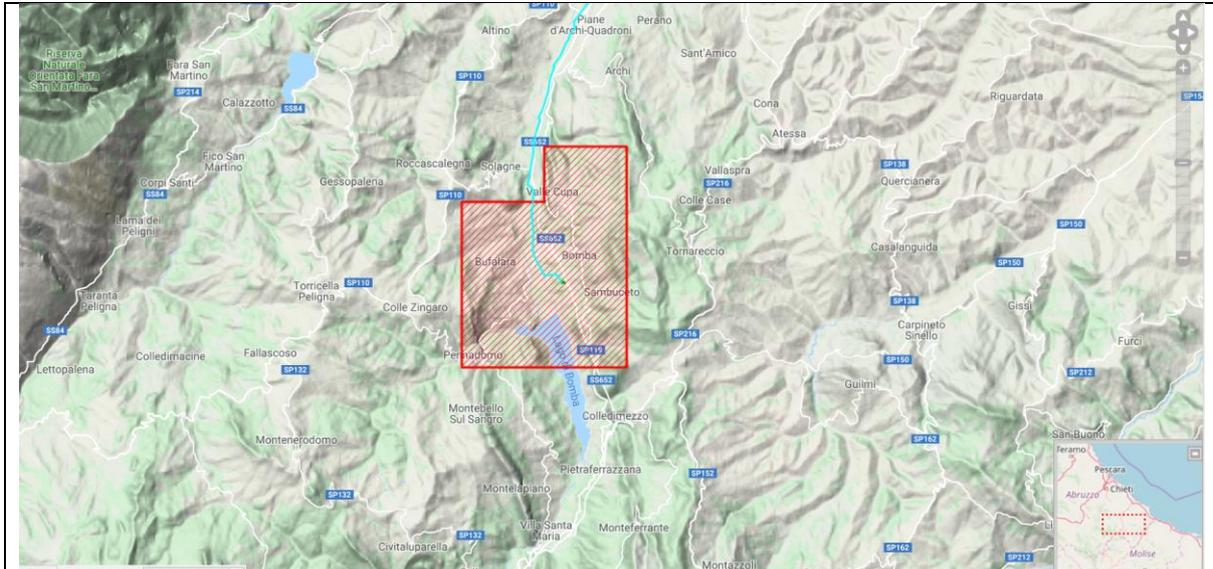
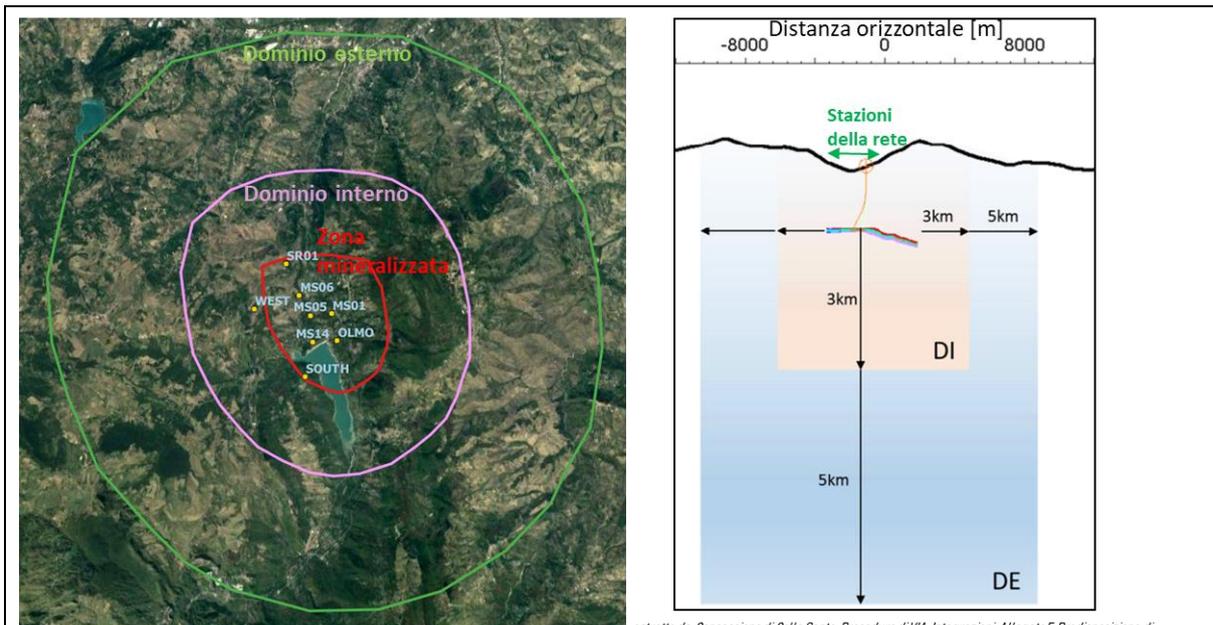


Fig. 1: Localizzazione dell'area della Concessione Colle Santo (da sito del Ministero dell'Ambiente)



estratta da: Concessione di Colle Santo. Procedura di VIA. Integrazioni Allegato F. Predisposizione di una rete di monitoraggio microsismico nell'area del giacimento di Colle Santo, novembre 2017, pag. 11

Fig. 2: Definizione delle aree di Dominio Interno ed Esteso e posizioni delle 8 stazioni di monitoraggio (Rete ACEA) intorno alla Diga di Bomba (da documentazione di V.I.A., 2017)

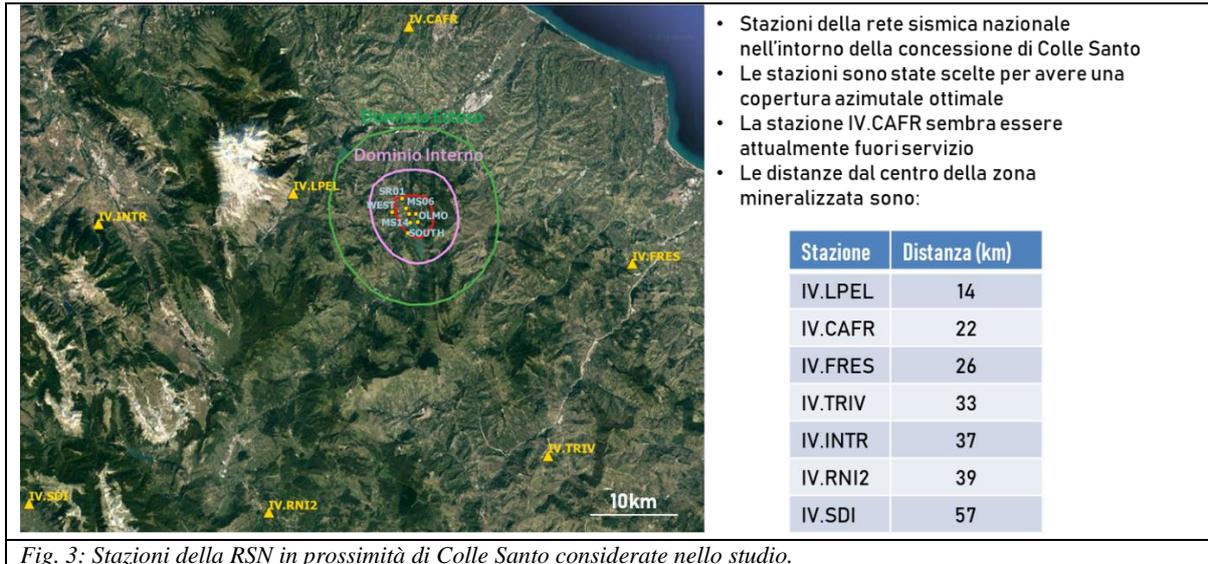


Fig. 3: Stazioni della RSN in prossimità di Colle Santo considerate nello studio.

