

Accordo Quadro 2024-2026

MASE, Regione Emilia Romagna, Comune di Ravenna, INGV, ENI

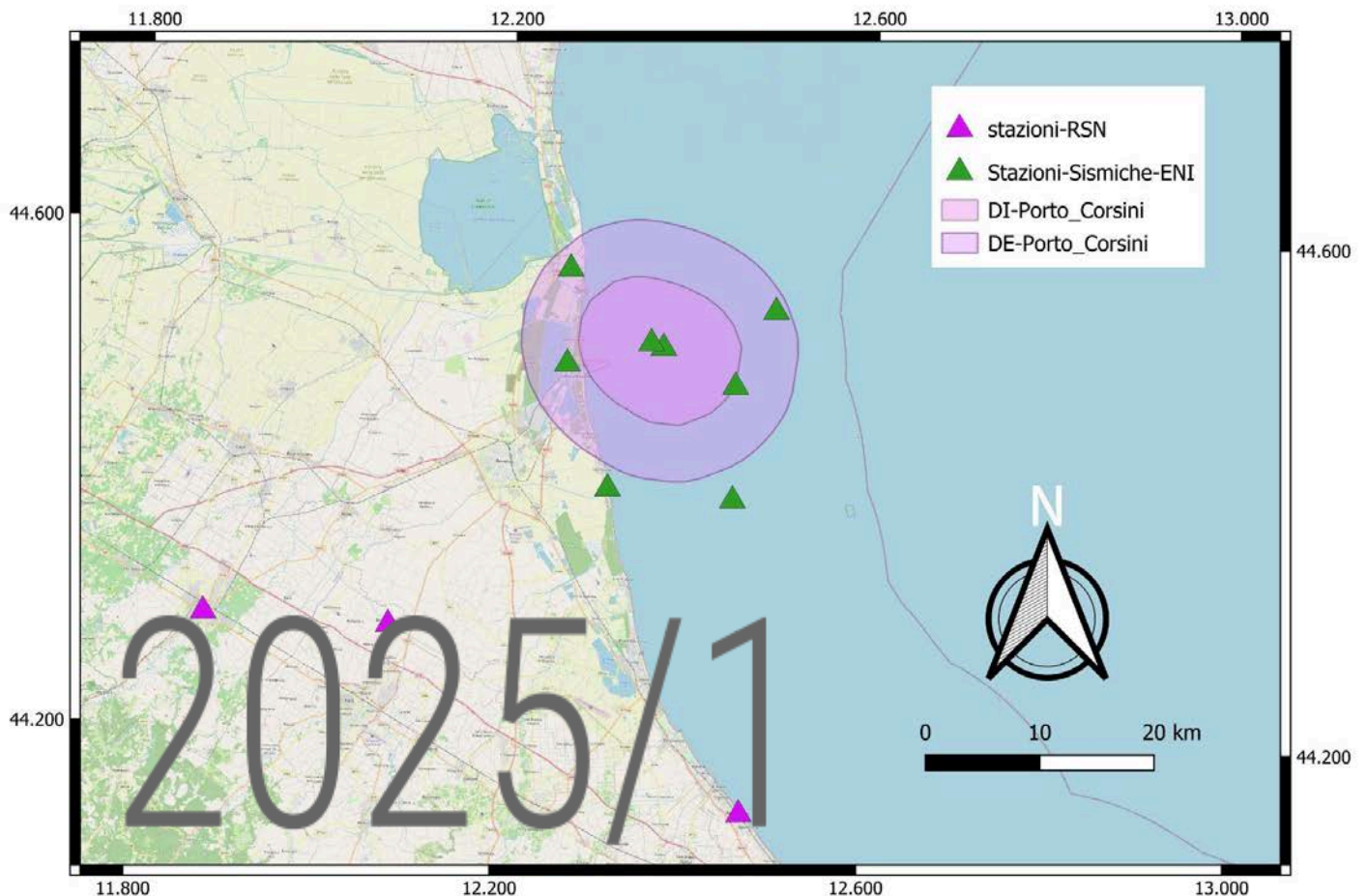
MONITORAGGIO DEL PROGRAMMA SPERIMENTALE DI STOCCAGGIO GEOLOGICO DI CO₂ "Ravenna CCS fase 1"

Responsabile di Progetto: Mario Anselmi, Letizia Anderlini, Giuseppe Pezzo

Autori: M. Anselmi, L. Anderlini, S. Baranello, M. Errico, A. Garcia, L. Martelli, R. Pegna, G. Pezzo,
E. Serpelloni, C. Tolomei, M. Vassallo, E. Vitagliano, L. Zaccarelli, G. Zerbinato &
G. Saccorotti

22/12/2025

Redazione: M. D'Ambrosio



INDICE

Premessa	6
1 Trasferimento dati	8
1.1 Trasferimento dati dal Concessionario a SPM.....	8
2 Parametri di monitoraggio	9
2.1 Funzionamento del monitoraggio.....	9
2.2 Domini, parametri, soglie.....	10
3 Inquadramento geologico e sismico dell'area	12
3.1 Inquadramento geologico.....	12
3.2 Sismicità storica e strumentale dell'area.....	13
4 Validazione rete sismica	16
4.1 Descrizione della rete sismica.....	16
4.2 Soglie di deteazione dallo studio del rumore sismico ambientale considerando la rete integrata.....	18
4.3 Confronto preliminare tra sismicità registrata e soglie teoriche di deteazione.....	22
4.4 Analisi della magnitudo di completezza dal catalogo sismico registrato.....	25
4.5 Considerazioni finali.....	26
5 Validazione rete GNSS	27
5.1 Descrizione rete GNSS.....	27
5.2 Analisi delle interdistanze.....	29
5.3 Analisi di qualità dei dati GPS.....	31
5.4 Considerazioni finali.....	35
6 Monitoraggio sismico e analisi dati	36
6.1 Disponibilità dei dati.....	36
6.2 Modello di velocità.....	37
6.3 Monitoraggio della sismicità.....	38
6.4 Analisi della sismicità localizzata dalla SPM nei domini di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS durante il periodo precedente l'inizio delle attività di iniezione di CO ₂ : 1 Aprile 2023- 04 Agosto 2024.....	38
6.5 Analisi della sismicità localizzata dalla SPM nei domini di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS durante il periodo di iniezione compreso fra il 5 Agosto 2024 ed il 17 Aprile 2025.....	40
6.6 Analisi della sismicità localizzata dalla SPM nei dominio di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS per il semestre di monitoraggio 18 Aprile-18 Ottobre 2025.....	41
7 Misure di deformazione	43
7.1 Elaborazione del dato GPS e serie temporali di spostamento.....	43
7.2 Campo di velocità GPS.....	45
7.3 Misure di deformazione tramite InSAR.....	47
7.4 Livellazioni.....	58
7.5 Considerazioni finali.....	58

8 Monitoraggio DAS.....	60
8.1 Descrizione generale dei sistemi DAS.....	60
8.1.1 Principio di funzionamento.....	60
8.1.2 Parametri di acquisizione.....	62
8.1.2.1 Gauge length.....	62
8.1.2.2 Frequenza degli impulsi.....	62
8.1.2.3 Durata dell'impulso (Pulse Width).....	62
8.1.3 Applicazioni della tecnologia DAS alla sismologia.....	62
8.1.3.1 Direttività.....	63
8.1.3.2 Relazioni fra deformazione dinamica e moto del suolo.....	64
8.2 Il Sistema DAS nel programma sperimentale 'CCS Ravenna fase 1'.....	65
8.3 Caratterizzazione del rumore sismico.....	69
8.3.1 Proprietà spettrali: descrizione generale.....	70
8.3.2 Le componenti a bassa frequenza ed il microsisma marino.....	73
8.3.3 Variazioni del rumore con il processo di iniezione.....	73
8.4 Rapporti segnale-rumore.....	77
8.5 Valutazione delle prestazioni per la localizzazione.....	82
8.6 Osservazioni conclusive.....	83
9 Analisi di dati di pressione e portata.....	85
9.1 Presentazione dei dati.....	85
9.2 Analisi e risultati.....	86
10 Considerazioni conclusive.....	89
Glossario.....	92
Appendice A - Sismicità e rete sismica.....	93
Appendice B - Parametri di qualità per le stazioni della rete GNSS.....	102
Appendice C - Serie temporali di spostamento GPS.....	115
Bibliografia.....	128

Premessa

La presente relazione descrive le attività svolte dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nell'ambito dell'Accordo Quadro per l'applicazione integrata degli Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro (ILG) al Programma sperimentale di stoccaggio di anidride carbonica (CO₂) denominata "CCS Ravenna fase 1" in Emilia Romagna (<https://cms.ingv.it/monitoraggi/ravenna-ccs-fase-1>).

In data 26 gennaio 2023 la società Eni S.p.A (di seguito "Concessionario") ottiene l'autorizzazione al progetto finalizzato allo svolgimento di un programma sperimentale di stoccaggio geologico di anidride carbonica (CO₂) denominato "CCS Ravenna fase 1", per un volume inferiore alle 100.000 tonnellate e durata di iniezione pari ad un massimo di due anni - nel complesso di stoccaggio individuato dal livello esaurito PL2-C del campo Porto Corsini Mare Ovest (PCMW) - denominato "PCMW CCS" - nell'ambito dell'area in concessione di coltivazione di idrocarburi denominata "A.C26.EA".

Di seguito riportiamo una cronologia essenziale delle fasi che hanno portato alla stesura dei documenti che regolano il monitoraggio (Tabella 1.1)

Data	Documento
26 gennaio 2023	Autorizzazione al progetto finalizzato allo svolgimento del programma sperimentale di stoccaggio geologico di anidride carbonica (CO ₂) denominato "CCS Ravenna fase 1"
14 Marzo 2024	Trasmissione Accordo Quadro (AQ) tra il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MaSE), Regione Emilia Romagna, Comune di Ravenna e INGV, nel quale l'INGV viene nominato Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) per il complesso di stoccaggio denominato "PCMW CCS", nell'ambito dell'area in concessione di coltivazione di idrocarburi denominata "A.C26.EA".
15 maggio 2024	Riunione di insediamento del Comitato
28 Giugno 2024	Approvazione del Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio (DGOM)
05 Agosto 2024	Inizio delle operazioni di iniezione da parte del Concessionario nel sito di PCMW CCS
18 aprile 2025	Ratifica dei protocolli d'Intesa tra Comune di Ravenna - Concessionario e Comune di Ravenna - SPM
31 agosto 2025	Termine delle operazioni di iniezione
15 settembre 2025	Comunicazione da parte del Concessionario del fermo dell'impianto di iniezione

Tabella 1.1. Date dei principali passaggi relativi all'approvazione e trasmissione dei documenti autorizzativi e regolatori del monitoraggio e delle principali operazioni industriali del programma sperimentale.

Trattandosi del primo rapporto semestrale, l'obiettivo principale è quello di valutare le prestazioni delle reti di monitoraggio sismico e geodetico nel contesto dei requisiti dettati dagli ILG. Si rammenta tuttavia che le indicazioni per le reti di monitoraggio riportate negli ILG sono state elaborate con riferimento alle sole attività a terra (*on-shore*), mentre per le attività a mare (*off-shore*) viene suggerito di “[...] *applicare gli stessi standard previsti per le attività onshore, ma con opportuni adattamenti tecnici*”. Pertanto, il riferimento ai requisiti richiesti dagli ILG va considerato nell’ottica di una valutazione circa la loro applicabilità anche in ambito *offshore*, evidenziandone al contempo le possibili limitazioni.

Ad essa verranno aggiunte le prime valutazioni del monitoraggio sismico sperimentale utilizzando anche i dati acquisiti tramite il cavo di fibra ottica, installato all’interno del pozzo iniettore. Nel presente rapporto vengono riportati i risultati del monitoraggio sismico dei primi sei mesi di progetto, ovvero dal 18/04/25 al 18/10/2025, e l’analisi dei dati pregressi a partire dall’Aprile 2023.

In questo documento sono presentate inoltre le elaborazioni inerenti la misura delle deformazioni del suolo eseguite dalla SPM, utilizzando i dati satellitari SAR della costellazione Sentinel-1, comparate anche con le misure fornite dal concessionario, e i dati GNSS forniti dal Concessionario integrati con quelli disponibili per l’area.

1 Trasferimento dati

1.1 Trasferimento dati dal Concessionario a SPM

Il trasferimento dei dati sismici pregressi è avvenuto in un'unica soluzione tramite protocolli Microsoft Azure messi a disposizione dal Concessionario. I bollettini sismici forniti contengono tutte le informazioni relative all'equipaggiamento e allo stato di funzionamento di ogni stazione sismica della rete. I dati sismici del monitoraggio, in tempo reale, sono stati invece acquisiti dai sistemi della SPM in formato miniseed standard tramite protocolli seedlink gestiti direttamente dal gestore delle reti per conto del Concessionario.

Il trasferimento dei dati acquisiti dalla fibra ottica (DAS) è avvenuto tramite collegamento VPN ai repository gestiti dal Concessionario. La disponibilità delle registrazioni in tale centro dati ha subito una latenza standard di circa 2 settimane, così come preannunciato dal Concessionario. Ulteriori dettagli sono specificati nel Capitolo 8.

Per i dati geodetici GNSS sono stati forniti i dati RINEX giornalieri di tutte le stazioni della rete in un unico trasferimento per i dati a partire dalla data di installazione di ciascuna stazione fino al 29/02/2024 (unitamente ai file descrittivi dei metadati delle stazioni), mentre a partire dal 01/03/2024 i dati giornalieri in formato RINEX sono stati forniti tramite un server ftp. Per i dati di deformazione InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) sono state fornite le elaborazioni di spostamento, eseguite da parte del Concessionario, relative ai dati satellitari delle costellazioni RADARSAT-2, SENTINEL-1 e COSMO-SkyMed per l'area di Ravenna aggiornati al 2024.

Per i dati di livellazione, il Concessionario ha creato una cartella dedicata a dati e documenti nel servizio di archiviazione cloud OneDrive di Microsoft, fornendo accesso tramite procedura di autenticazione.

Le informazioni utilizzate per l'inquadramento geologico di questo rapporto sono state acquisite sulla base di alcune pubblicazioni scientifiche riferite all'arco esterno della catena appenninica e all'avanfossa adriatica nella zona della Concessione.

Infine, i dati di iniezione (pressione di poro e volumi iniettati di CO₂) sono stati trasmessi dal Concessionario con invio di file cumulativi e giornalieri attraverso posta elettronica.

2 Parametri di monitoraggio

2.1 Funzionamento del monitoraggio

Gli ILG (Dialuce et al., 2014) prescrivono la redazione, ad opera del Comitato, di un Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio (DGOM) nel quale vengono indicate le modalità operative di gestione del monitoraggio e di interazione tra i vari soggetti coinvolti.

In tale documento, come descritto dagli ILG al capitolo 9, vengono definite le modalità di monitoraggio delle deformazioni del suolo, della pressione di poro e dell'attività sismica nella zona interessata dalle operazioni. Per le deformazioni del suolo, il monitoraggio mira a identificare eventuali variazioni spazio-temporali di medio-lungo periodo rispetto a dei valori di fondo (background). Per la sismicità, il monitoraggio consiste in un controllo in tempo quasi-reale (entro 24/48 ore) degli eventi sismici avvenuti nei domini di interesse, e delle loro relazioni con i parametri di iniezione e/o produzione.

Per l'implementazione di un modello decisionale che identifica le azioni da intraprendere in base alla variazione dei parametri monitorati, il DGOM deve inoltre contenere le seguenti informazioni:

- Domini di monitoraggio
- Parametri monitorati
- Valori di riferimento e corrispondenti livelli allerta.

Gli ILG, infine, definiscono due scenari a seconda che l'attività antropica comprenda o meno la reiniezione nel sottosuolo di fluidi incompressibili, quali ad esempio le acque petrolifere. Nel primo caso, le azioni da compiere al superamento dei diversi livelli di allerta definiti nel TLS sono regolamentate da automatismi legati a precisi valori di soglia. Nel secondo caso, invece, il modello decisionale proposto prevede che la transizione da un livello all'altro avvenga attraverso valutazioni effettuate di concerto tra i componenti del Comitato, nell'ambito delle rispettive competenze.

Nel caso specifico del progetto di stoccaggio sperimentale "Ravenna CCS fase 1" il Comitato ETS nel parere del 22.10.2022 (BUIG - Bollettino ufficiale degli idrocarburi e delle georisorse - Anno LXVII, n. 1 - 31 gennaio 2023) ha stabilito che *"il sistema decisionale [Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio (DGOM)]", previsto dagli Indirizzi e Linee Guida [...] debba essere operativo prima dell'entrata in esercizio delle attività di iniezione di CO₂ in giacimento"*.

Pertanto il documento, (reperibile all'indirizzo <https://unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/2024/06/Documento-di-gestione-operativa-del-monitoraggio-DGOM-CCS-Ravenna-Fase1.pdf>) è stato redatto in maniera preliminare, seguendo i principi descritti dagli ILG, non avendo a disposizione un quadro informativo di natura geofisica sufficientemente completo legato all'analisi dei dati raccolti. Inoltre, poichè gli ILG non regolamentano specificamente i monitoraggi geofisici di siti off-shore nè quelli preposti

allo stoccaggio della CO₂, per poter applicare il sistema decisionale proposto dagli ILG è stato assunto un profilo di maggior prudenza, considerando il comportamento della CO₂ (il cui stato fisico e comportamento dinamico dipendono dalle condizioni di pressione e temperatura all'interno del giacimento) come fluido incompressibile al pari, ad esempio, delle acque petrolifere.