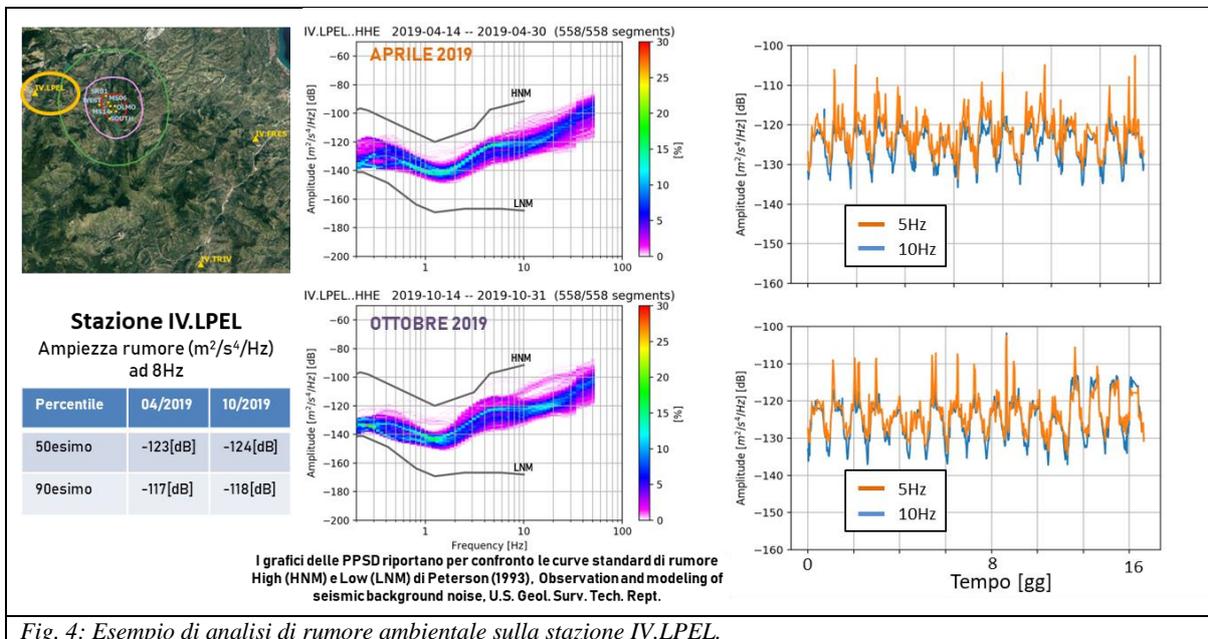


Fig. 4: Esempio di analisi di rumore ambientale sulla stazione IV.LPEL.

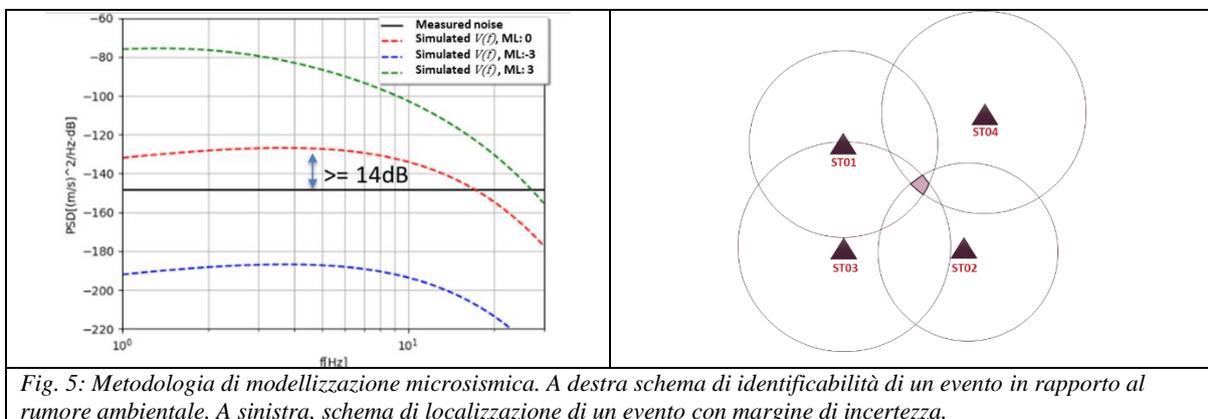


Fig. 5: Metodologia di modellazione microsismica. A destra schema di identificabilità di un evento in rapporto al rumore ambientale. A sinistra, schema di localizzazione di un evento con margine di incertezza.

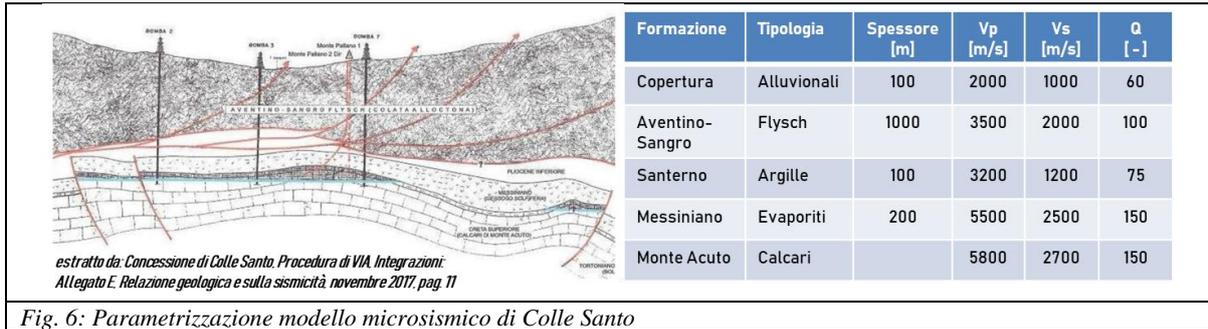


Fig. 6: Parametrizzazione modello microsismico di Colle Santo

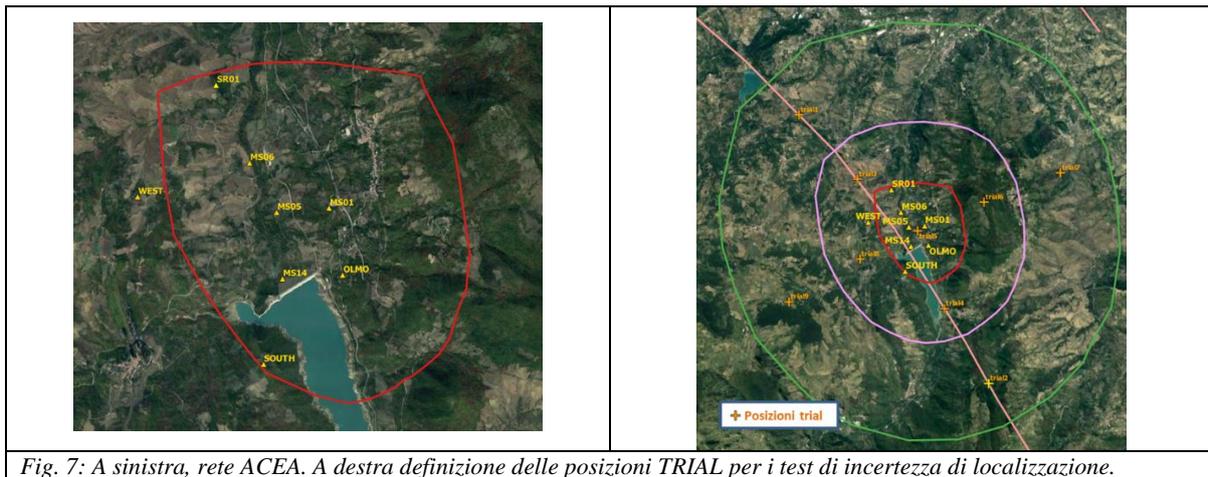


Fig. 7: A sinistra, rete ACEA. A destra definizione delle posizioni TRIAL per i test di incertezza di localizzazione.

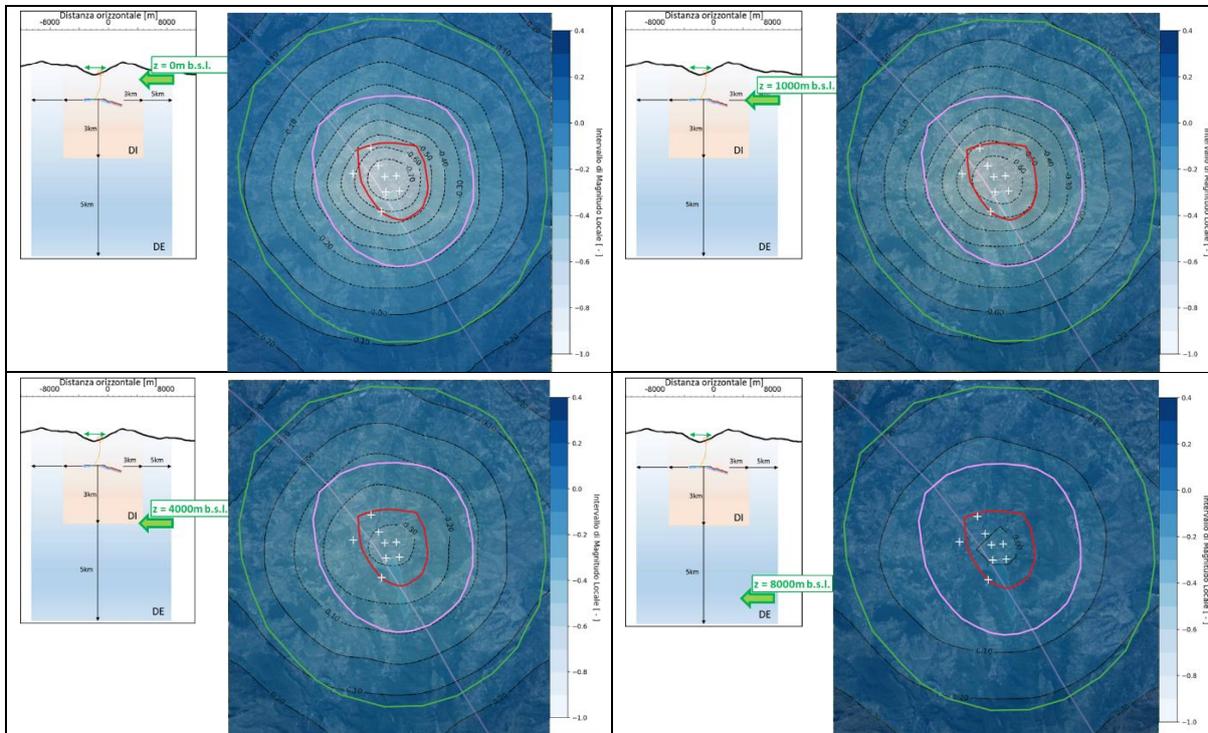


Fig. 8: Soglie teoriche di localizzazione per scenario di rumore “medio” a diverse profondità. Le croci bianche mostrano le posizioni della rete microsismica ACEA. Le linee tratteggiate indicano aree in cui la magnitudo minima identificabile è NEGATIVA.

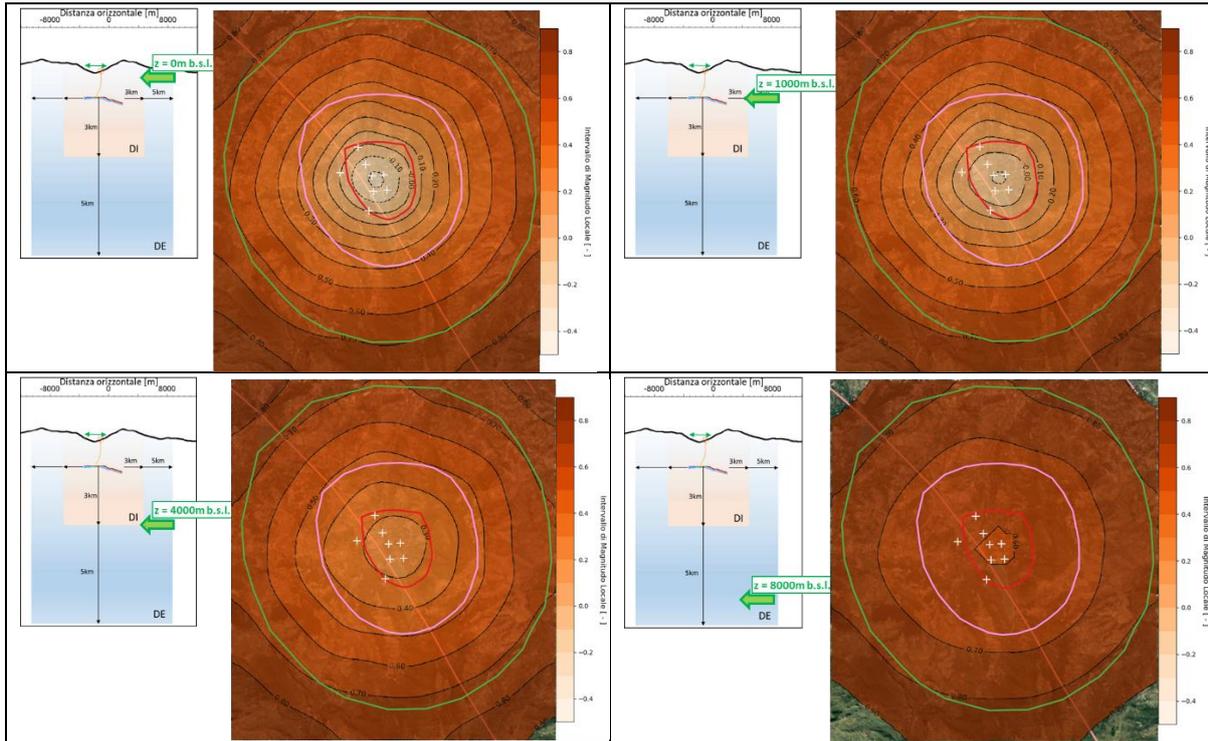


Fig. 9: Soglie teoriche di localizzazione per scenario di rumore “rumoroso” a diverse profondità. Le croci bianche mostrano le posizioni della rete microsismica ACEA. Le linee tratteggiate indicano aree in cui la magnitudo minima identificabile è NEGATIVA.