2.2 Domini, parametri, soglie

Nel DGOM sopra citato, sono stati definiti i domini di monitoraggio prendendo in considerazione le caratteristiche minime richieste negli ILG, tenendo conto sia dell'attività prevista nella concessione A.C26.EA (attività sperimentale di iniezione di anidride carbonica CO₂) sia dell'estensione del giacimento. Il livello mineralizzato esaurito dove viene effettuata l'iniezione ha una profondità di circa 3 km. Per circoscrivere il Dominio Interno (DI) è stato considerato il volume contenuto in un raggio di 5 km attorno al limite dell'area mineralizzata, ed estensione in profondità sino a -8 km s.l.m. Per circoscrivere il Dominio Esteso (DE) è stato considerato un volume, contenuto in un raggio di 5 km attorno al DI, ed esteso sino ad una profondità di -13 km s.l.m. La mappa con i contorni dei due domini è riportata in Figura 2.1.

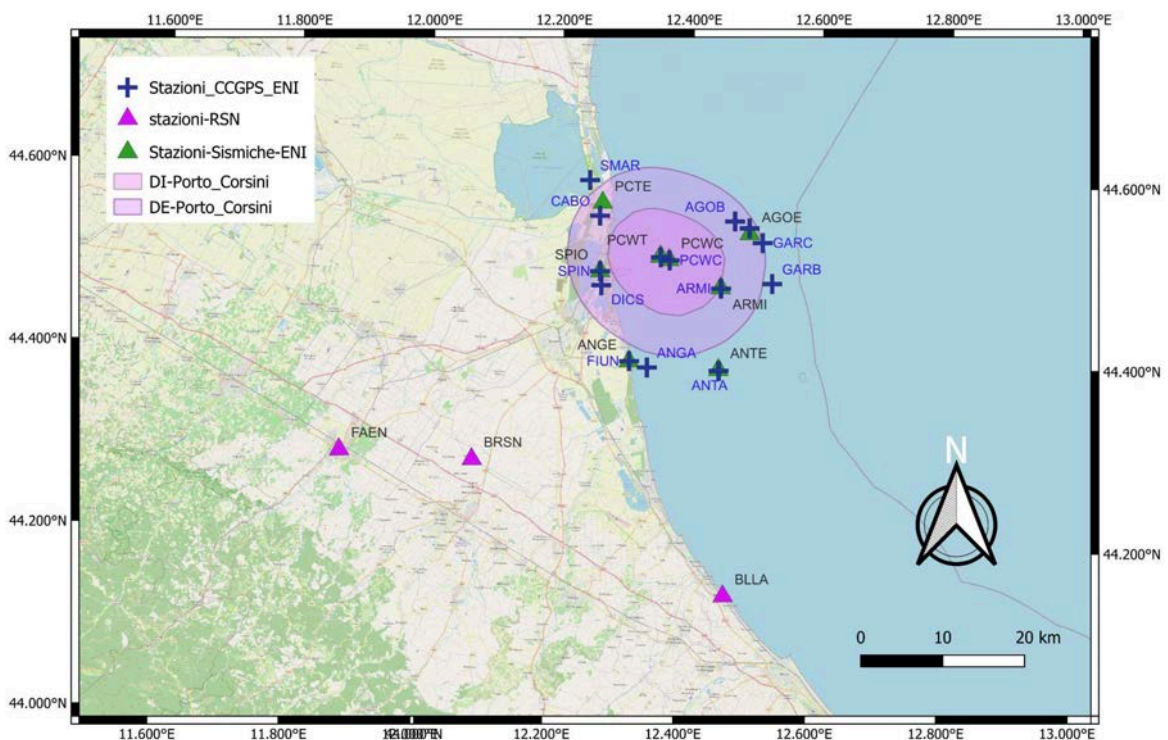


Figura 2.1 Mappa dell'area di Porto Corsini che mostra i Domini Interno ed Esteso (DI e DE), le stazioni della rete sismica del Concessionario (in verde) e le tre stazioni della Rete Sismica Nazionale (BRSN, BLLA e FAEN) in magenta.

Pertanto in questo contesto, a valle delle considerazioni e delle assunzioni sopra riportate, viene applicato un sistema TLS di tipo automatico. Esso si basa sui seguenti parametri:

- Coordinate ipocentrali rispetto al DI;
- Magnitudo;
- PGV (Peak Ground Velocity);
- PGA (Peak Ground Acceleration).

Tali valori di soglia sarebbero da definire caso per caso; tuttavia, in mancanza del quadro conoscitivo di riferimento, abbiamo fatto riferimento ai valori generici suggeriti dagli ILG per le attività di reiniezione, che sono presentati nella Figura 2.2. E' sufficiente pertanto che, per un evento localizzato internamente al DI, uno dei parametri osservati superi il valore di soglia per far passare l'attenzione al livello successivo (TLS con automatismi).

Livello di attivazione	Semaforo	M_{max}	PGA (% g)	PGV (cm/s)
0	Verde	$M_{max} \leq 1.5$	-	-
1	Giallo	$M_{verde} \leq M_{max} \leq 2.2$	0.5	0.4
2	Arancio	$M_{giallo} \leq M_{max} \leq 3.0$	2.4	1.9
3	Rosso	$M_{arancio} < M_{max}$	6.7	5.8

Figura 2.2: Livelli di attivazione e valori soglia per i parametri sismici come definiti negli ILG, cap. 9, Tabella 3. Nel documento originale l'unità fisica di PGV è stata erroneamente indicata in cm/s².

I quattro livelli/colori del TLS (ILG, cap. 9.2) sono riassunti in maniera sintetica, come segue:

- **Ordinario** – modalità operativa e monitoraggio ordinari
- **Attenzione** – operatività ordinaria, comunicazione del monitoraggio
- **Riduzione** – riduzione della attività produttive, comunicazione del monitoraggio
- **Sospensione** – stop delle attività produttive, comunicazione del monitoraggio

Le azioni da mettere automaticamente in atto al superamento di ciascuna soglia sono estensivamente descritte nel DGOM ed ai capp. 9.3 e 9.4 degli ILG.

3 Inquadramento geologico e sismico dell'area

3.1 Inquadramento geologico

La concessione di coltivazione di idrocarburi "A.C26.EA" all'interno della quale si individua il "complesso di cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica del campo di Porto Corsini Mare Ovest" (d'ora in avanti PCMW CCS) si trova in mare, a pochi chilometri dalla costa e in direzione E-NE dal porto di Ravenna - Casalborgorsetti (Figura 3.1a).

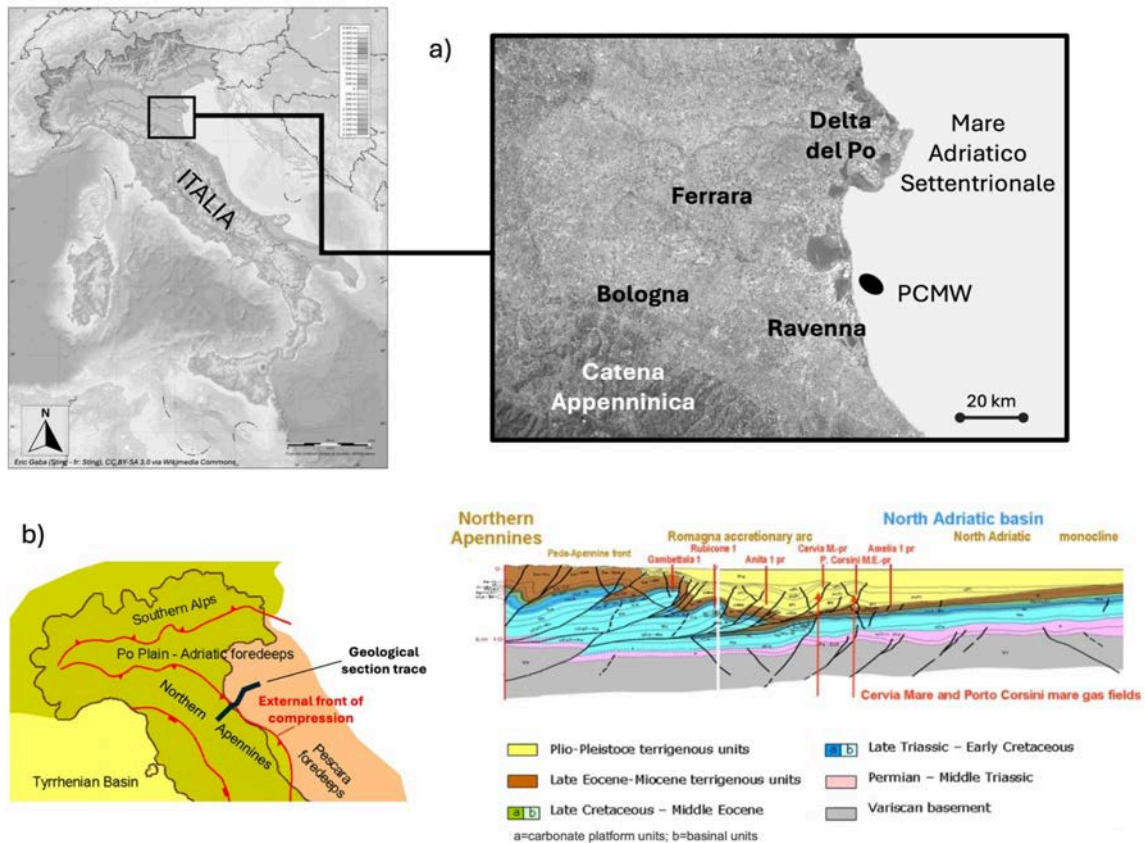


Figura 3.1: Campo di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW CCS): a) collocazione geografica, b) domini geodinamici di riferimento e sezione geologica che mostra le strutture anticlinali e i principali sovrascorrimenti dell'area. Linee rosse: principali lineamenti stratigrafici compressivi (triangoli rossi) e distensivi (rettangoli rossi). Le immagini sono state modificate a partire da Bertello et al., 2010.

Dal punto di vista della sequenza stratigrafica, l'area ricade all'interno della PPAF (Po Plain Adriatic Foredeep), un bacino geologico profondo, parallelo all'Appennino Settentrionale e caratterizzato da una generale sedimentazione, impilamenti rocciosi e discontinuità strutturali legati alla tettonica compressiva Cenozoica (Figura 3.1b). Il meccanismo compressivo relativo alla subduzione della Placca Adria al di sotto di quella Euroasiatica ha portato alla strutturazione di tre sistemi montuosi (Appennino Settentrionale, Alpi Meridionali e Dinaridi) e alla migrazione nel tempo del depocentro della PPAF in direzione Est-NordEst, a partire dal

tardo Tortoniano-Gelasiano. Rispetto al progetto di stoccaggio, la fase 1 ha previsto il trasporto dell'anidride carbonica fino ad una piattaforma offshore del campo PCMW-CCS) e l'iniezione nel complesso di stoccaggio PL2-C, a circa 3000 metri di profondità sotto il livello marino (Comunicato Eni-Snam, 2024). Il campo PCMW CCS corrisponde ad una struttura geologica sepolta, che appartiene alla parte più prospiciente ed esterna della Catena Appenninica Settentrionale (fronte esterno di compressione in Figura 3.1b). Tale struttura è costituita da depositi di avanfossa di età Plio-Pleistocenica, deformati in una serie di pieghe anticlinali con assi orientati in direzione NordOvest-SudEst. Le pieghe sono limitate a NordEst da sovrascorrimenti radicati alla base del Pliocene (sezione geologica in Figura 3.1b).

In particolare, il livello di stoccaggio, denominato PL2-C nella terminologia mineraria, si trova nella formazione geologica di Porto Garibaldi, in un intervallo stratigrafico del Pliocene medio-superiore, dove si alternano livelli sabbiosi e livelli argillosi appartenenti a corpi torbiditici (e.g., Ghielmi et al., 2013). L'intera successione terrigena plio-pleistocenica è infine caratterizzata da molteplici livelli sabbiosi che sono stati produttivi nel passato e che risultano in parte produttivi ancora oggi.

3.2 Sismicità storica e strumentale dell'area

L'analisi preliminare della sismicità storica e recente a largo di Ravenna è stata svolta prendendo in considerazione un'area compresa tra Lagosanto e Milano Marittima in direzione Nord-Sud, e tra Bagnacavallo e il Mare Adriatico in direzione Est-Ovest (Lat.: 44.3–44.8; Lon.; 12.0–12.6) (Figura 3.2).

Per quanto riguarda la sismicità storica dell'area, è stato consultato innanzitutto il catalogo PFG (Progetto Finalizzato Geodinamica; Postpischl, 1985) in cui sono raccolti i terremoti italiani avvenuti dall'anno 1000 al 1980, senza soglia di intensità, corredati di tutti i parametri epicentrali. Questo rappresenta, a tutt'oggi, un punto di riferimento per lo studio dei terremoti storici di bassa magnitudo.

Successivamente, i dati estrapolati dal PFG sono stati confrontati e integrati, con quelli inclusi nel più recente e aggiornato Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15; Rovida et al., 2022), che contiene tutti gli eventi sismici dal 1000 al 2020 con Magnitudo ≥ 4.0 o intensità ≥ 5 . Tale catalogo esclude quindi gli eventi di minore energia, ma copre gli anni dal 1980 al 2020 e in certi casi riporta dati revisionati e più accurati.

Il lavoro svolto ha portato all'identificazione di 15 terremoti (Figura 3.2 e Tabella A.1 in Appendice A), suddivisi in eventi principali e repliche ad essi associati, e caratterizzati da bassa energia ($M \leq 4.1$).

In tabella, oltre alla data e all'orario, sono riportati per ogni evento il catalogo di riferimento (colonna "Cat.") e i relativi parametri epicentrali (colonne data, zona, intensità " I_0 ", latitudine e longitudine). L'ultima colonna ("M") riporta i valori in magnitudo momento (Mw) per i dati

provenienti dal CPTI (6 casi, indicati con un asterisco), mentre per quelli da catalogo PFG presenta i valori di magnitudo macrosismica (Mm), una misura generica senza tipologia specifica (per maggiori dettagli si veda la definizione in Postpischl (1985).

Per la sismicità strumentale recente, ovvero dal 1985 ad oggi, è stato consultato il bollettino dei terremoti strumentali registrati e localizzati dall'INGV (<https://www.ingv.it>; accesso 17 ottobre 2025). In questo caso è stata effettuata una ricerca nell'area di interesse per eventi di magnitudo $-1 < M < 10$ e profondità comprese tra -10 e 50 Km. Sono stati individuati 162 terremoti (Figura 3.2 e Tabella A.2 in Appendice A), con magnitudo massima eguale a 4.3.

Dall'analisi preliminare condotta integrando le informazioni presenti nei cataloghi PFG e CPTI, per la sismicità storica (1000-1985), e i dati del bollettino INGV, per quella recente (dal 1985 al 2025), emerge che l'area è caratterizzata da eventi sismici la cui massima Magnitudo osservata è pari a 5.5. La Figura 3.2 rappresenta la distribuzione geografica dei 15 terremoti storici (rombi turchesi) e dei 162 strumentali (cerchi rossi) identificati e i limiti dei DI e DE (linea viola e arancione, rispettivamente). Nel DI si osservano 8 eventi sismici dal catalogo strumentale, e nessuno dai cataloghi storici; nel DE sono invece stati identificati 15 terremoti recenti rilevati strumentalmente, e 3 avvenuti in età storica. Si sottolinea come, vista l'incertezza sulla stima della localizzazione degli eventi storici, alcuni eventi che ricadono appena fuori del limite del DE potrebbero in realtà posizionarsi internamente.

Per gli eventi che, in mappa (Figura 3.2), ricadono all'interno dei contorni viola e arancione (DI e DE, rispettivamente), è comunque necessario considerare anche la rispettiva profondità ipocentrale, ai fini dell'effettiva collocazione all'interno del dominio, compatibilmente con i limiti di risoluzione delle localizzazioni strumentali. Ad esempio, i terremoti che in mappa ricadono nel DI appartengono effettivamente a tale dominio solo se la loro profondità è inferiore a 8 Km. Tra questi, soltanto due eventi soddisfano tale criterio: essi sono evidenziati in fucsia nella Tabella A-2. Per profondità comprese tra 8 e 13 Km, il dominio di appartenenza è il DE (Dominio Esteso). In questo intervallo rientrano effettivamente 12 eventi, che sono evidenziati in rosa nella Tabella A-2. Tutti gli eventi con profondità superiori a 13 km, risultano al di fuori di entrambi i domini.

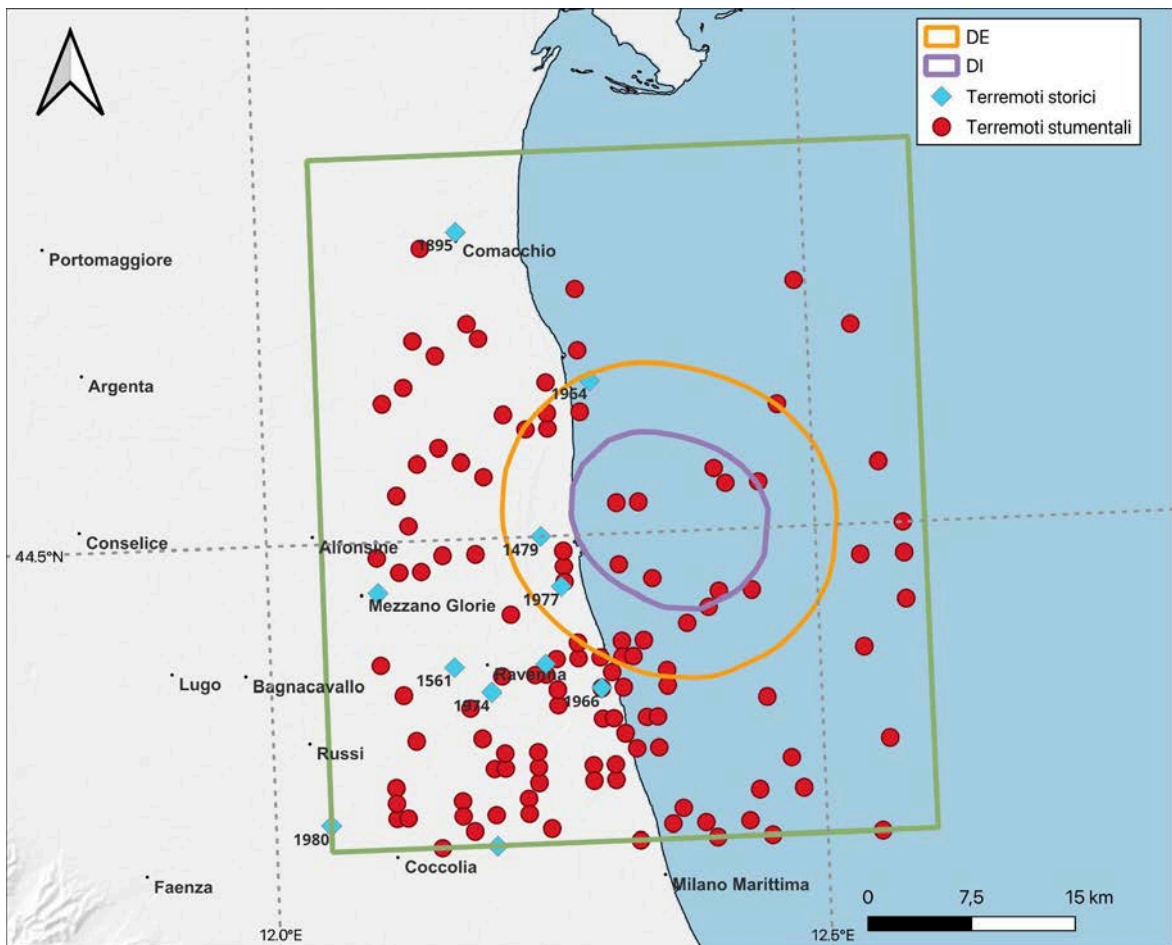


Figura 3.2: Mappa della distribuzione dei terremoti che ricadono nell'area di interesse (rettangolo in verde), sia storici (relativi al periodo 1000-1985, rombi turchesi) che strumentali (relativi al periodo 1985-2025, cerchi rossi). Il contorno viola identifica il DI mentre quello arancione identifica il DE.

4 Valutazione della rete sismica

L' idoneità della rete sismica è stata valutata seguendo le indicazioni riportate nella prescrizione n°6 impartita dal comitato ETS¹, che recita: *“Relativamente al monitoraggio della microsismicità, il Gestore deve realizzare una rete microsismica considerando stime realistiche del rumore sismico di fondo alle stazioni e stime aggiornate delle prestazioni locali della Rete Nazionale...”* e che richiama ai Capitoli 5 e 9 degli ILG, dove è riportato che la rete sismica deve essere valutata su base prestazionale e deve soddisfare i seguenti requisiti:

- 1. nel dominio interno di rilevazione, rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale ML compresa tra 0 e 1 ($0 \leq ML \leq 1$) e con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri;*
- 2. nel dominio esteso di rilevazione, migliorare di circa 1 unità il livello di magnitudo di completezza delle rilevazioni effettuate dalle reti nazionali o regionali che svolgono servizio di monitoraggio sismico per finalità di protezione civile a livello nazionale o regionale, con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro contenuta entro circa 1 km;*
- 3. determinare l'accelerazione e la velocità del moto del suolo provocata da eventuali terremoti (deboli e forti) presso i punti di misurazione;*
- 4. integrarsi opportunamente con le reti di monitoraggio esistenti (ovvero: rete nazionale, reti regionali e ulteriori eventuali reti locali) al fine di migliorare l'accuratezza e la completezza della rilevazione della sismicità.*

Come già richiamato nelle premesse, è necessario sottolineare che le indicazioni riportate negli ILG fanno riferimento alle sole attività *on-shore*, dove l'adeguamento ai requisiti sopra esposti può essere eseguito senza particolari impedimenti logistico-ambientali. Per quanto riguarda invece un'attività a mare (*off-shore*), come quella oggetto del presente monitoraggio, gli ILG suggeriscono di *“applicare gli stessi standard previsti per le attività onshore, ma con opportuni adattamenti tecnici”*. Pertanto, la rispondenza ai requisiti sopra esposti sarà considerata ai fini di una valutazione circa l'applicabilità dei medesimi a contesti *offshore*, al tempo stesso evidenziandone le possibili limitazioni.

Per la valutazione delle prestazioni della rete sismica, non avendo a disposizione un catalogo di eventi sismici sufficientemente popolato da poter eseguire analisi statistiche mirate, dobbiamo procedere ad una validazione della rete sismica teorica basata su simulazioni numeriche della capacità di detezione.

¹ Decreto Ministeriale 26 gennaio 2023 della Direzione Generale Infrastrutture e Sicurezza del Ministero dell'ambiente e della Sicurezza Energetica, pubblicato sul BUIG - Bollettino ufficiale degli idrocarburi e delle georisorse - Anno LXVII, n. 1 -31 gennaio 2023 Appendice all'All.1, par. 9.1 della prescrizione n. 6

4.1 Descrizione della rete sismica

La rete sismica del campo PCMW CCS è composta da stazioni installate sia in terraferma (3 stazioni: ANGE, PCTE e SPIO) che in mare aperto (5 stazioni: AGOE, ANTE, ARMI, PCWC, PCWT; Tabella 4.1 e Figura 4.1). A questa rete (denominata P1), la SPM ha integrato 3 stazioni della Rete Sismica Nazionale dell'INGV (Tabella 4.2 e Figura 4.1)

Tutte le 8 stazioni della rete P1 sono equipaggiate con un acquirente Solgeo Dymas24 System V (<https://www.luchsinger.it/contents/products/data-sheet-dymas-24-master-v.pdf>) con segnale continuo campionato ad una frequenza di 200 Hz.

Le stazioni in terraferma ANGE e SPIO hanno un sismometro di pozzo modello Sara SS10BHV (<https://products.quakelogic.net/product/sara-ss-bhv-borehole-seismograph/>), mentre l'altra stazione PCTE è equipaggiata con un sensore Lennartz Le3Dlite MKII (<https://reftek.com/sites/default/files/2023-12/REFETKLennartz-ProductBrochure.pdf>).

Tutte le stazioni in terraferma sono anche dotate di un accelerometro di tipo Sara SA10 (https://www.sara.pg.it/prodotti.php?id=57&n=sa-10&cat=single-product&cookie_consent=1), e sono alimentate tramite rete elettrica a 230 VAC, tranne la stazione SPIO che è invece alimentata a pannelli solari.

Le stazioni offshore ANTE e PCWT sono alimentate dalla tensione a 24 VDC della piattaforma, a sua volta alimentata da pannelli solari, mentre le altre stazioni offshore sono alimentate a 230 VAC

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota (m)	Quota del sensore (m)	Distanza dalla costa (km)	Data di installazione
AGOE	44.540878°	12.495122°	0	-23	17	22/03/2023
ANGE	44.397150°	12.315581°	1	-69	on-shore	27/01/2022
ANTE	44.390842°	12.453144°	0	-15	11	16/02/2023
ARM I	44.480647°	12.452836°	0	-19	13	23/03/2023
PCTE	44.570003°	12.267675°	1	1	on-shore	28/01/2022
PCWC	44.509675°	12.372431°	0	-14	7	22/03/2023
PCWT	44.513111°	12.358917°	0	-13	6	22/03/2023
SPIO	44.494886°	12.267086°	2	-97	onshore	29/11/2022

Tabella 4.1. Tabella delle stazioni sismiche della rete del Concessionario.

La Tabella 4.2 elenca invece le stazioni della RSN INGV più vicine all'area di studio, che sono state integrate alla rete del Concessionario.

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota (m)	Località	Data installazione	Distanza dal pozzo iniettore (km)
BLLA	44,1429	12,4703	1,00	BIELLA	15/01/2009	46
BRSN	44,2842	12,0802	20,00	BARISANO	01/03/2003	42
FAEN	44,2895	11,8770	41,00	FAENZA	17/09/2007	34

Tabella 4.2 Tabella delle stazioni della Rete Sismica Nazionale utilizzate nel monitoraggio.

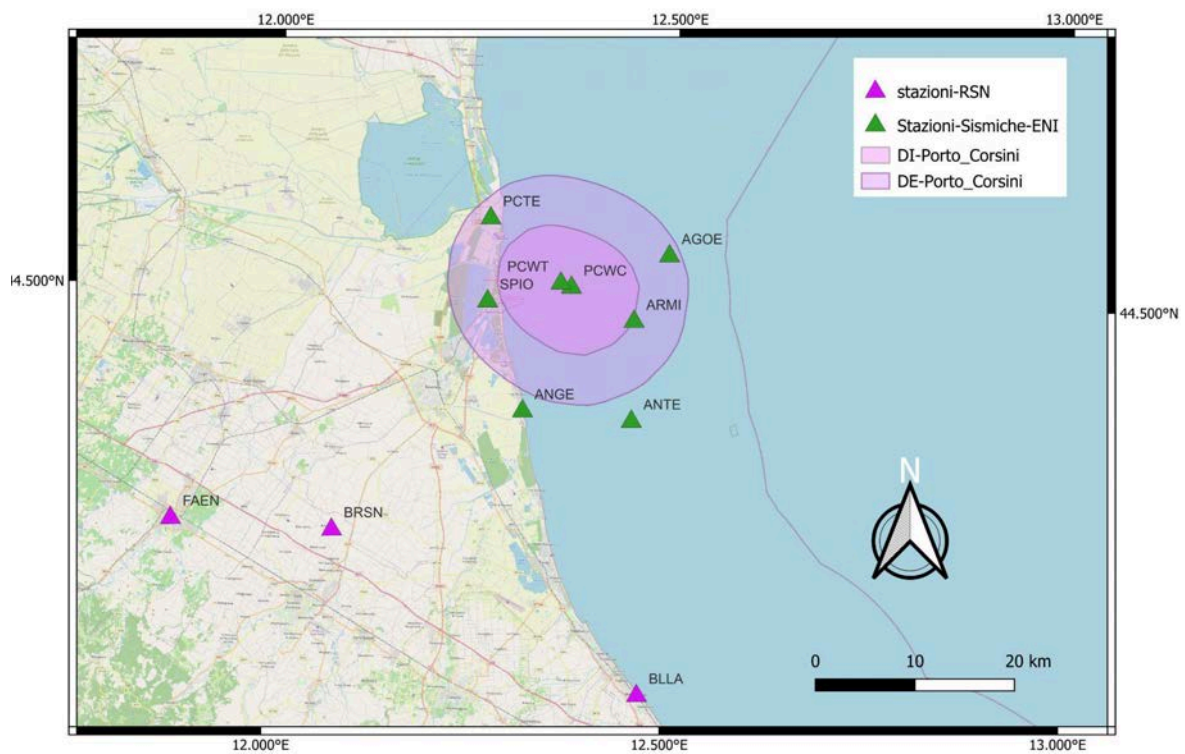


Figura 4.1 Mappa del campo PCMW CCS, raffigurante i limiti dei domini DI e DE, le stazioni della rete locale del Concessionario (in verde) e le stazioni della RSN INGV (in magenta).

4.2 Soglie di detezione dallo studio del rumore sismico ambientale considerando la rete integrata

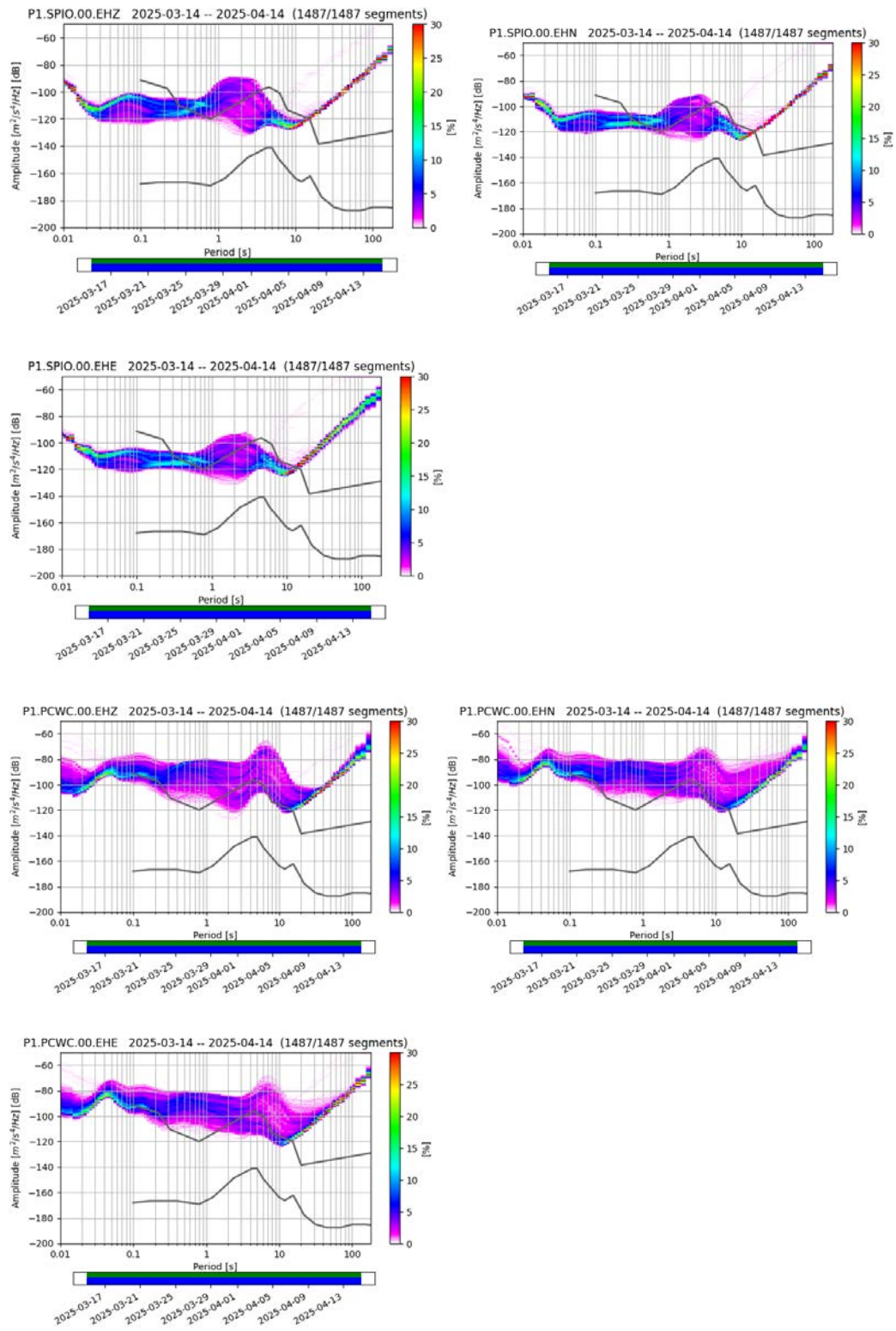
Per comprendere le prestazioni, in termini di soglie di detezione di eventi sismici della rete di monitoraggio del campo PCMW CCS, è stata effettuata un'analisi basata sul rapporto tra segnale e rumore del minimo evento che è possibile registrare ad ogni stazione, seguendo il metodo proposto da Vassallo et al. (2012). Come livello di rumore caratteristico di ogni stazione è stato preso il 90° percentile mediato fra 1 e 40 Hz delle PPSD (Probability Power Spectral Density) calcolate sulle registrazioni che vanno dal 15 marzo al 15 aprile 2025 (Figura 4.2, Figura A.1, Figura A.2). Come segnale invece si considera lo spettro teorico per le fasi P ed S, calcolato seguendo l'approccio di Brune (Brune, 1970; 1971). In tale formulazione, il segnale spettrale atteso, per un terremoto di fissata magnitudo e distanza dalla stazione, viene calcolato utilizzando i parametri relativi alla sorgente sismica e al mezzo di propagazione (stress-drop, densità, velocità delle onde P ed S, attenuazione anelastica). In accordo con la letteratura scientifica disponibile, per queste stime sono stati adottati i seguenti parametri di sorgente e di propagazione: stress-drop $\Delta\sigma=1.0$ MPa, attenuazione $t^*=0.08$ s (tempo ridotto), $V_p=4126$ m/s, $V_s=2383$ m/s, densità $\rho=2.4$ g/cm³ (Zaccarelli et al. 2021; Carannante et al. 2020; Malagnini et al. 2012)

Fissato un evento di magnitudo M_w che avviene ad una distanza R da una stazione, il terremoto si considera rilevato se il rapporto segnale/rumore è superiore a 5. Questa soglia ci assicura che la fase considerata (P o S) abbia un'ampiezza tale da superare significativamente il livello di rumore caratteristico della stazione, consentendo in tal modo la stima del tempo di arrivo dell'onda considerata. Per ogni stazione è quindi possibile calcolare, per un determinato insieme di magnitudo, le distanze al di sotto delle quali l'evento è registrato con un rapporto segnale/rumore maggiore di 5. Avendo a disposizione le curve di rilevabilità distanza-magnitudo per ogni stazione della rete, è possibile calcolare la soglia di detezione per l'intera rete, integrata con le stazioni IV che consideriamo a contorno, come mostrato in Figura 4.2.