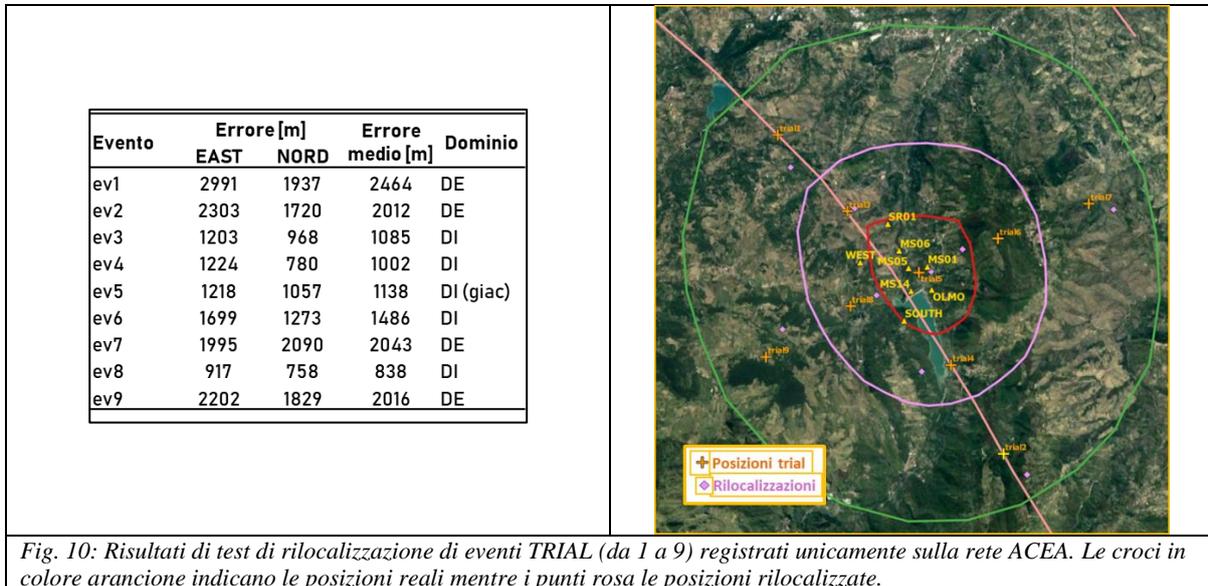
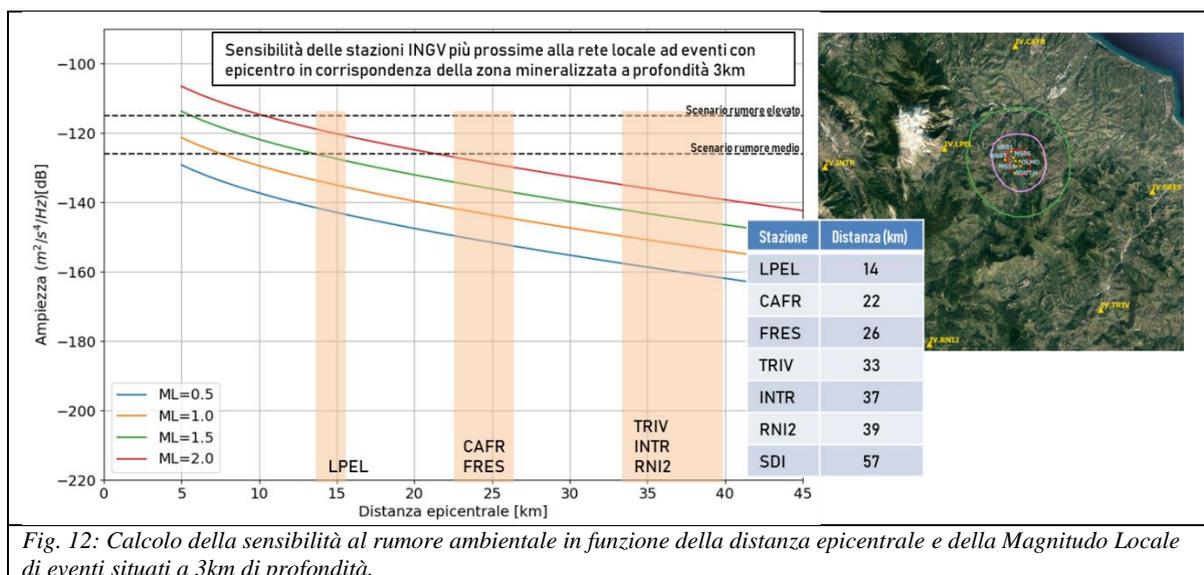
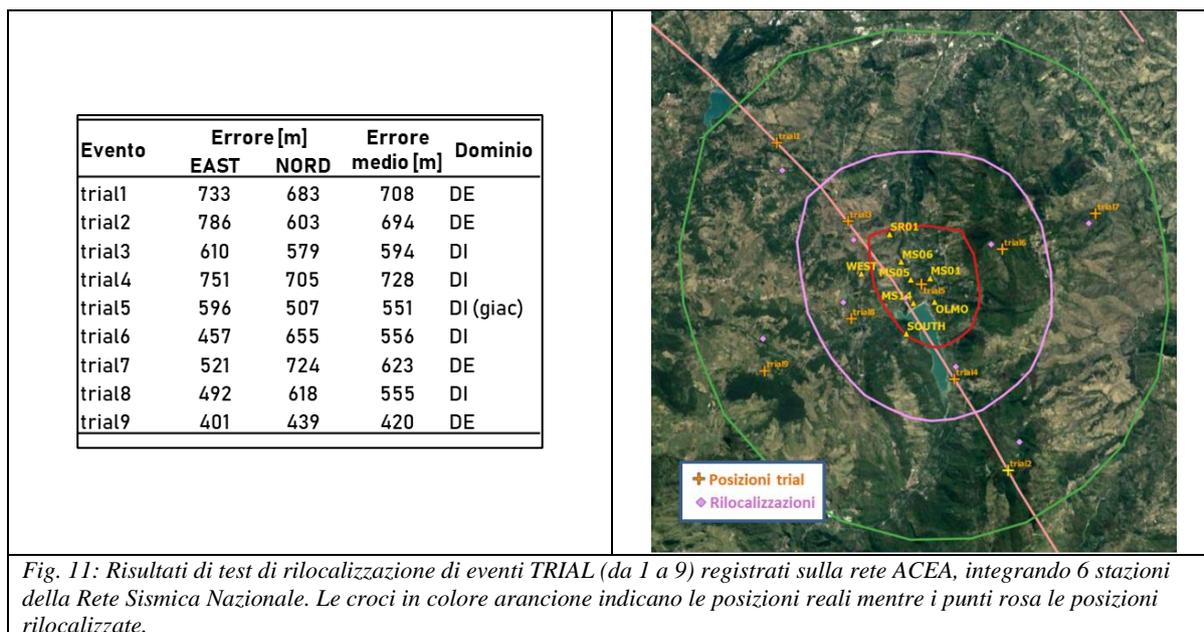
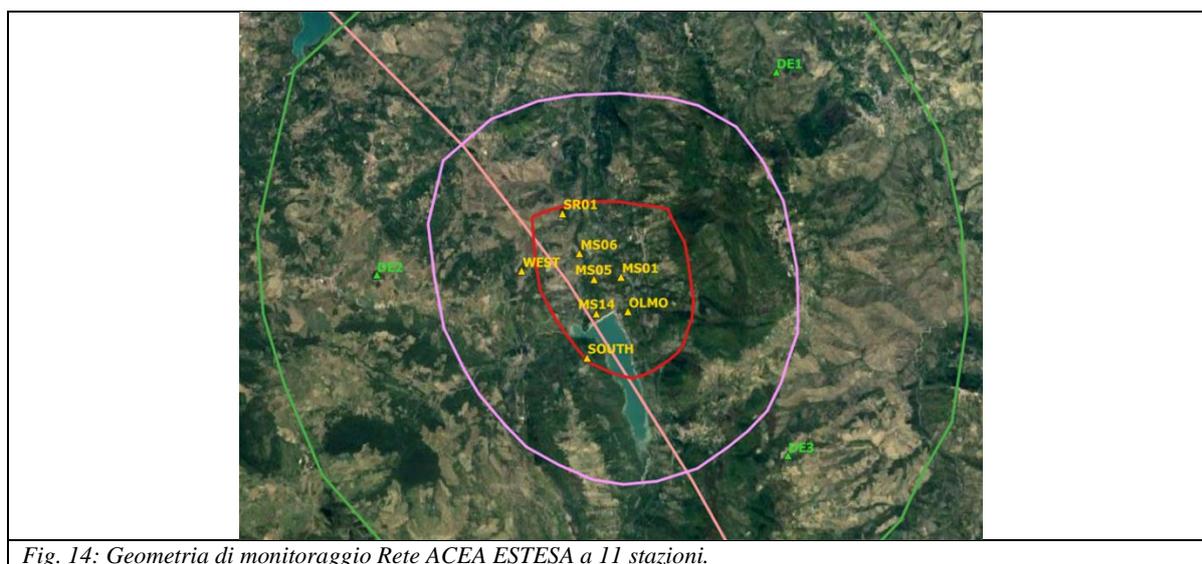
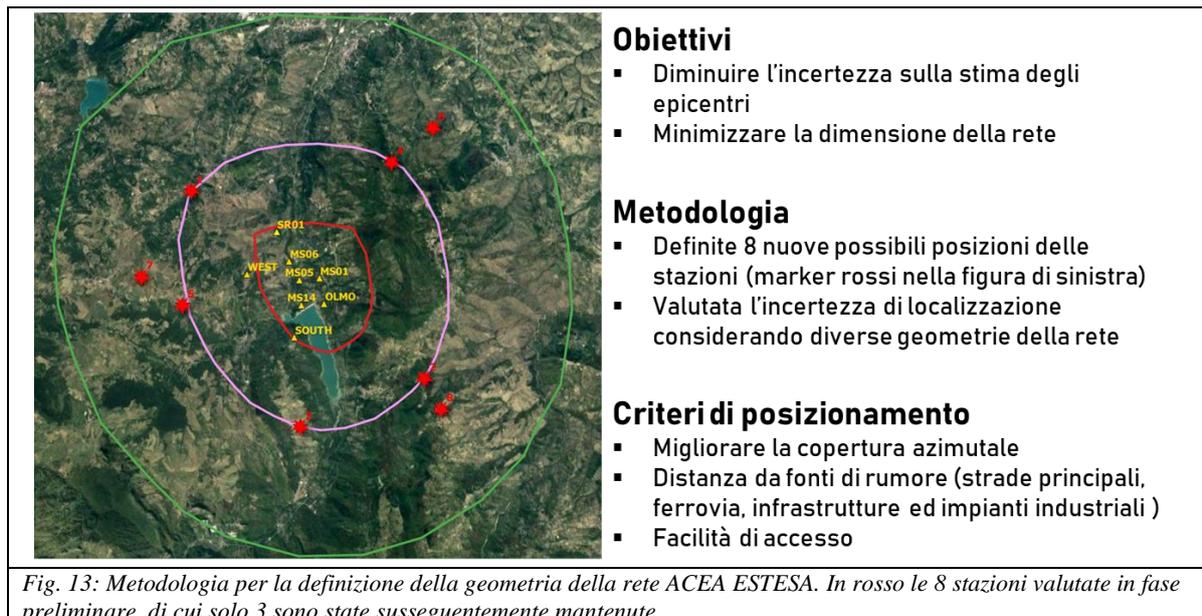


Fig. 10: Risultati di test di rilocalizzazione di eventi TRIAL (da 1 a 9) registrati unicamente sulla rete ACEA. Le croci in colore arancione indicano le posizioni reali mentre i punti rosa le posizioni rilocalizzate.