Per ogni punto della mappa (sia interno che esterno alla rete) preso come possibile ipocentro, si stima quindi la magnitudo minima che un evento deve avere per essere registrato con un rapporto segnale rumore superiore a 5 ad almeno 5 stazioni. La scelta della soglia sul numero di stazioni è determinata dalla necessità di poter localizzare l'evento con una precisione accettabile.

Abbiamo infine realizzato delle mappe di soglie di detezione teoriche sia per la fase P che per la fase S. La fase P è quella da tenere principalmente in considerazione per effettuare la localizzazione, mentre la fase S è quella che viene generalmente utilizzata per la stima della magnitudo, e che fornisce maggiori vincoli alla determinazione della profondità ipocentrale.. Per le caratteristiche tipiche che distinguono onde P e S (rispettivamente polarizzate longitudinalmente e perpendicolarmente alla direzione di propagazione) si considera il livello di rumore medio della componente verticale (Z) per stimare la detezione delle onde P, e quello

ricavato da una delle due componenti orizzontali E o N per la definizione delle mappe di soglie di detezione della fase S.



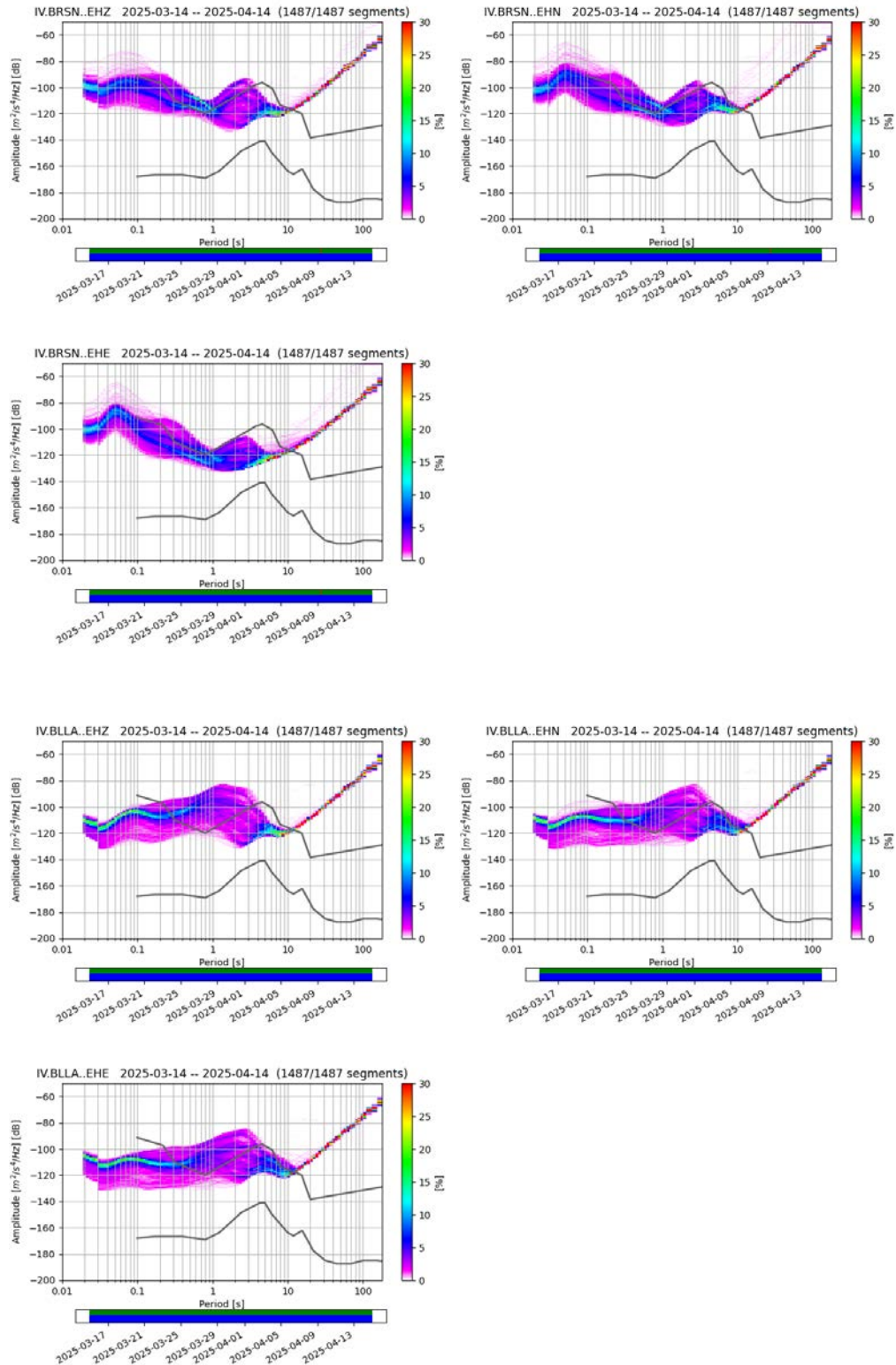


Figura 4.2. Grafici delle curve di rumore medio calcolate come 90° percentile delle PPSD per il periodo che va dal 15 Marzo al 15 Aprile 2025 per alcune delle stazioni (SPIO, PCWC, BRSN, BLLA) della rete integrata alle tre componenti Z, N e E rispettivamente da sinistra a destra. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Peterson (1993) come riferimento. Le PPSD relative alle rimanenti stazioni sono riportate nell'Appendice A- Figura A.1).

Le mappe di detezione teorica della rete integrata sono mostrate nella Figura 4.3.A e Figura 4.3.B, rispettivamente per la fase P e per la fase S. Si osserva come nell'intera area del DI la magnitudo minima teorica degli eventi che si possono rilevare e localizzare corrisponde a $1.8 \leq M_w \leq 2.2$, mentre per il DE questa soglia si alza a $1.8 \leq M_w \leq 2.3$. Per quanto riguarda invece la magnitudo minima degli eventi per i quali è possibile ottenere una stima affidabile di magnitudo le soglie si abbassano a $1.6 \leq M_w \leq 2.2$ nel DI e $1.9 \leq M_w \leq 2.3$ nel DE (Figura 4.3.B).

Nelle figure mostriamo la capacità di detezione a 3 diverse profondità, scelte a 0 km (livello del mare), a 3 km (approssimativamente la profondità del pozzo iniettore) e 8 km (approssimativamente il limite inferiore del Dominio Interno). Tuttavia non si riscontra grande variabilità della capacità di detezione in funzione delle diverse profondità.

La scelta del 90° percentile insieme alla soglia di rapporto segnale/rumore pari a 5 (entrambe alquanto conservative) ci permettono di confrontare questo valore di soglia di detezione, non tanto con la magnitudo minima rilevabile dalla rete, quanto direttamente con la magnitudo di completezza, ovvero quella magnitudo al di sopra della quale vi è la certezza di rilevare tutti gli eventi.

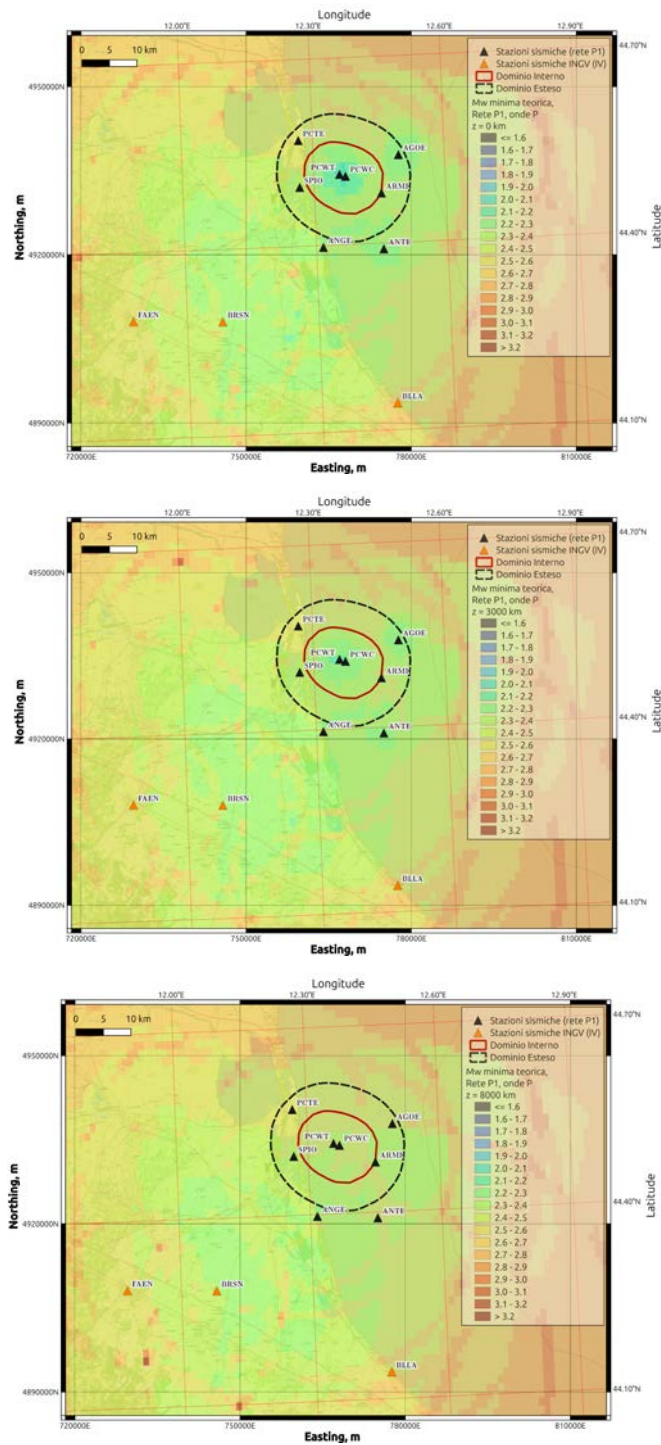


Figura 4.3.A Mappa della capacità di detezione della rete integrata P1 e IV, con profondità di riferimento fissate a 0 km, 3 km e 8 km (dall'alto verso il basso). Soglie di magnitudo minima rilevabile nell'area rispetto alla fase P, calcolate considerando i livelli di rumore registrati sulla componente verticale Z

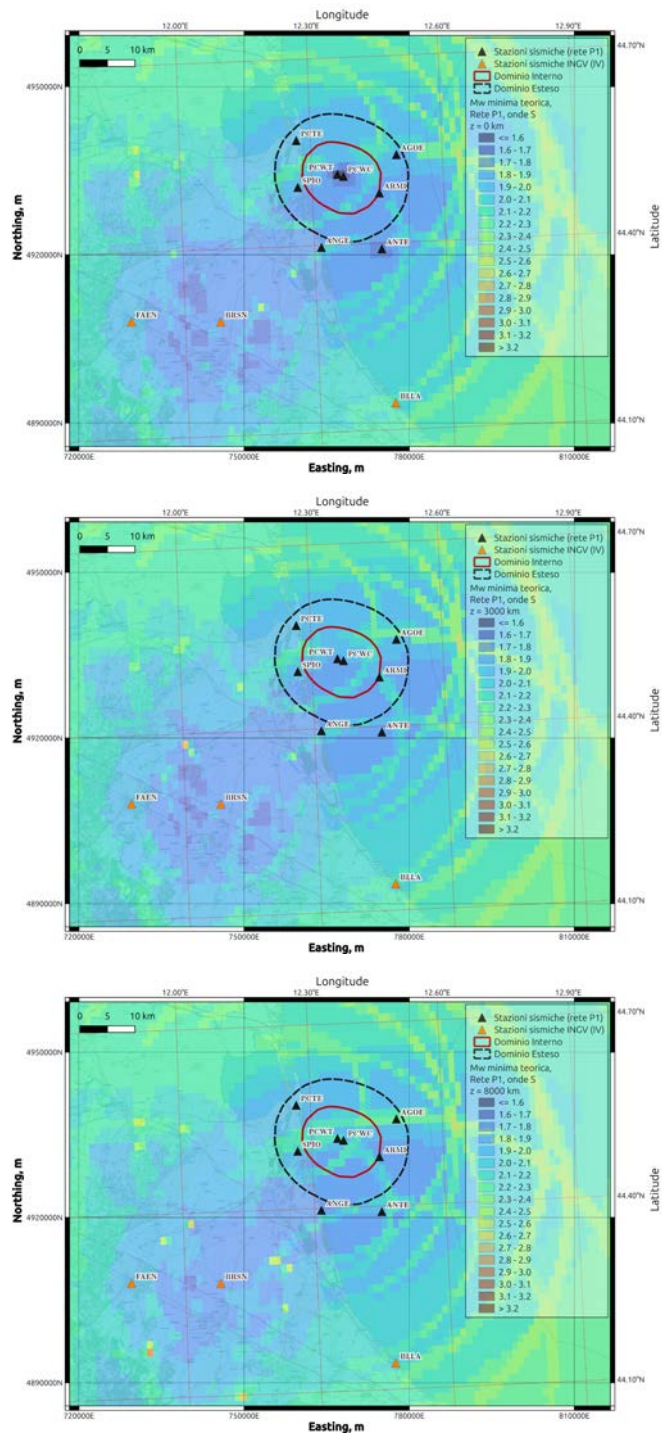


Figura 4.3.B Mappa della capacità di detezione della rete integrata P1 e IV, con profondità di riferimento fissate a 0 km, 3 km e 8 km (dall'alto verso il basso). Soglie di magnitudo minima rilevabile rispetto alla fase S, calcolate considerando i livelli di rumore registrati sulla componente orizzontale E delle stazioni.

4.3 Confronto preliminare tra sismicità registrata e soglie teoriche di detezone

Come descritto nel Paragrafo 4.2, le soglie teoriche di detezone della rete di monitoraggio del campo PCMW CCS sono determinate in termini di Magnitudo momento (M_w), mentre la magnitudo calcolata per gli eventi nel bollettino sismico di monitoraggio è la magnitudo locale (M_{Lbj} , vedere Capitolo 6) o, quando non disponibile, la ML. Le analisi teoriche di detezone della rete indicano nelle aree dei domini, a 8 km di profondità, una soglia di detezone in magnitudo momento $1.8 < M_w < 2.3$ per le onde P e $1.9 < M_w < 2.3$ per le onde S. Per fare un confronto con la sismicità registrata dalla rete integrata (P1+IV), è stata calcolata la M_w degli eventi riportati nella Tabella 4.3 utilizzando la relazione sperimentale suggerita da Munafò et al, (2016) che, sebbene non sia riferito specificamente alla zona di interesse, rappresenta uno dei lavori di riferimento in letteratura riguardante i rapporti tra ML e M_w per piccole magnitudo in Italia. Il risultato (che è stato possibile ottenere per 7 eventi) è riassunto nella Figura 4.4: l'intervallo di magnitudo è compreso fra i valori $0.83 < ML < 2.25$, che corrispondono a valori di M_w compresi tra 1.7 e 2.65, in generale accordo con i livelli di detezone attesi.

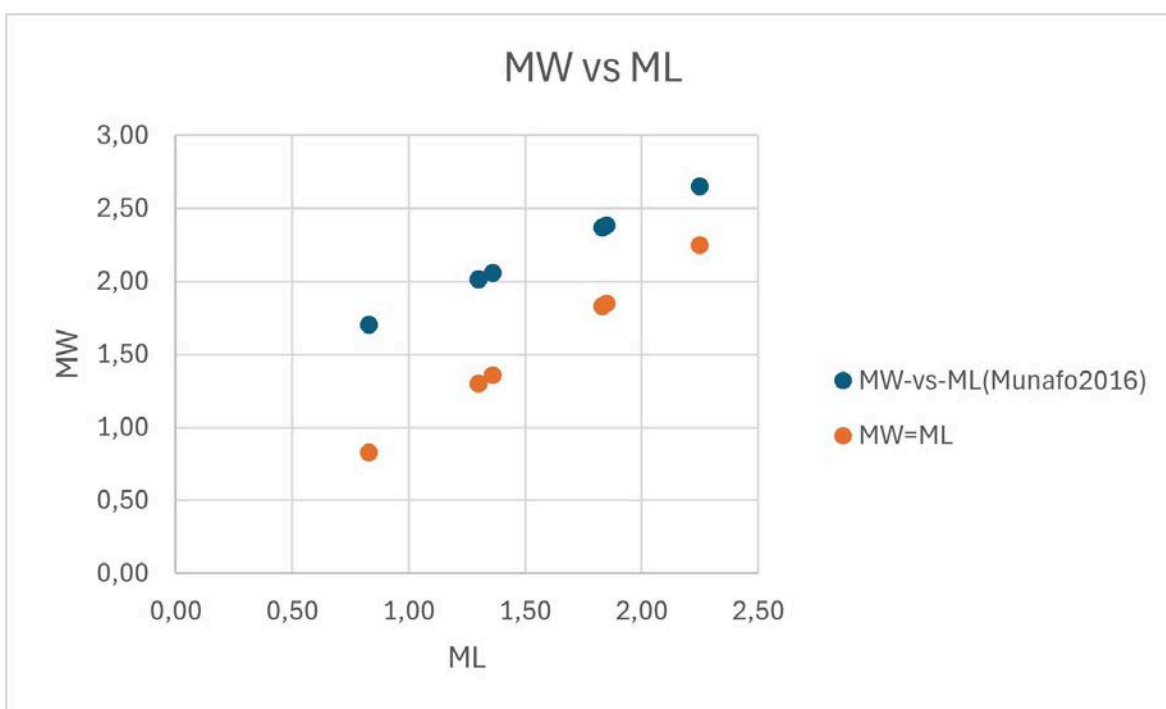
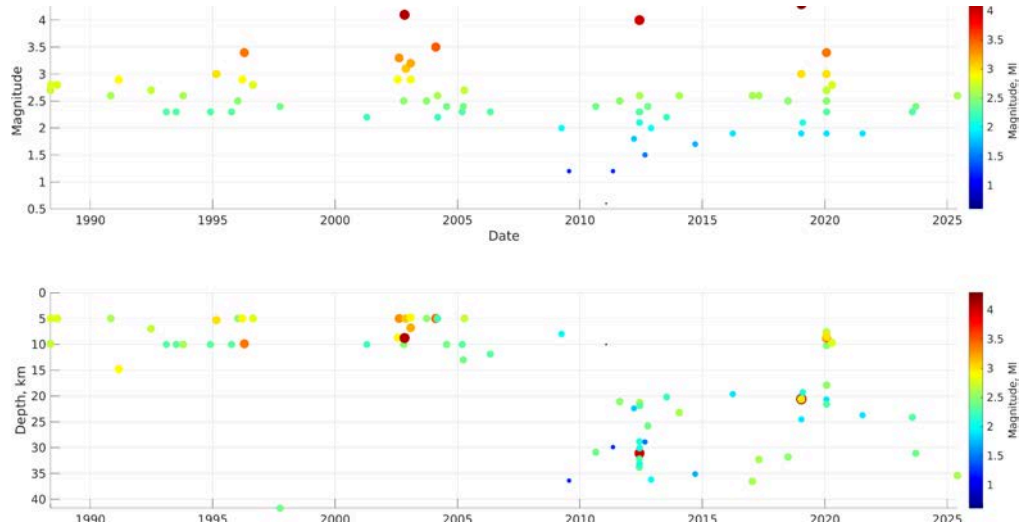


Figura 4.4. Calcolo della relazione tra la magnitudo momento (M_w) e la magnitudo locale ML per 7 eventi registrati dalla rete di monitoraggio del campo PCMW CCS tra aprile 2023 e ottobre 2025, seguendo Munafò et al. (2016).

È anche possibile fare un primo confronto qualitativo tra le stime teoriche di detezone e la completezza della sismicità locale disponibile da catalogo INGV tra il 1988 e il 2025, ottenuto utilizzando i dati della Rete Sismica Nazionale (RSN, <https://terremoti.ingv.it/>). Abbiamo

selezionato gli eventi che ricadono entro un raggio di 20 km dal centro del DI, approssimato con la posizione della stazione PCWC. Per questi eventi sismici, la Figura 4.5a mostra la serie temporale di magnitudo e profondità (nei pannelli superiore e inferiore rispettivamente), mentre la Tabella 4.5-A (in Appendice) contiene la lista degli eventi selezionati. A partire dell'anno 2009, probabilmente a seguito dell'installazione di nuove stazioni nell'area, le magnitudo minime diminuiscono, indicando un miglioramento della sensibilità della rete. Allo stesso tempo, le profondità ipocentrali si estendono su un intervallo più ampio, non rimanendo più raggruppate all'intorno delle profondità di prova (5 e 10 km) utilizzate nelle procedure di localizzazione. La Figura 4.5b mostra il grafico frequenza-magnitudo della sismicità, da cui si possono ricavare le stime preliminari di magnitudo di completezza. Utilizzando diverse metodologie, otteniamo valori $2.2 < ML < 2.3$, confrontabili con la soglia di detezione teorica per le onde P per eventi a 8 km di profondità (Figura 4.5b). Considerando solo i dati dal 2009 al 2025 le stime di completezza scendono leggermente ma i valori sono altamente incerti a causa del numero limitato di eventi. È importante sottolineare che queste valutazioni rappresentano un primo confronto approssimativo tra le stime teoriche di magnitudo minima di detezione, la completezza nella zona e le magnitudo degli eventi che si registrano man mano che prosegue il monitoraggio. Una valutazione più dettagliata e quantitativa potrà essere fatta quando si avrà a disposizione un catalogo sismico più ricco.

(a)



(b)

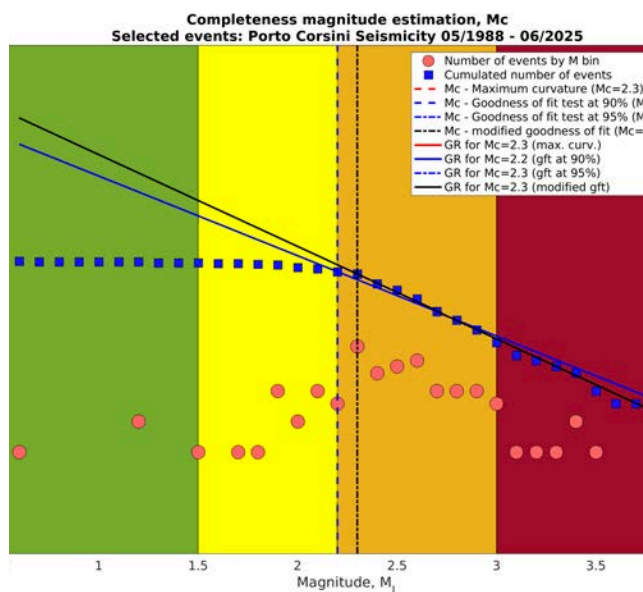


Figura 4.5: a) Sismicità registrata dalla Rete Sismica Nazionale, in un raggio di 20 km attorno al centro dei domini tra il 1988 e Ottobre 2025; b) Grafico frequenza-magnitudo e stima della magnitudo di completezza dei dati della RSN presentati nella figura a) con diverse tecniche.

DATE	ML	Mw	N° phase	RMS	LAT	LON	DEPTH
2025-08-23_14:19:38	1,30	2,02	8	0,12	44,4563	12,3745	8,00
2025-09-26_23:56:49	0,83	1,70	8	0,43	44,5450	12,2693	10,00
2023-07-28_19:58:44	1,85	2,38	11	0,43	44,5717	12,1420	6,00
2023-09-18_18:44:38	2,25	2,65	10	0,28	44,4103	12,3172	20,00
2024-03-23_00:04:14	1,36	2,06	10	0,29	44,4567	12,4335	15,00
2024-04-29_12:17:35	1,83	2,37	6	0,03	44,5743	12,2993	4,60
2024-04-29_19:58:31	1,3	2,02	8	0,31	44,5435	12,2693	3,00

Tabella 4.3. Lista degli eventi accaduti nell'area compresa in un raggio di 10 km dal centro dei Domini del campo PCMW CCS tra aprile 2023 e ottobre 2025.

4.4 Analisi della magnitudo di completezza dal catalogo sismico registrato

La stima corretta della Magnitudo di Completezza M_c ha bisogno di un catalogo sismico che abbracci un ordine temporale abbastanza lungo e che possa definirsi “stazionario ed omogeneo” rispetto alla capacità di rilevamento e per tutti gli ordini di Magnitudo.

In questo primo periodo di monitoraggio, pur cumulando gli eventi di tutto il periodo annuale di registrazioni pre-iniezione, il numero di eventi registrati dalla rete sismica del Concessionario, integrata con la RSN-INGV, risulta veramente molto basso e insufficiente ad una stima affidabile della Magnitudo di Completezza M_c in quest’area (come visto nel Paragrafo 4.3).

Pertanto, ai fini di questa valutazione e per rispondere ai richiami contenuti sia negli ILG che nel DGOM, ci riferiamo a studi di letteratura che hanno riguardato delle aree a scala più ampia e che contengono anche l’area della Concessione in oggetto.

La stima della soglia minima di detezione della RSN-INGV (Marzorati e Cattaneo, 2016) mostra nell’area della Concessione, e in generale nell’area emiliana, una soglia minima di detezione di ML pari a ~ 2 , assumendo che il segnale dell’evento sismico di un evento rilevato superi di almeno 20 volte il rumore medio delle stazioni ad un minimo di 4 stazioni della RSN. Questo valore di soglia minima di detezione, sebbene non contenga nessuna analisi di tipo statistico legata ai cataloghi sismici, è tuttavia calcolato sul segnale sismico che arriva in tempo quasi reale e quindi varia a seconda della qualità del segnale, del livello di rumore e del funzionamento delle stazioni della rete RSN.

Per quanto riguarda le valutazioni della Magnitudo di Completezza M_c , abbiamo preso a riferimento due studi che riguardano i cataloghi dell’intera RSN, comprendendo anche l’area oggetto di studio.

Il primo, di Schorlemmer et al. (2010), stima per l’area emiliana una M_c di circa 2, analizzando un catalogo compreso tra Aprile 2006 e Gennaio 2008. L’altro studio, di Figlioli et al. (2024), ottiene un valore di $M_c \sim 1.8$, analizzando il catalogo della RSN dal 2005 al 2022. Sebbene i cataloghi di partenza e i metodi di stima utilizzati siano differenti, questi restituiscono valori di M_c compresi nell’intervallo [1.8, 2.0], che non si discosta significativamente dalle soglie di detezione calcolate nei paragrafi precedenti per la valutazione della rete.

4.5 Considerazioni finali

Le principali considerazioni riguardo alle analisi dei segnali sismici sono quelle descritte nei paragrafi precedenti: i livelli di rumore di fondo delle stazioni della rete sismica del campo PCMW CCS, in particolare per quelle off-shore, risultano molto elevati. Tali aspetti incidono negativamente sulle capacità di detezione e di localizzazione della sismicità di bassa magnitudo. Parimenti, il basso rapporto segnale/rumore (SNR) alla gran parte delle stazioni della rete causa difficoltà sistematiche nel calcolo della Magnitudo locale ML_{bj} . Per la maggior

parte degli eventi accaduti durante il periodo di monitoraggio è stata calcolata la magnitudo locale ML, utilizzando solamente le stazioni più vicine all'epicentro, le uniche aventi un rapporto S/N uguale o maggiore di 2. Il numero di stazioni impiegate e la loro vicinanza all'epicentro non permettono un calcolo rigoroso della Magnitudo ed una stima realistica delle incertezze associate.

In relazione alla strumentazione utilizzata per le stazioni della rete sismica, gli ILG ai punti 5.3.b-c recitano *"Si raccomanda l'installazione di almeno un sensore a banda estesa o larga (periodo proprio $T \geq 20-40$ s, e frequenza massima di rilevazione non inferiore a 80 Hz presso una stazione interna alla rete dedicata.."* e *"...Il segnale dovrà essere acquisito in continuo, con frequenza di campionamento dei dati non inferiore a 200 Hz e a 100 Hz, rispettivamente per i sismometri e per gli accelerometri posti in superficie, e a 250 Hz per i sensori (sismometri o accelerometri) posti in pozzi profondi..."*. Dalle informazioni relative all'equipaggiamento e alle impostazioni della strumentazione, desunte dai bollettini e dalle comunicazioni intercorse con il Concessionario, tutte le stazioni sono equipaggiate con sensori a corto periodo e non vi è la presenza di nessun sensore a larga banda o a banda estesa. I sensori in pozzo risultano essere campionati entrambi a 200 Hz invece che a 250 Hz, come invece previsto dagli ILG. Tuttavia, dati gli elevati livelli di rumore naturale e antropico che caratterizzano l'area, il maggiore campionamento del segnale registrato non comporterebbe sostanziali miglioramenti nella determinazione delle ampiezze a periodi più corti. Per quanto riguarda i sensori con banda estesa, sempre considerando i livelli di rumore mostrati, il loro utilizzo sarebbe comunque limitatissimo per tutte le stazioni off-shore, mentre potrebbe essere di qualche limitata utilità per le stazioni a terra (ANGE, PCTE e SPIO, Figura 4.2.2-A).

5 Valutazione rete GNSS

Come già richiamato nei precedenti paragrafi, le indicazioni degli ILG per la rete geodetica sono calibrate soprattutto per attività minerarie a terra. Pertanto, la rispondenza ai requisiti esposti negli ILG sono tenuti in considerazione ai fini di una valutazione circa l'applicabilità dei medesimi a contesti *offshore*, evidenziandone al tempo stesso le possibili limitazioni.

Al cap. 6.2, gli ILG indicano le caratteristiche tecniche del monitoraggio delle deformazioni del suolo, raccomandando che questo riguardi *“la porzione superficiale dei domini di rilevazione (interno ed esteso)”* e che rispetti certe caratteristiche sia per le misure GPS che InSAR. Se da un lato per il secondo tipo di misure non è necessaria un'infrastruttura fissa per ottenere le osservazioni necessarie per eseguire il monitoraggio richiesto, per quanto attiene invece le misure GPS è raccomandata la presenza di *“una rete GPS in continuo, preesistente o di nuova realizzazione”*, composta *“di stazioni permanenti di precisione (di tipo geodetico), distribuite opportunamente in funzione dell'estensione e delle caratteristiche dell'area da monitorare ed installate con una adeguata monumentazione adatta a scopi geofisici (ad esempio UNAVCO). In particolare, si richiede che le stazioni abbiano interdistanze inferiori a 10-15 km e che una di esse sia co-locata con la stazione a banda larga della rete di monitoraggio sismico”*.

Pertanto in questo capitolo le analisi eseguite sono focalizzate sulla valutazione della rete GNSS analizzando nello specifico i seguenti aspetti:

1. tipologia della strumentazione utilizzata, che secondo gli ILG deve essere composta da *“stazioni permanenti di precisione (di tipo geodetico)”*, e modalità di monumentazione, illustrate nel Capitolo 5.1;
2. copertura areale della rete di monitoraggio, in termini di interdistanze tra stazioni e capacità di detezione dei segnali, riportate nel Capitolo 5.2;
3. adeguata qualità di registrazione del segnale da parte delle stazioni GNSS attraverso le analisi mostrate nel Capitolo 5.3.

5.1 Descrizione rete GNSS

In Tabella 5.1 è riportato l'elenco delle stazioni che compongono la rete di monitoraggio geodetico installate dal concessionario con le corrispondenti caratteristiche tecniche, che è composta da 14 stazioni GNSS permanenti poste all'interno dei domini di monitoraggio. Tutte le stazioni sono equipaggiate con strumentazione *“di precisione (di tipo geodetico)”* conforme agli scopi illustrati secondo gli ILG, mentre nessuna stazione GNSS risulta co-locata con una stazione sismica a banda larga, dal momento che la rete sismica ne è priva (v. Capitolo 4).

La rete di monitoraggio si trova prevalentemente *off-shore* (a mare), con 9 stazioni installate su piattaforma e 5 installate a terra (*on-shore*). La geometria della rete ha seguito le indicazioni fornite nella prescrizione n.7 dal Comitato ETS e riportate nel Decreto Ministeriale di

autorizzazione², che suggerisce di installare il maggior numero possibile di nuove stazioni, oltre a quelle già esistenti di lunga data. Prima dell'inizio delle attività di iniezione sono state quindi installate due nuove stazioni a mare (AGOC e PCWT) e due a terra (CABO e DICS).

Nome sito	Long (°E)	Lat. (°N)	Quota (m)	Posizione	Data Installazione	Antenna	Ricevitore
AGOB	12.47200	44.55410	50	Off-shore	11/10/2003	ASH701945B_M	ASHTECH UZ-12
					20/11/2021	LEIAR20	LEICA GR30
AGOC	12.49450	44.54697	73	Off-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
ANGA	12.34400	44.39100	38	Off-shore	02/12/1998	ASH700936D_M	ASHTECH Z-XII3
					19/06/2002		ASHTech UZ-12
					19/10/2021	LEIAR20	LEICA GR30
ANTA	12.45400	44.38970	38	Off-shore	08/07/2005	ASH701945E_M	ASHTech UZ-12
					11/01/2023	LEIAR20	LEICA GR30
ARMI	12.45300	44.48000	38	Off-shore	04/12/2008	ASH701945E_M	ASHTech UZ-12
					07/12/2021	LEIAR20	LEICA GR30
CABO	12.26420	44.55570	45	On-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
DICS	12.26963	44.47955	44	On-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
FIUN	12.31600	44.39730	44	On-shore	11/03/2002	ASH701945E_M	ASHTech UZ-12
					10/09/2021	LEIAR20	LEICA GR30
GARB	12.53200	44.48670	66	Off-shore	10/10/2003	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					07/03/2024	LEIAR20	STONEX SC2200
GARC	12.51500	44.53140	72	Off-shore	09/10/2003	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					21/03/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
PCTA	12.26700	44.49480	45	On-shore	12/04/2002	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					15/07/2021	LEIAR20	LEICA GR30
PCWC	12.37300	44.50920	72	Off-shore	10/04/2003	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					12/05/2015		LEICA GR10
PCWT	12.35947	44.51227	73	Off-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
SMAR	12.24700	44.59440	44	On-shore	12/07/2002	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					14/07/2021	LEIAR20	LEICA GR30

Tabella 5.1: Elenco delle stazioni GNSS installate per il campo PCMW CCS con coordinate, data di installazione e strumentazione in uso.

² Decreto Ministeriale 26 gennaio 2023 della Direzione Generale Infrastrutture e Sicurezza del Ministero dell'ambiente e della Sicurezza Energetica, pubblicato sul BUIG - Bollettino ufficiale degli idrocarburi e delle georisorse - Anno LXVII, n. 1 -31 gennaio 2023 Appendice all'Al.1, par. 9.2 della prescrizione n. 7

La monumentazione delle stazioni deve risultare solidale con il substrato roccioso affiorante in modo da poter registrare segnali dovuti a sorgenti profonde (deformazioni tettoniche, idrologiche, di giacimento, etc.). Per le stazioni installate su piattaforma questo requisito è rispettato, in quanto queste sono tutte ancorate al fondale marino, mentre per le stazioni a terra non si hanno informazioni specifiche al riguardo.