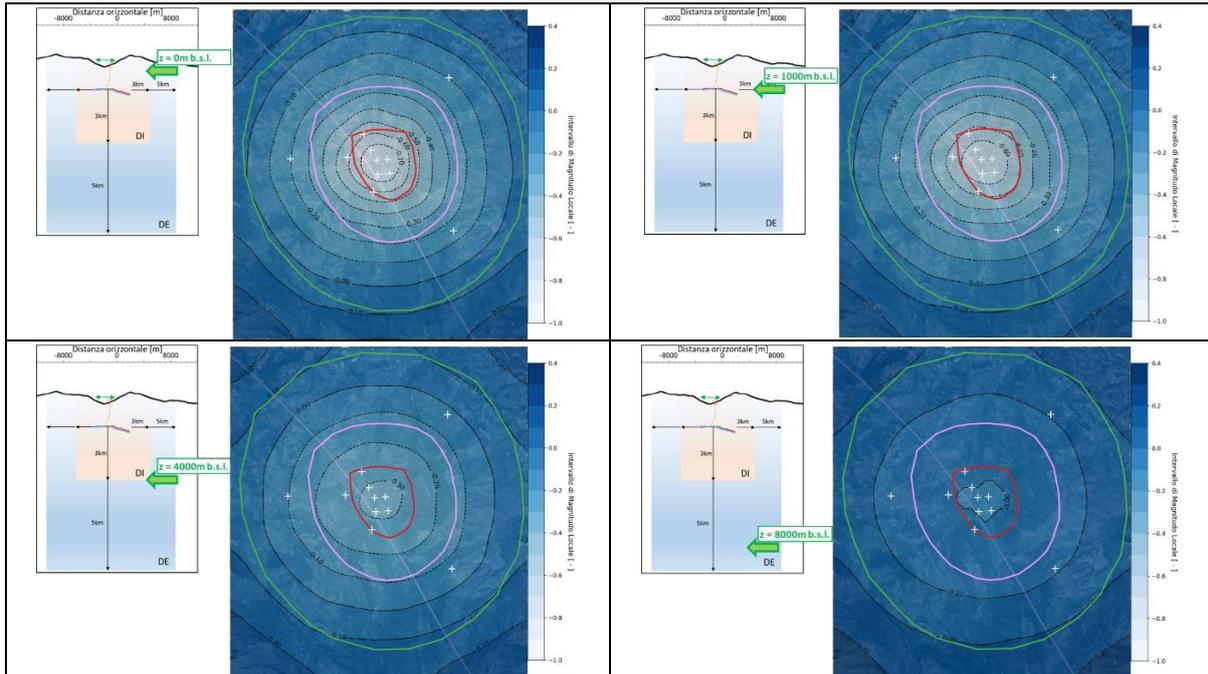


Fig. 15: Soglie teoriche di localizzazione su Rete ACEA ESTESA, per scenario di rumore “medio” a diverse profondità. Le croci bianche mostrano le posizioni della rete microsismica ACEA. Le linee tratteggiate indicano aree in cui la magnitudo minima identificabile è NEGATIVA.

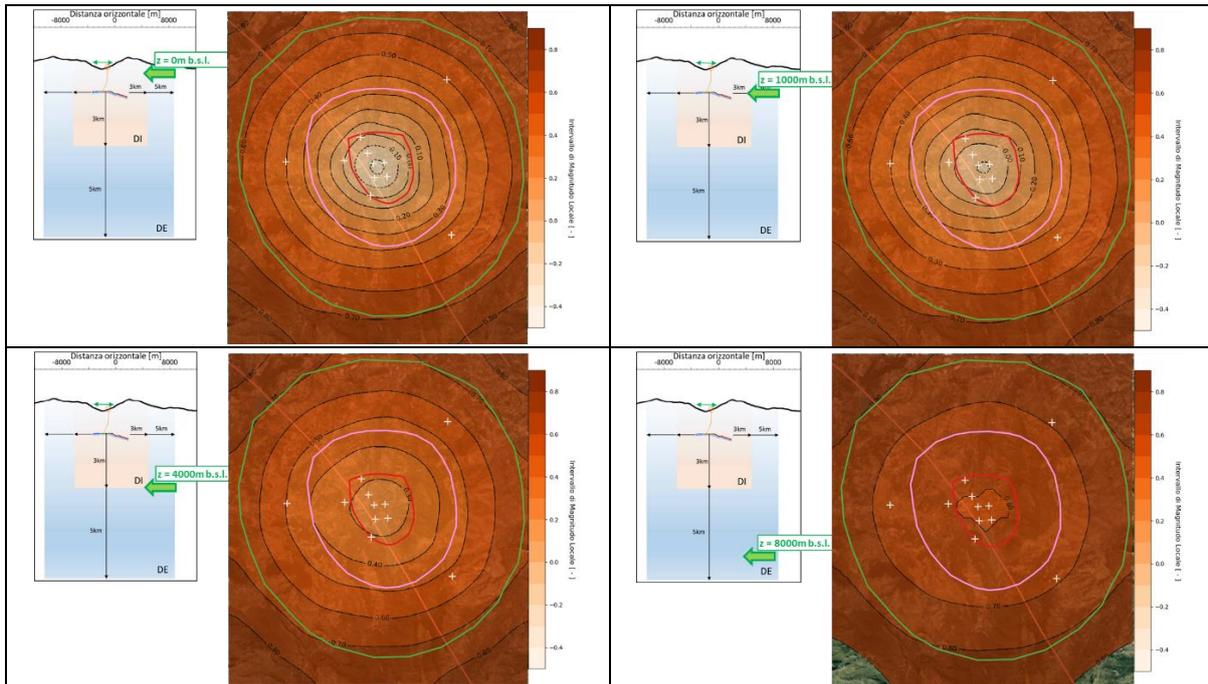
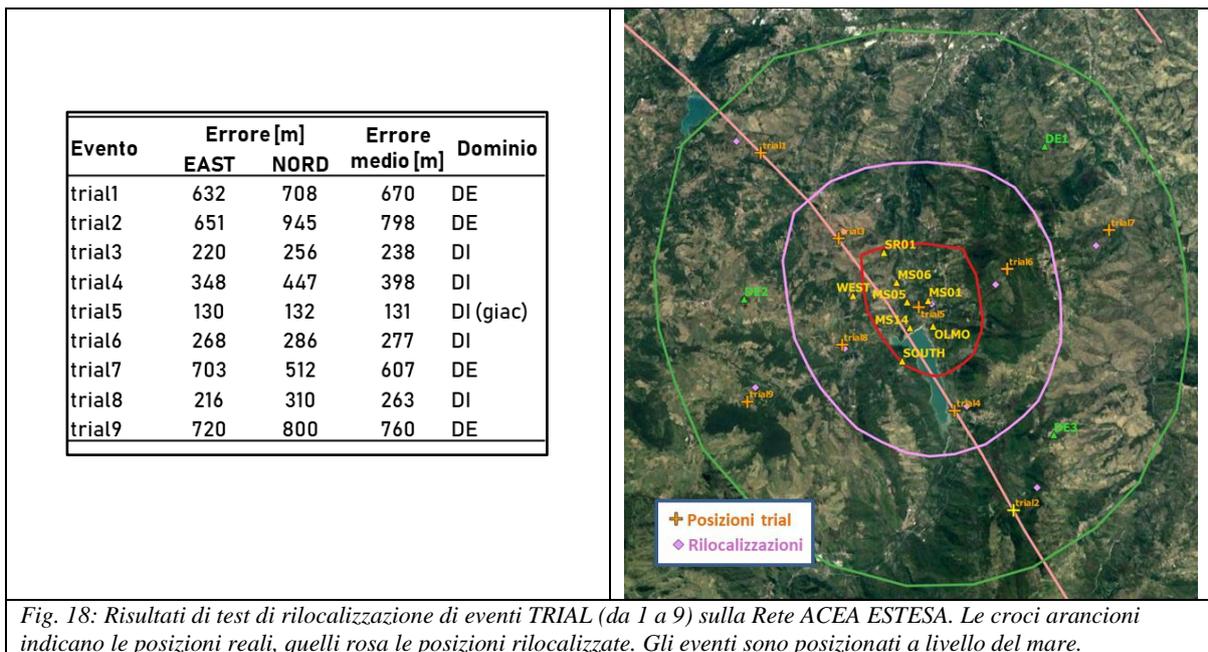
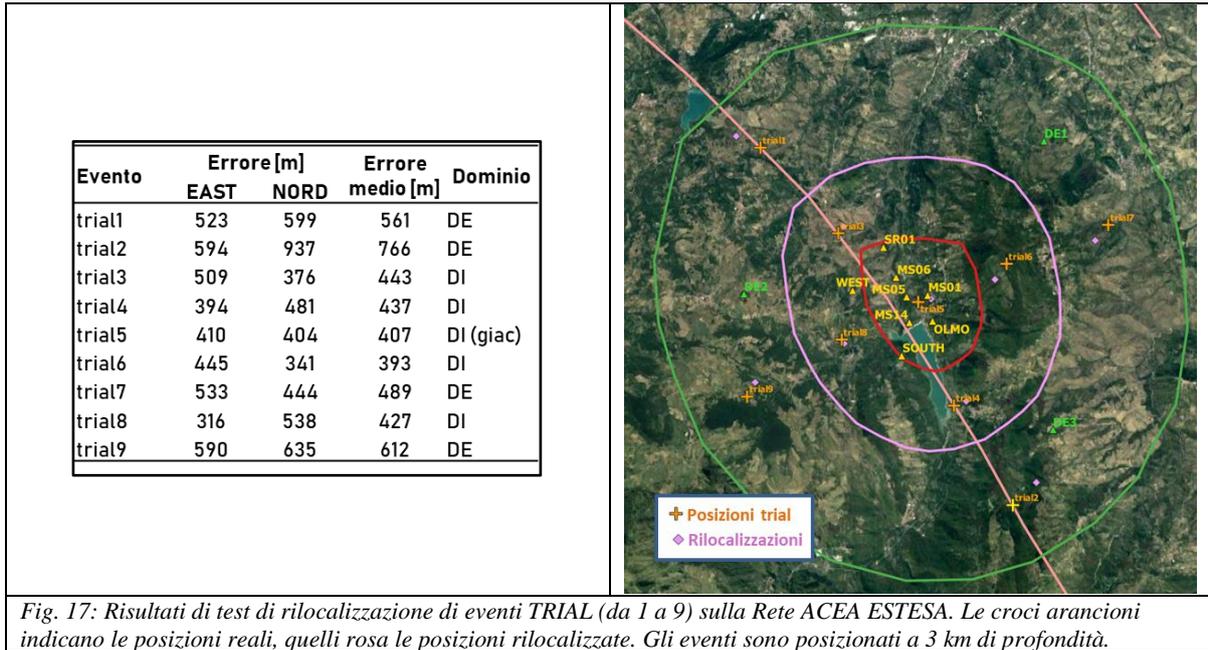