5.2 Analisi delle interdistanze

La SPM ha verificato la condizione posta dagli ILG per la distribuzione dei siti, ossia che siano distanti tra di loro entro i 10-15 km, considerando anche la necessità di integrare le reti di monitoraggio tenendo conto del "principio di valorizzazione dell'esistente" (come più volte indicato negli ILG). A questo proposito sono state considerate tutte le stazioni disponibili nell'area di monitoraggio, che in questo caso riguarda solo una stazione pubblica a nord delle stazioni del Concessionario, come mostrato in Figura 5.1.

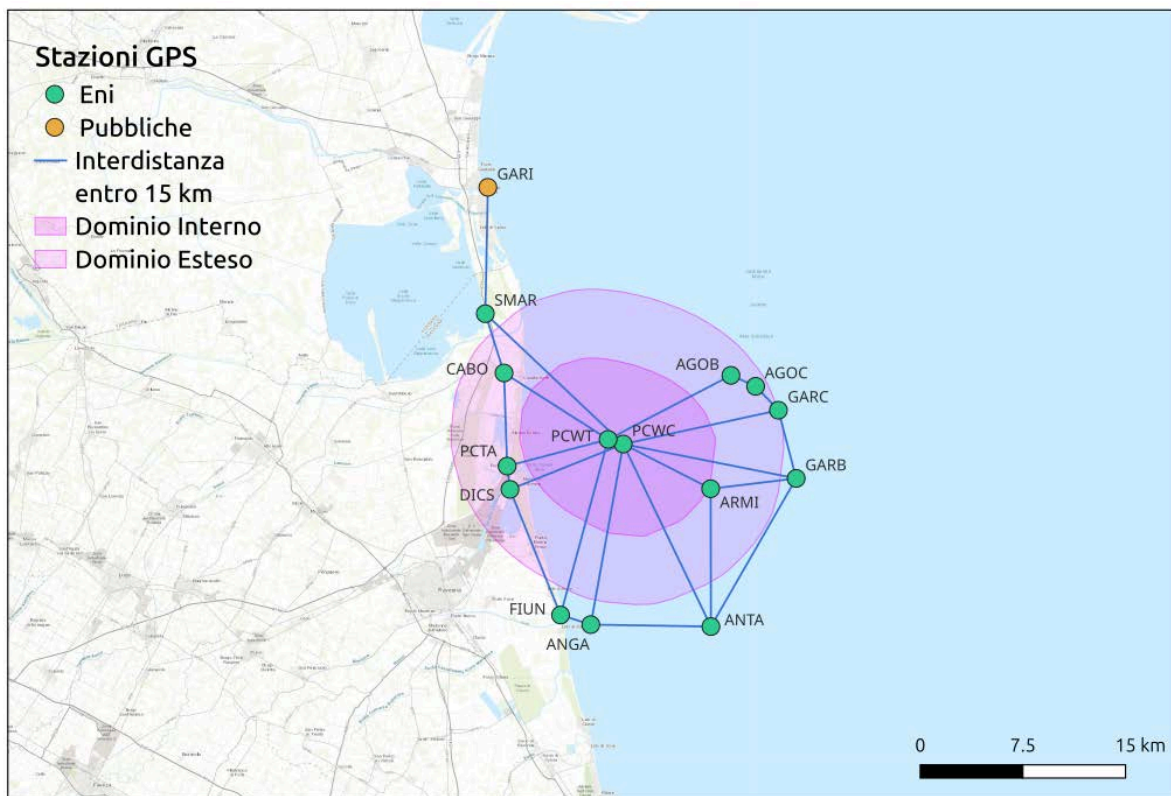


Figura 5.1: Interdistanze tra le stazioni GNSS entro i 15 km appartenenti sia al concessionario (verdi) sia a reti pubbliche attive (gialle) disponibili nell'area di monitoraggio del campo PCMW CCS.

La distribuzione delle interdistanze entro i 15 km (secondo i criteri minimi forniti dagli ILG), riportata in Figura 5.1, mostra una buona copertura di tutti i domini di monitoraggio, lasciando leggermente scoperta solo la porzione a Nord. Da questa analisi si può osservare come l'area di monitoraggio sia adeguatamente coperta grazie alla sola presenza delle stazioni del Concessionario.

Per valutare se la rete allo stato attuale possa fornire una copertura adeguata o meno al monitoraggio delle deformazioni e per fornire una caratterizzazione spaziale delle lunghezze d'onda caratteristiche identificabili dalla rete, è stata applicata un'analisi con wavelet sferiche (Tape et al., 2009) che fornisce una stima della capacità di identificazione spaziale dei segnali da parte della distribuzione delle stazioni, come mostrato in Figura 5.2, in termini di grado q . Il valore della scala q indica l'ordine di wavelet sferica riproducibile da parte della rete di stazioni, e maggiore è l'ordine, minore sarà la scala spaziale del segnale che può essere identificato in termini di semi-lunghezza d'onda del segnale, secondo la Tabella 5.2 (estratta da Tape et al., 2009). Dalla Figura 5.2 si può osservare che la rete GNSS sarebbe potenzialmente in grado di identificare segnali di deformazione con lunghezze d'onda dell'ordine di circa 10 km (Tabella 5.2, grado q 11) in corrispondenza di tutto il dominio di monitoraggio. Questo valore potrebbe essere compatibile con le lunghezze d'onda corrispondenti alle deformazioni attese per effetto dell'attività di iniezione nel giacimento, suggerendo quindi che la geometria della rete sia potenzialmente capace di registrare eventuali segnali di deformazione.

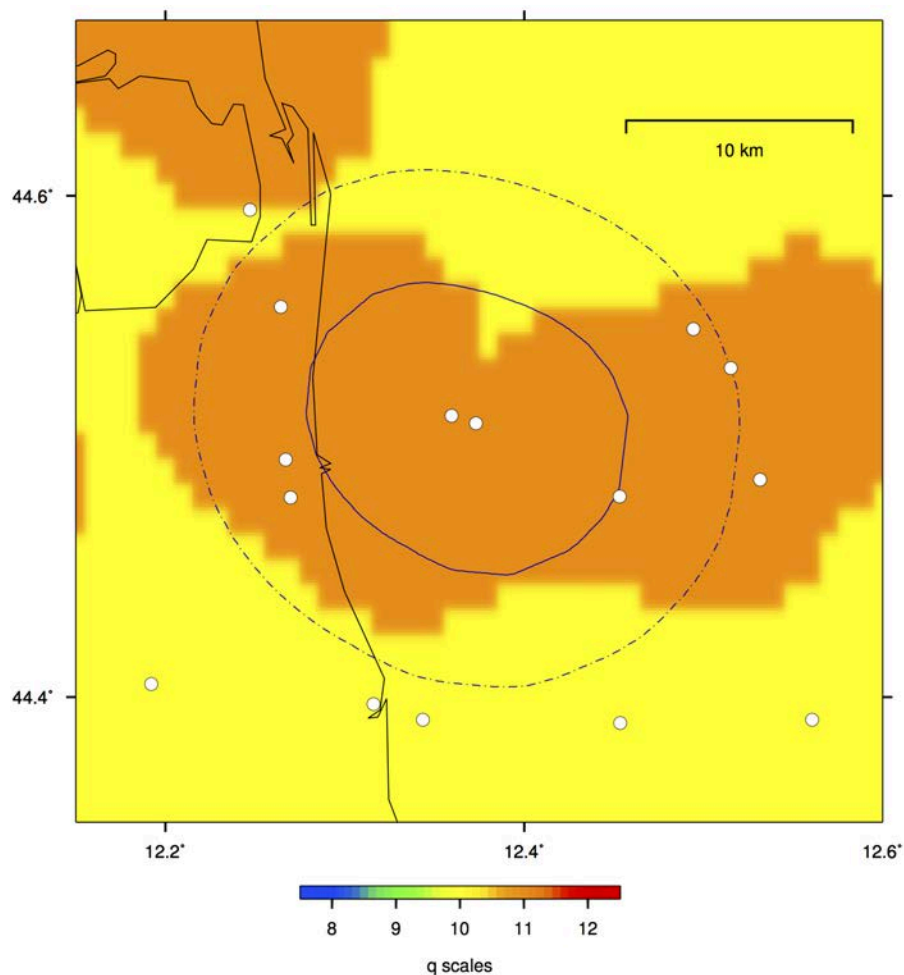


Figura 5.2: Risoluzione spaziale in termini di valore massimo della scala q di wavelet sferiche riproducibile con la distribuzione spaziale di tutte le stazioni GNSS disponibili per il campo PCMW CCS, corrispondente alla scala spaziale riportata in Tabella 5.2.

q	Semi-lunghezza (km)
7	87.2
8	43.6
9	21.8
10	11.4
11	5.8
12	2.9

Tabella 5.2: Scala spaziale delle wavelet sferiche che indicano la semi-lunghezza d'onda del segnale di deformazione riprodotto.

5.3 Analisi di qualità dei dati GPS

Per ottenere misure di precisione per scopi geofisici, le stazioni GNSS dovrebbero acquisire i dati per il maggior tempo possibile e le antenne delle stazioni devono essere installate al di sopra di eventuali ostacoli locali che potrebbero bloccare o degradare i segnali satellitari in arrivo, come rocce o fogliame. Nel caso di presenza nelle vicinanze della stazione di superfici riflettenti, l'antenna dovrebbe essere posizionata al di sopra di queste per ridurre il *multipath* (segnale satellitare riflesso indesiderato che riduce la precisione del GPS).

Per valutare la qualità delle acquisizioni geodetiche giornaliere (file RINEX) delle stazioni GNSS di ENI, è stato utilizzato il software TEQC (<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>), ampiamente utilizzato per il trattamento standard di osservazioni GNSS durante la fase di pre-processamento e sono state eseguite le seguenti analisi:

1. percentuale dei RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione per ogni stazione del campo PCMW CCS (Figura 5.3) e il loro valore medio su tutto l'intervallo di acquisizione fino al 31/10/2025 (Tabella 5.3);
2. valori medi giornalieri di *multipath* (ossia l'interferenza tra segnali satellitari diretti e riflessi) registrato per ciascuna portante del segnale satellitare GPS (L1 e L2), in termini di MP1 e MP2, in termini di scarto quadratico medio (RMS). In Tabella 5.3 sono riportati i valori medi per ciascuna stazione per tutto il periodo di acquisizione;
3. percentuale di osservazioni satellitari presenti nei RINEX rispetto alle osservazioni attese nello stesso intervallo di tempo giornaliero durante il quale la stazione è stata funzionante, i cui valori medi per tutto il periodo di acquisizione sono riportati in Tabella 5.3.

L'esito dell'analisi del punto 1, mostrato in Figura 5.3, evidenzia come molte delle stazioni GNSS abbiano un periodo di registrazione molto lungo (> 20 anni) con in generale una buona

continuità di acquisizione del dato. In particolare nell'ultimo periodo che riguarda l'attività di iniezione tutte le stazioni hanno avuto un funzionamento costante.

Per quanto concerne invece le analisi del punto 2, ricordiamo che per stazioni di buona qualità le stime di MP1 e MP2 non dovrebbero superare rispettivamente i valori di 0.4 m e 0.6 m. Dai valori riportati in Tabella 5.3, si osserva come per tutte le stazioni della rete i valori medi di MP1 e MP2 rispettino questa caratteristica. Questi valori di disturbo devono essere valutati anche nel tempo per verificare che non sussistano situazioni di peggioramento di acquisizione del dato. A titolo esemplificativo viene mostrato in Figura 5.4 per la stazione PCWC l'andamento nel tempo dei valori di MP1 e MP2, che sono sempre minori dei limiti sopra indicati senza indicare variazioni peggiorative nel tempo (il salto che si osserva in figura è dovuto al cambio strumentale riportato in Tabella 5.1). La stessa analisi per tutte le altre stazioni della rete è mostrata in Appendice B e si può notare che tutte le stazioni mostrano andamenti costanti nei valori di MP1 e MP2.

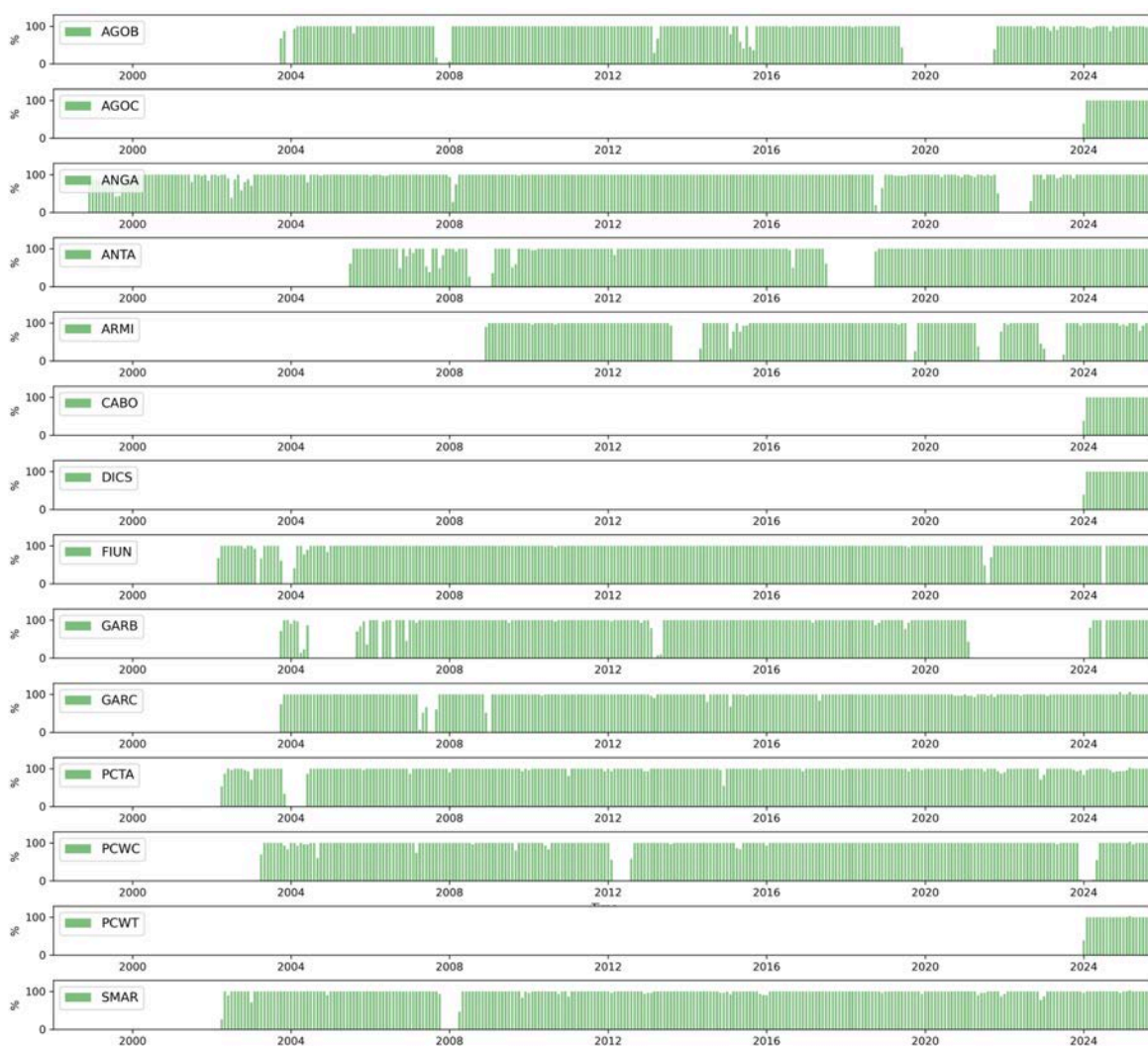


Figura 5.3: Percentuale di RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione fino al 31/10/2025 per ogni stazione della rete di Porto Corsini.

Nome sito	Intervallo temporale, IT (anni)	% totale di RINEX giornalieri su tutto IT	Valore medio di MP1 (metri)	Valore medio di MP2 (metri)	% media giornaliera di osservazioni satellitari
AGOB	22.1	85	0.19	0.21	98.6
AGOC	1.8	100	0.18	0.22	99.8
ANGA	26.9	94	0.19	0.20	84.1
ANTA	20.3	89.2	0.09	0.10	99.4
ARMI	16.9	86.6	0.16	0.18	98.7
CABO	1.8	100	0.30	0.26	98.8
DICS	1.8	100	0.28	0.22	95.9
FIUN	23.6	96.9	0.18	0.20	99.2
GARB	22.1	76.8	0.27	0.27	98.7
GARC	22.1	97.08	0.12	0.12	99.0
PCTA	23.6	99	0.20	0.23	97.0
PCWC	22.6	97.19	0.25	0.24	96.5
PCWT	1.8	100	0.20	0.20	99.6
SMAR	23.6	99.86	0.25	0.26	89.8

Tabella 5.3: Tabella riassuntiva dei parametri di qualità per le acquisizioni disponibili delle stazioni ENI analizzate

Infine le possibili difficoltà di funzionamento ed acquisizione possono essere verificate anche con l'analisi del punto 3, ossia dall'analisi delle percentuali di acquisizioni satellitari eseguite rispetto a quelle attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo. Una buona stazione ha valori al di sopra del 90%, indicando che la strumentazione ha una buona visibilità per acquisire tutti i possibili segnali satellitari. Valori temporaneamente più bassi possono indicare la presenza di oggetti mobili che ostruiscono la visibilità della stazione. Dalla Tabella 5.3 si può notare come tutte le stazioni della rete abbiano in media un'elevata percentuale di acquisizione del dato. A livello esemplificativo la Figura 5.4 mostra anche l'andamento nel tempo della percentuale di acquisizione per la stazione PCWC, mentre in Appendice B sono riportati gli andamenti per tutte le altre stazioni della rete. Le analisi eseguite indicano pertanto che la rete di monitoraggio geodetico del concessionario è caratterizzata da stazioni GNSS posizionate in modo ottimale ai fini dell'acquisizione e con un'elevata qualità di acquisizione dei dati.

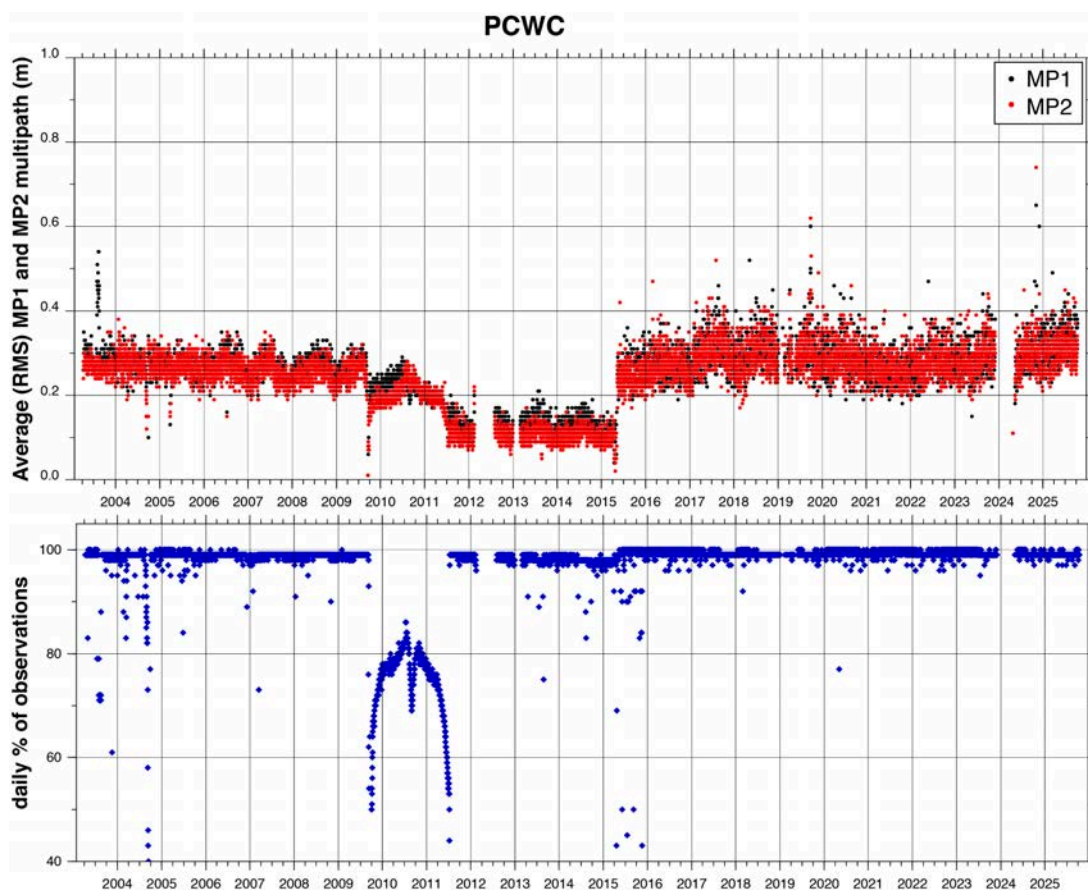


Figura 5.4: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione PCWC in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

5.4 Considerazioni finali

Dalle analisi eseguite in questo capitolo si possono trarre le seguenti considerazioni:

- la geometria della rete di monitoraggio risponde ai requisiti richiesti dagli ILG in termini di copertura areale dei domini, rispettando le indicazioni fornite nella prescrizione n.7 dal Comitato ETS, che suggeriva di installare il maggior numero possibile di nuove stazioni, oltre a quelle già esistenti di lunga data, e posizionando le stazioni in modo ottimale ai fini del monitoraggio;
- la strumentazione utilizzata è adatta a scopi geofisici e l'acquisizione dei dati è di alta qualità con una buona continuità del dato;
- la maggior parte delle stazioni risulta ancorata al substrato del terreno essendo installate su piattaforma mentre per le stazioni a terra mancano le specifiche tecniche per verificarne l'ancoraggio in profondità;
- l'unico requisito mancante riguarda l'assenza di una stazione GNSS co-locata con una stazione sismica a banda larga.

6 Monitoraggio sismico e analisi dati

In questo capitolo viene descritta l'analisi della sismicità eseguita dalla SPM, con riferimento ai domini DI e DE del programma CCS Ravenna fase 1 nel campo di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW CCS) e nelle immediate vicinanze, sia nel periodo precedente alle attività industriali (come indicato dalla Prescrizione n°6 impartita dal Comitato ETS “..Dovrà inoltre essere realizzato un monitoraggio preventivo all’inizio delle attività, per valutare le condizioni non perturbate (prescrizione ante operam)”) che in quello successivo.

6.1 Disponibilità dei dati

La Figura 6.1 mostra la disponibilità dei segnali, a ciascuna stazione, per tutto per il periodo di analisi. A parte brevi interruzioni di durata al massimo giornaliera che hanno interessato quasi tutte le stazioni della rete in periodi diversi, l'unica interruzione significativa è quella della stazione PCWC, che va dal dicembre 2023 al marzo 2024. A questo si aggiunge un piccolo gap simultaneo a tutte le stazioni, probabilmente dovuto a problemi di aggiornamento del server di acquisizione, occorso nel Gennaio 2025.

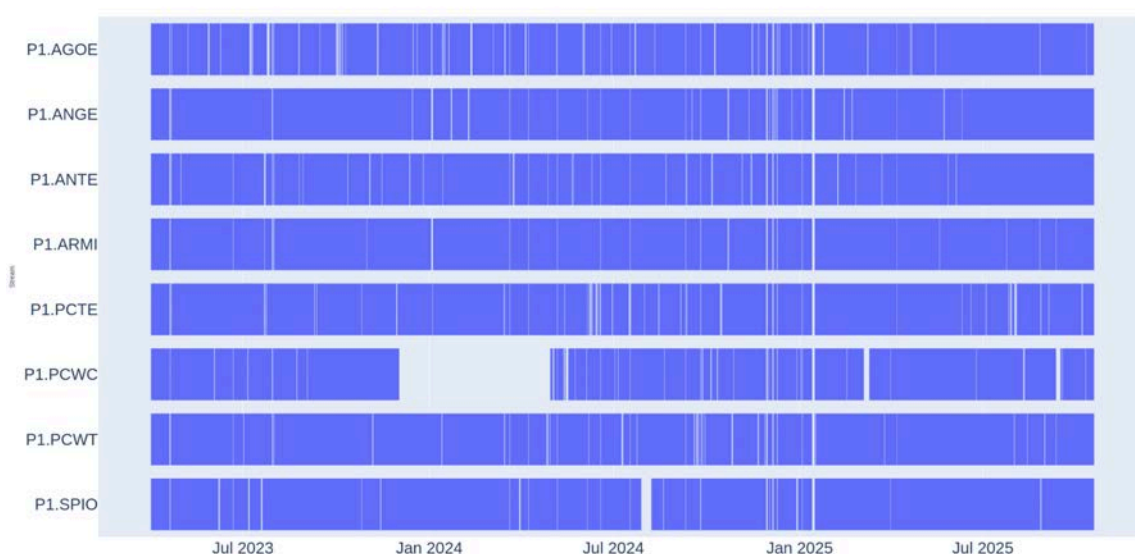


Figura 6.1 Schema della disponibilità dei dati della rete del Concessionario dal 1 Aprile 2023 al 18 Ottobre 2025.

	AGOE	ANGE	ANTE	ARMI	PCTE	PCWC	PCWT	SPIO
2023 (aprile- dicembre)	74.5%	75%	74.8%	75%	75%	67.1%	75%	74.4%
2023 (agosto- dicembre)	99.3%	99.9%	99.4%	99.6%	99.5%	80.4%	99.5%	99.3%
2024	98.6%	98.6%	99%	99.1%	98.4%	65.9%	99%	96.2%
2025	97.5%	97.6%	97.9%	98%	97.6%	93.3%	98.1%	98%

Tabella 6.1: Percentuali della disponibilità del dato per ogni stazione calcolate su base annuale per tutto il periodo 2023-2025.

6.2 Modello di velocità

Per la localizzazione della sismicità abbiamo scelto uno dei 2 modelli 1-D utilizzati dal Concessionario, in particolare quello denominato "Modello Costiero" per tutte le stazioni utilizzate durante il monitoraggio. Riteniamo infatti che tale modello rappresenti in maniera realistica le velocità sismiche, e relativa sequenza stratigrafica, caratteristiche dell'area oggetto del monitoraggio (Tabella 6.2).

Depth	Vp (km/s)	Vp/Vs
0	1,8	4,50
0,5	2,1	2,63
1,0	2,4	2,40
1,5	2,6	2,17
2,00	2,8	2,00
2,50	3,2	1,88
3,50	3,5	1,84
5,00	4,2	1,83
6,00	5,0	1,82
11,00	6,2	1,81
35,00	8,1	1,80

Tabella 6.2 Modello di velocità 1-D utilizzato per la localizzazione degli eventi sismici.

6.3 Monitoraggio della sismicità

Per le procedure di analisi il CMS utilizza il software SeisComP (<https://www.seiscomp.de/>) che permette un'analisi automatica del segnale sismico sia in tempo reale che differito. SeisComP è stato sviluppato appositamente per un uso in sala di monitoraggio. I segnali continui sono soggetti ad una prima procedura di discriminazione di eventi sismici, che sono successivamente localizzati automaticamente. Questo insieme di localizzazioni automatiche è poi revisionato manualmente su base giornaliera da un analista sismologo, per la creazione del catalogo definitivo. Per la localizzazione dei terremoti in questa zona abbiamo scelto il codice Hypo71 (Lee e Lahr, 1975), associato al modello di velocità sismica descritto nella sezione precedente, come anche indicato nel DGOM.

Per il calcolo della magnitudo locale consideriamo la relazione di Bakun e Joyner (1984), in questo Report contrassegnata con la notazione MLbj:

$$MLbj = \log A + \log(R/100) + 0.00301 (R-100) + 3.0$$

dove: A = massima semi-ampiezza (in mm) della traccia sismometrica di spostamento misurata sulle componenti orizzontali, dopo simulazione di un sismografo Wood-Anderson sintetico; R = distanza ipocentrale in km.

Si ricorda che i segnali registrati alle stazioni della rete P1 vengono elaborati in modo automatico e in tempo reale insieme a quelli acquisiti da una selezione di stazioni della rete IV, come riportato nella descrizione della rete sismica integrata (Tabella. 4.1., Tabella 4.2 e Figura 4.1).

6.4 Analisi della sismicità localizzata dalla SPM nei domini di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS durante il periodo precedente l'inizio delle attività di iniezione di CO₂: 1 Aprile 2023- 04 Agosto 2024.

In questo paragrafo descriviamo l'attività sismica nei domini interno (DI) ed esteso (DE) e nelle immediate vicinanze del programma sperimentale di stoccaggio geologico di CO₂ "CCS Ravenna fase 1". Sebbene gli ILG stabiliscano come l'analisi dei dati pregressi debba partire almeno un anno prima dell'inizio delle attività di iniezione, il funzionamento della rete sismica del Concessionario anche in periodi precedenti ci ha permesso di considerare il 1 Aprile 2023 come data di inizio delle analisi dei dati, estendendo così di qualche mese - rispetto al periodo annuale indicato dagli ILG - la determinazione del cd "bianco imperturbato".

Nel periodo 1 Aprile 2023 - 4 Agosto 2024 sono stati localizzati 10 eventi sismici (Figura 6.2), come elencati nella Tabella 6.3. In particolare, i 4 eventi occorsi in data 2023-05-21, 2023-07-28, 2023-09-18 e 2023-12-25_12:03:12 hanno posizione epicentrale esterna ai domini, non richiedendo pertanto l'ulteriore esame della profondità. L'evento occorso in data

2024-03-23, pur situandosi planimetricamente nel DE, ha una profondità di 15 Km e pertanto ricade fuori dai domini. I rimanenti 5 eventi (2023-08-03, 2023-12-25_05:27:41, 2023-12-28 ed entrambi gli eventi del 2024-04-29) ricadono nel DE.

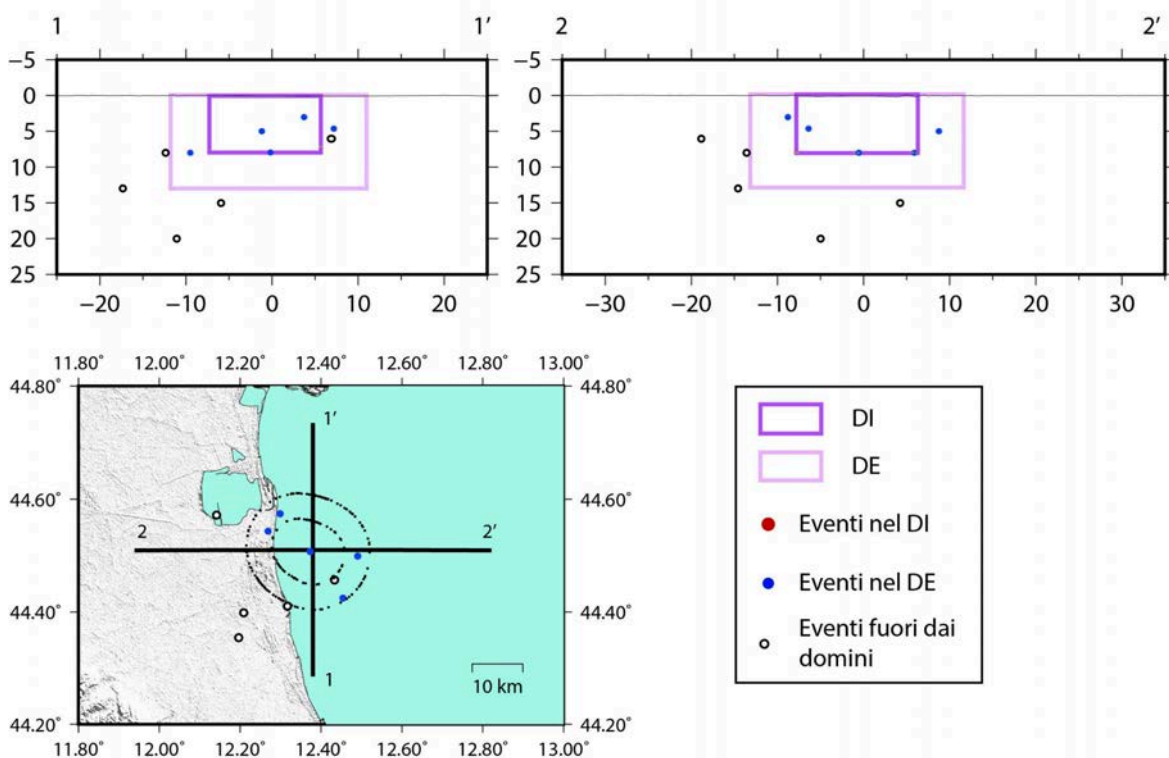
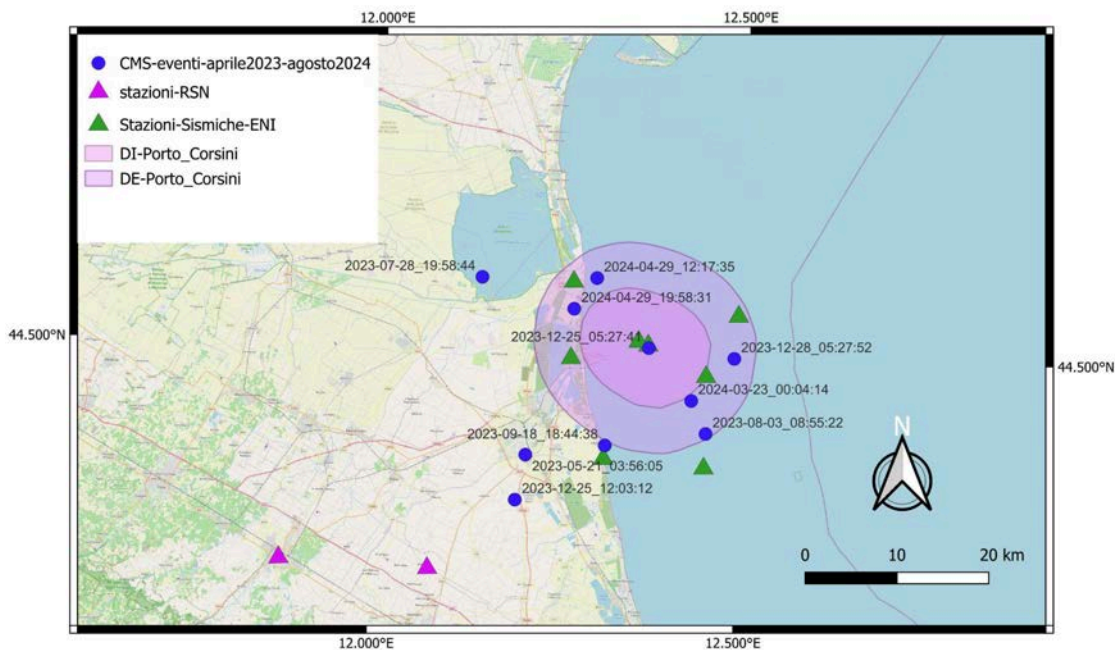


Figura 6.2 In alto: Mappa epicentrale degli eventi sismici avvenuti nel periodo precedente l'inizio delle operazioni di iniezione (1 Aprile 2023 -4 Agosto 2024)In basso: Sezioni verticali della stessa sismicità e posizione degli eventi rispetto ai domini.