Fig. 16: Soglie teoriche di localizzazione su Rete ACEA ESTESA, per scenario di rumore “rumoroso” a diverse profondità. Le croci bianche mostrano le posizioni della rete microsismica ACEA. Le linee tratteggiate indicano aree in cui la magnitudo minima identificabile è NEGATIVA.



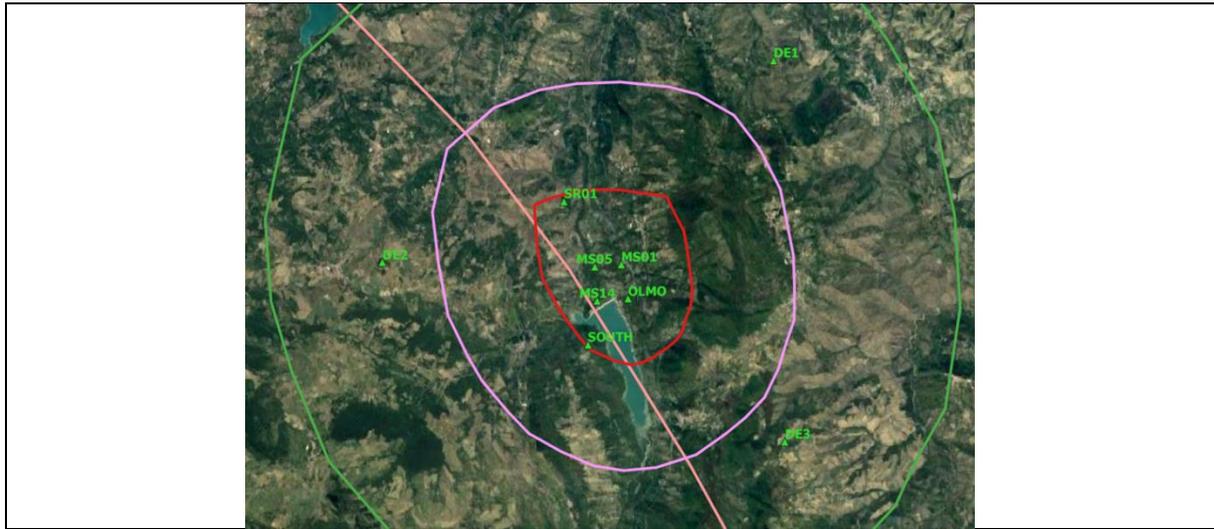


Fig. 19: Geometria di monitoraggio Rete ACEA OTTIMIZZATA a 9 stazioni.

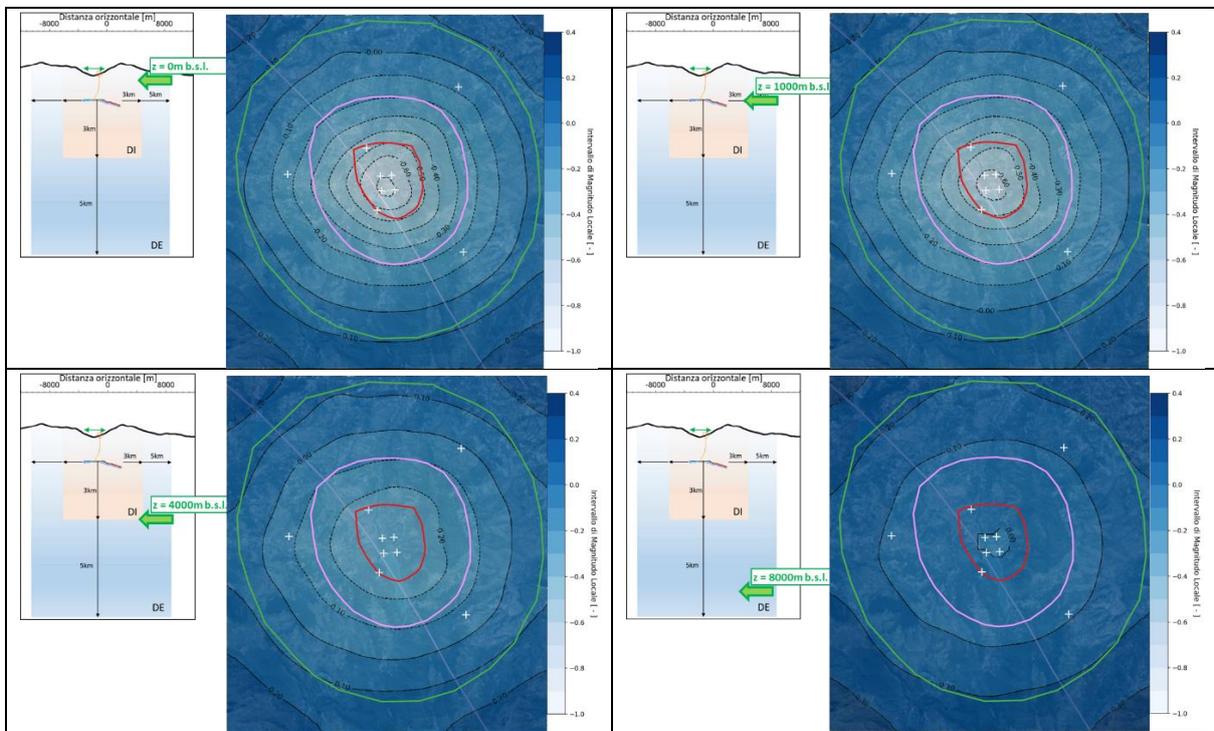


Fig. 20: Soglie teoriche di localizzazione su Rete ACEA OTTIMIZZATA, per scenario di rumore “medio” a diverse profondità. Le croci bianche mostrano le posizioni della rete microsismica ACEA. Le linee tratteggiate indicano aree in cui la magnitudo minima identificabile è NEGATIVA.

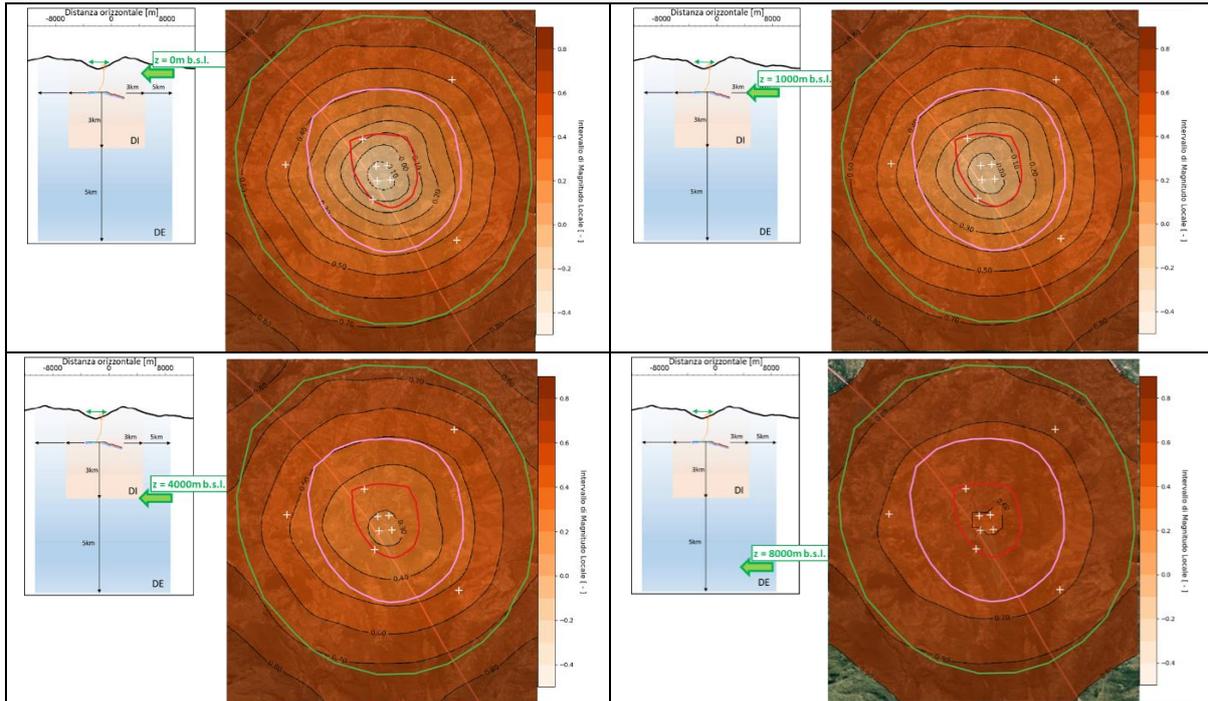


Fig. 21: Soglie teoriche di localizzazione su Rete ACEA OTTIMIZZATA, per scenario di rumore “rumoroso” a diverse profondità. Le croci bianche mostrano le posizioni della rete microsismica ACEA. Le linee tratteggiate indicano aree in cui la magnitudo minima identificabile è NEGATIVA.

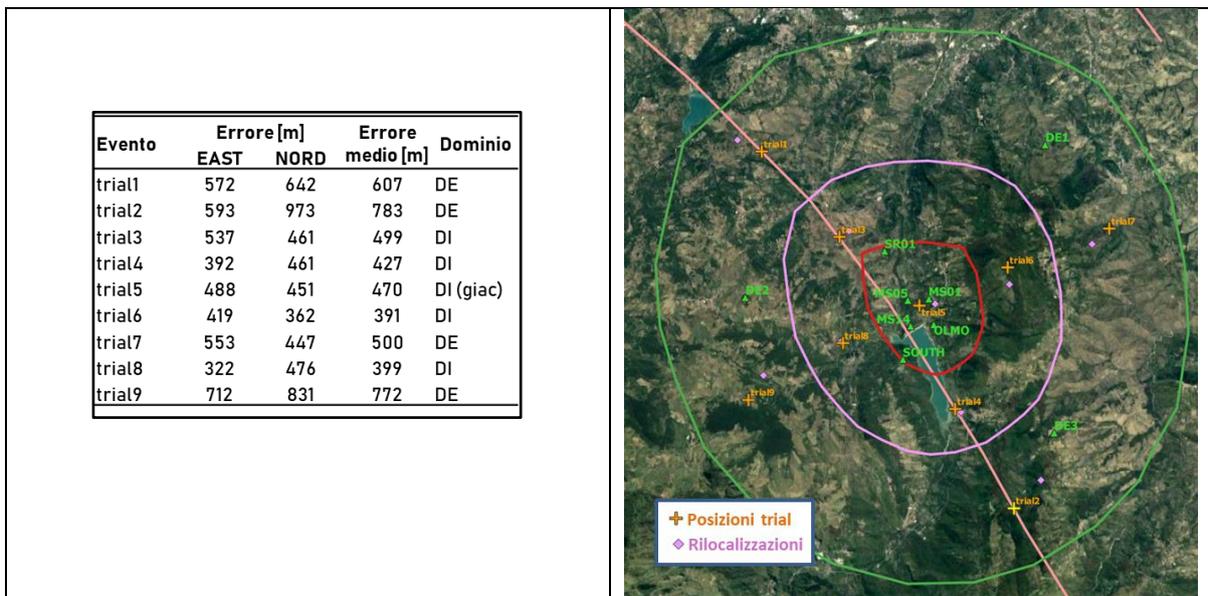


Fig. 22: Risultati di test di rilocalizzazione di eventi TRIAL (da 1 a 9) sulla Rete ACEA OTTIMIZZATA. Le croci arancioni indicano le posizioni reali, quelli rosa le posizioni rilocalizzate. Gli eventi sono posizionati a 3 km di profondità.

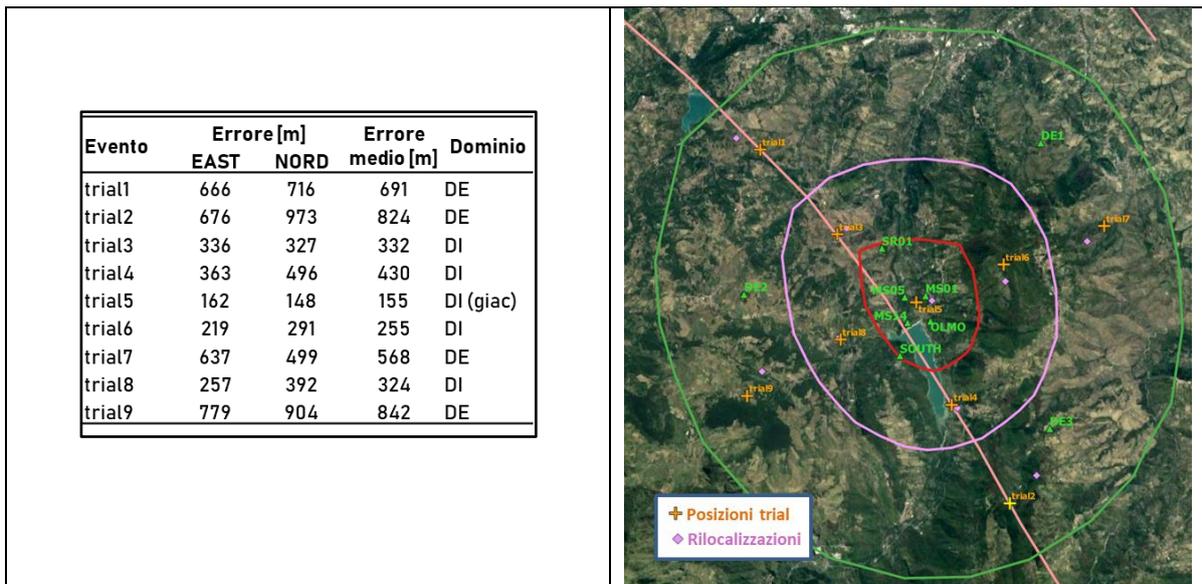
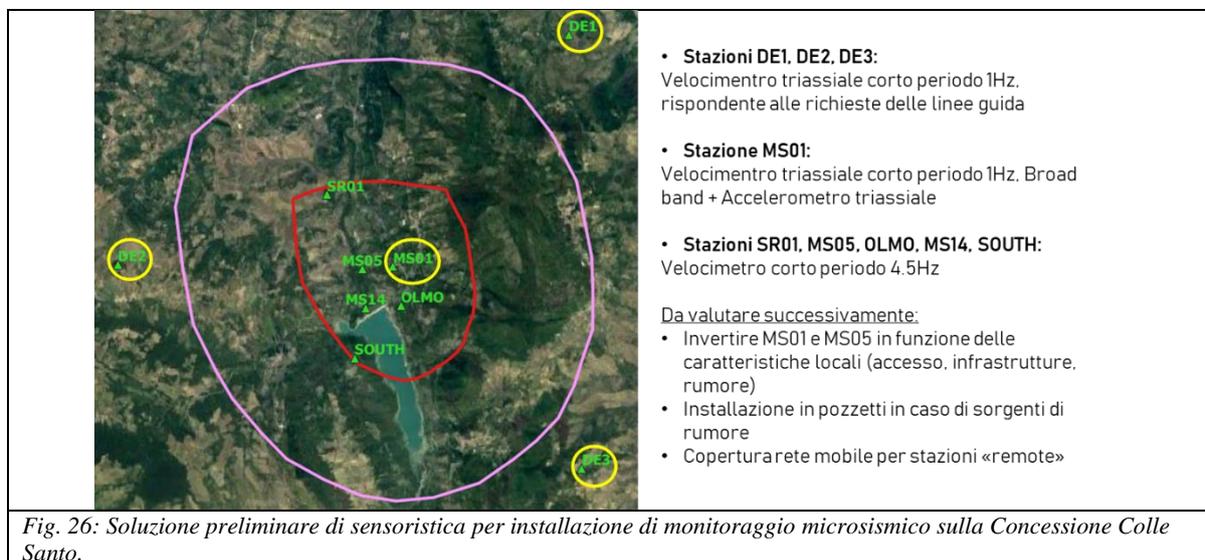


Fig. 23: Risultati di test di rilocalizzazione di eventi TRIAL (da 1 a 9) sulla Rete ACEA OTTIMIZZATA. Le croci arancioni indicano le posizioni reali, quelle rosa le posizioni rilocalizzate. Gli eventi sono posizionati a livello del mare.



Fig. 24: Schema di stazione di rilevamento microsismico e foto relative ad un'installazione in Francia.



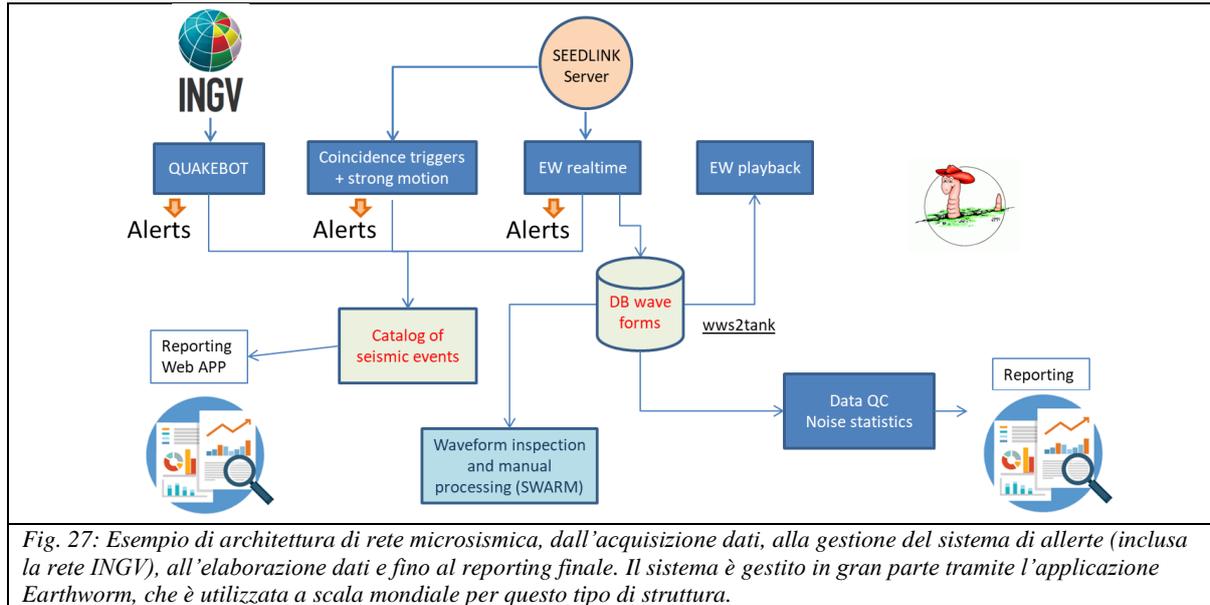


Fig. 27: Esempio di architettura di rete microsismica, dall'acquisizione dati, alla gestione del sistema di allerte (inclusa la rete INGV), all'elaborazione dati e fino al reporting finale. Il sistema è gestito in gran parte tramite l'applicazione Earthworm, che è utilizzata a scala mondiale per questo tipo di struttura.

8. Riferimenti bibliografici

ACEA-Electrabel (2010): Piano di Monitoraggio della Diga di Bomba.

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.

Bourbié, T., O. Coussy and B. Zinszner (1992) *Acoustics of porous media*, Gulf Publishing Company.

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., D’Alema, E., Lovati, S., Massa, M., Augliera, P., Franceschina, Gianlorenzo, G. (2017): Feasibility study for the microseismic monitoring of the natural gas reservoir of “Sant’Alberto” (Po Plain, Italy). *Annals of Geophysics*, 60, 2.

Chiarabba C. e A. Amato (1996) Crustal velocity structure of the Apennines (Italy) from P-wave travel time tomography, *Ann. Geofis.*, Vol 39, n. 6, pp 1133-1148.

Chiarabba, C. e A. Frepoli (1997) Minimum 1D velocity models in Central and Southern Italy: a contribution to better constrain hypocentral determination, *Ann. Geofis.*, Vol 40, N. 4, pp 937 - 954

CMI Energia (2017): Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale. Integrazioni richieste con nota DVA prot. 22746 del 4/10/2017. ALLEGATO E: relazione Geologica e sulla Sismicità.

CMI Energia - Dream (2017): Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale. Integrazioni richieste con nota DVA prot. 22746 del 4/10/2017. ALLEGATO F: Predisposizione di una rete di monitoraggio microsismico nell’area del giacimento di Colle Santo.

CMI Energia (2017): Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale. ALLEGATO G: Integrazioni al quadro geologico e sismo-tettonico.

CMI Energia - Dream (2018): Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale. Valutazione del rischio di sismicità innescata in relazione alla struttura sismogenetica ACBT e al piano di coltivazione del giacimento Colle Santo

Coccia, S., V. Del Gaudio, N. Venisti and J. Wasowski (2010) Application of Refraction Microtremor (ReMi) technique for determination of 1-D shear wave velocity in a landslide area. *J. App. Geoph.*, 71, pp 71-89.

D’Alessandro, A., Luzio, D., D’Anna, G., Mangano G. (2010): Valutazione della performance di localizzazione della RSNC-INGV tramite simulazione numerica. *Quaderni di Geofisica*, 83, 31 pp.

Hanks T.C., Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale, *J. Geophysical Res.*, 84, 2348-2350.

INGV 2015. Studio di fattibilità per la realizzazione della rete di monitoraggio microsismico del giacimento di Sant’Andrea (TV), 46 pp.

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

MiSE-DGS-UNMIG (2014). Ministero dello Sviluppo Economico – Direzione Generale per le Risorse Minerarie ed Energetiche - Gruppo di lavoro CIRM, Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell’ambito delle attività antropiche, Roma, 24/11/2014.

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

Romano, M. A., R. Nardis, G. Lavecchia, G. Milana, and B. Pace (2009). Evaluation of Local Amplification Effects: Some Results from the Maiella Area. Conference: Convegno annuale dei progetti sismologici, At Sala convegni del Rettorato - Università Roma Tre, Via Ostiense 159, Roma, Volume: Session Project S1: Analysis of the seismic potential in Italy for the evaluation of the seismic hazard.

Scrocca, D. (2017): Istanza di Concessione di Coltivazione di Idrocarburi “Colle Santo”. Quadro Sismotettonico e Sismicità Indotta.

Stabile T. A., G. Iannaccone, A. Zollo, A. Lomax, M. F. Ferulano, M. L. V. Vetri, L. P. Barzagli, A comprehensive approach for evaluating network performance in surface and borehole seismic monitoring, *Geophysical Journal International*, Volume 192, Issue 2, 1 February 2013, Pages 793–806, <https://doi.org/10.1093/gji/ggs049>

Steck, L.K., Velasco, A.A., Cogbill, A.H. & Patton, H.J., 2001. Improving regional seismic event location in China, *Pure appl. Geophys.*, 158, 211–240.

Valoroso, L., L. Improta, P. De Gori, and C. Chiarabba (2011) Upper crustal structure, seismicity and pore pressure variations in an extensional seismic belt through 3-D and 4-D VP and VP/VS models: The example of the Val d’Agri area (southern Italy) *J. Geophys. Res.*, 116, B07303, doi 10.1029/2010JB007661

Zeiler, C. & Velasco, A.A., 2009. Seismogram picking error from analyst review (SPEAR): single-analyst and institution analysis, *Bull. seism. Soc. Am.*, 99(5), 2759–2770.