DATE	Type	M	M-type	N°Phase	RMS	LAT	LON	DEPTH	Domini
2023-05-21_03:56:05	earthquake	1,39	MLbj	13	0,61	44,3987	12,2090	8,00	Esterno ai domini
2023-07-28_19:58:44	earthquake	1,85	ML	11	0,43	44,5717	12,1420	6,00	Esterno ai domini
2023-08-03_08:55:22	earthquake	1,81	ML	5	0,52	44,4247	12,4545	8,00	DE
2023-09-18_18:44:38	earthquake	2,25	ML	10	0,28	44,4103	12,3172	20,00	Esterno ai domini
2023-12-25_05:27:41	earthquake	0,75	ML	4	1,29	44,5073	12,3732	8,00	DE
2023-12-25_12:03:12	earthquake	1,19	ML	13	0,87	44,3542	12,1968	13,00	Esterno ai domini
2023-12-28_05:27:52	earthquake	1,36	ML	9	0,40	44,4993	12,4907	5,00	DE
2024-03-23_00:04:14	earthquake	1,36	ML	10	0,29	44,4567	12,4335	15,00	Esterno ai domini
2024-04-29_12:17:35	earthquake	1,83	ML	6	0,03	44,5743	12,2993	4,60	DE
2024-04-29_19:58:31	earthquake	1,30	ML	8	0,31	44,5435	12,2693	3,00	DE

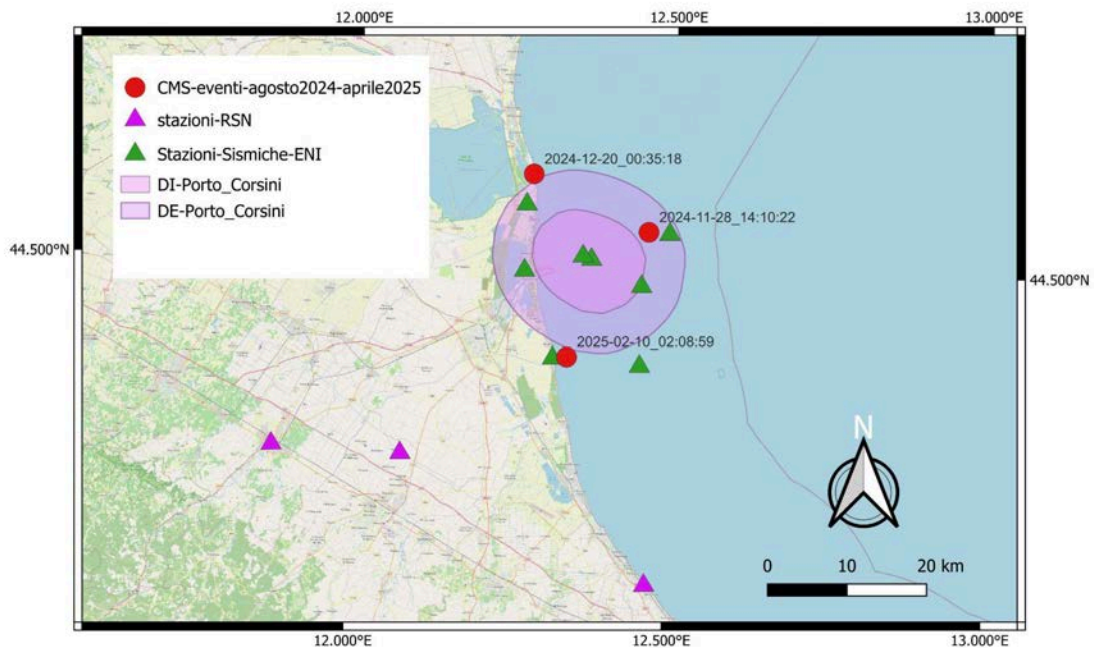
Tabella 6.3 Eventi sismici avvenuti nel periodo precedente all'inizio delle operazioni di iniezione (1 Aprile 2023 -4 Agosto 2024)

6.5 Analisi della sismicità localizzata dalla SPM nei domini di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS durante il periodo di iniezione compreso fra il 5 Agosto 2024 ed il 17 Aprile 2025.

In questo periodo abbiamo registrato 2 eventi sismici ed un'esplosione controllata a mare di un ordigno risalente al secondo conflitto mondiale (Figura 6.3 e Tabella 6.4)

La localizzazione del punto di esplosione è consistente con i valori forniti dalla Capitaneria di Porto di competenza; la magnitudo equivalente è di 2.02, confrontabile con quanto ottenuto dal Concessionario e riportato nel catalogo della RSN.

Gli eventi 2024-12-20 e 2025-02-10 ricadono al di fuori dei domini; Il secondo evento mostra un valore ML_{jb} più alto rispetto a quello ottenuto del Concessionario (ML_{jb} 1.44 vs 1.0), con una profondità minore di qualche chilometro (21 km vs 28.8 km).



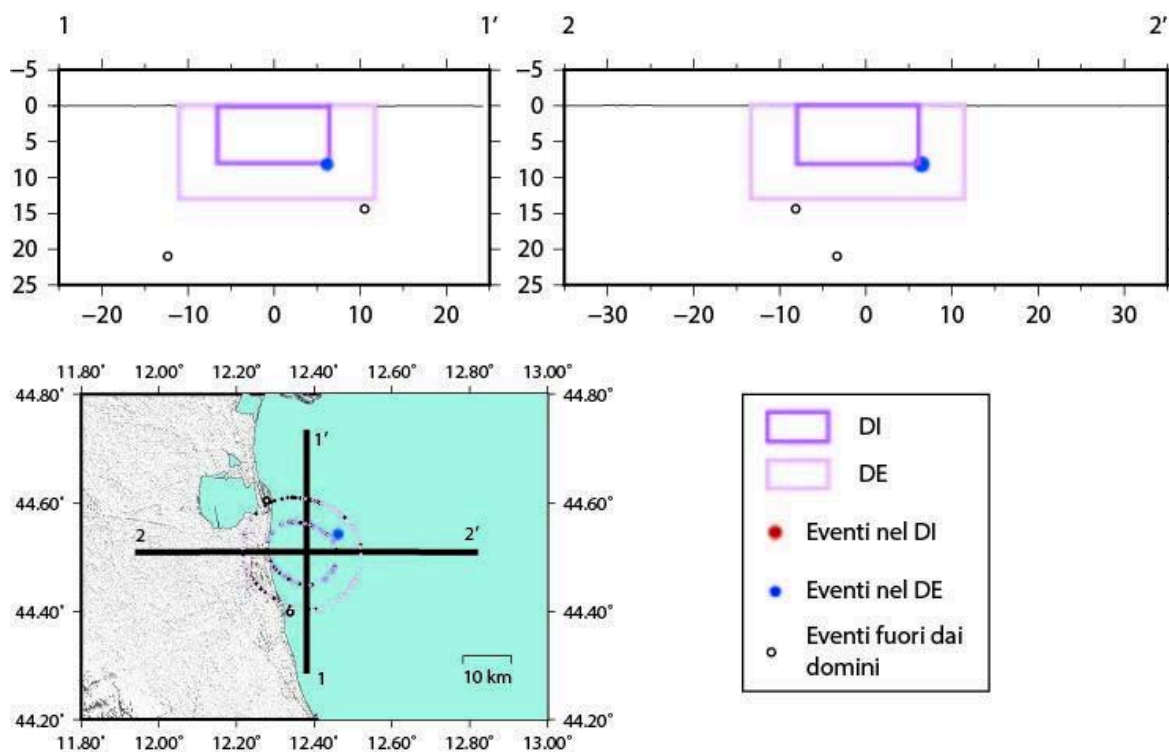


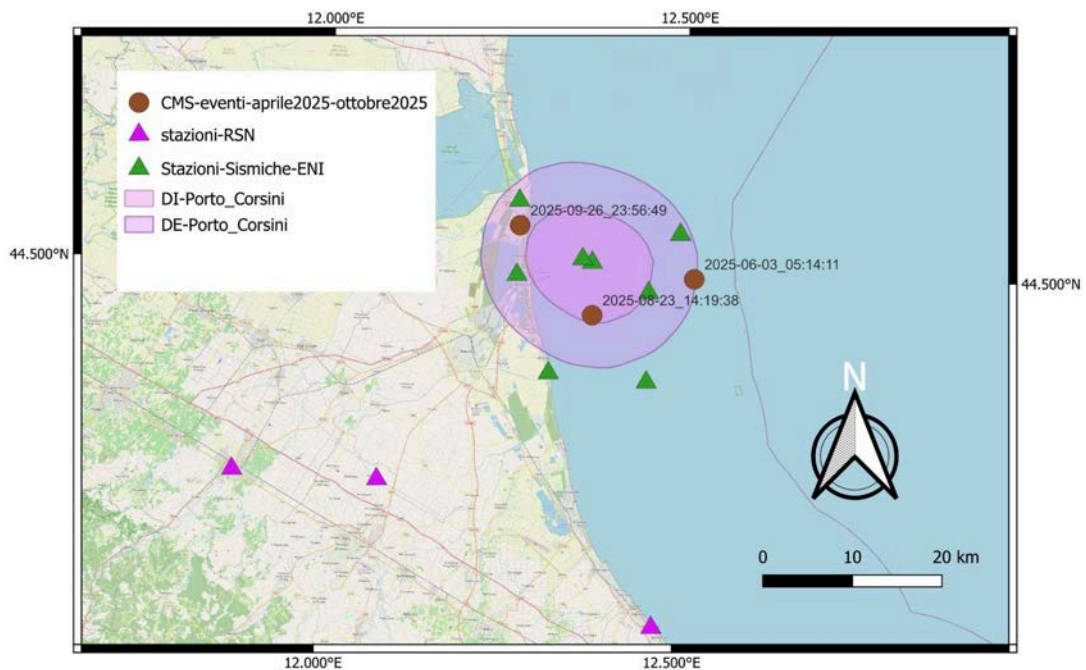
Figura 6.3 In alto: Mappa degli eventi sismici avvenuti nel periodo successivo all'inizio delle operazioni di iniezione e precedente all'inizio del monitoraggio (04 Agosto 2024 -18 Aprile 2025).In basso: Sezioni verticali della stessa sismicità e posizione degli eventi rispetto ai domini.

DATE	Type	M	M-type	N°Phase	RMS	LAT	LON	DEPTH	DOMINI
2024-11-28_14:10:22	controlled explosion	2,02	ML	15	1,24	44,542 5	12,4617	--	
2024-12-20_00:35:18	earthquake	2,28	MLbj	15	0,21	44,604 5	12,2772	14,40	Esterno ai domini
2025-02-10_02:08:59	earthquake	1,44	MLbj	12	0,20	44,398 7	12,3378	21,00	Esterno ai domini

Tabella 6.4. Eventi sismici avvenuti nel periodo successivo all'inizio delle operazioni di iniezione e precedente all'inizio del monitoraggio (04 Agosto 2024 -18 Aprile 2025)

6.6 Analisi della sismicità localizzata dalla SPM nei dominio di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS per il semestre di monitoraggio 18 Aprile-18 Ottobre 2025.

Durante questo periodo sono stati registrati 3 eventi in totale (in Figura 6.4 e Tabella 6.5.). L'evento del 2025-06-03 ricade fuori dai Domini, mentre gli eventi del 2025-08-23 e del 2025-09-26 ricadono nel Dominio Esteso, avendo entrambi una profondità di 10 km.. Per questi ultimi 2 eventi non è stato possibile un calcolo della magnitudo rigoroso e con una stima consistente dell' incertezza, a causa del basso rapporto segnale/rumore a quasi tutte le stazioni, come già descritto nel Paragrafo 6.4. I valori, ottenuti ad una o a due stazioni, sono probabilmente sovrastimati.



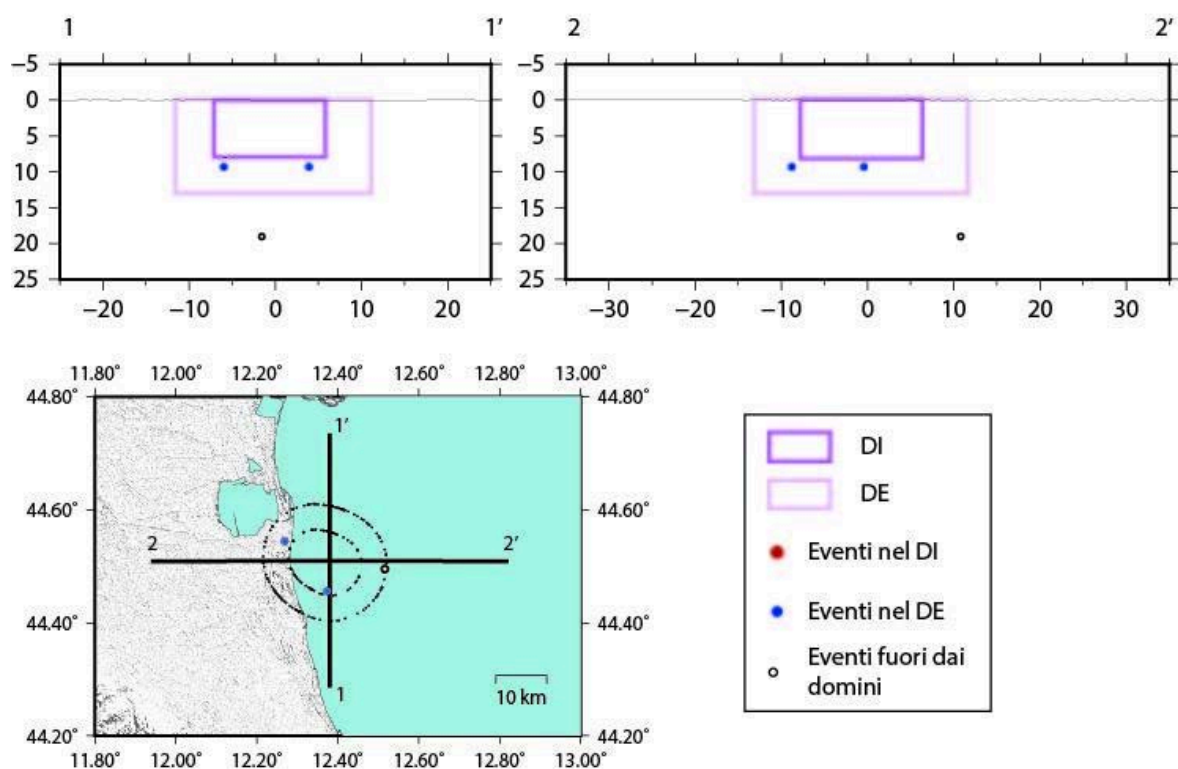


Figura 6.4 In alto: Mappa degli eventi sismici avvenuti nel semestre di monitoraggio 18 Aprile-18 Ottobre 2025. In basso: Sezioni verticali della stessa sismicità e posizione degli eventi rispetto ai domini.

DATE	type	M	M-type	N° phase	RMS	LAT	LON	DEPTH	DOMINI
2025-06-03_05:14:11	earthquake	2,20	MLbj	16	0,31	44,4958	12,5162	19,00	Esterno ai domini
2025-08-23_14:19:38	earthquake	1,68	ML	10	0,40	44,4612	12,3605	10,00	DE
2025-09-26_23:56:49	earthquake	0,83	ML	8	0,43	44,5450	12,2693	10,00	DE

Tabella 6.5. Parametri ipocentrali degli eventi sismici localizzati nel semestre di monitoraggio 18 Aprile - 18 Ottobre 2025.

7 Misure di deformazione

In questo capitolo vengono mostrati i risultati delle elaborazioni dei dati di deformazione disponibili per l'area di monitoraggio, in termini di misure GNSS elaborati dalla SPM, di misure InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) elaborati sia dalla SPM sia dal concessionario e di livellazione fornite dal concessionario.

7.1 Elaborazione del dato GPS e serie temporali di spostamento

I dati giornalieri in formato RINEX delle stazioni GNSS disponibili per l'area di monitoraggio sono stati elaborati dal centro di analisi INGV presso la sezione di Bologna all'interno di una soluzione geodetica molto ampia a scala euro-Mediterranea, come illustrato in Serpelloni et al. (2022). La procedura di elaborazione eseguita consiste in:

1. Analisi delle osservazioni registrate (ossia le fasi della costellazione GPS a doppia frequenza dei segnali satellitari) dalle stazioni ENI più altre stazioni permanenti della rete IGS (International GNSS Service), e realizzazione di una soluzione di rete debolmente vincolata (posizioni, orbite, ecc...), utilizzando il pacchetto GAMIT del software per analisi dati GPS GAMIT/GLOBK (<http://geoweb.mit.edu/gg>, versione 10.71).
2. Combinazione delle soluzioni giornaliere ottenute per tutte le sotto-reti processate dalla SPM e allineamento delle soluzioni di posizione giornaliere al sistema di riferimento globale ITRF2020 (Altamimi et al., 2023), utilizzando il pacchetto GLOBK del software GAMIT/GLOBK.

Da quest'ultimo passaggio si ottengono per ciascuna stazione GNSS le serie temporali di spostamento (nelle tre componenti Est, Nord e verticale) realizzate nel sistema di riferimento globale. Ciascuna serie così ottenuta viene poi modellata con un modello funzionale analitico "classico" (Bevis & Brown, 2014) che considera gli spostamenti del suolo come la combinazione di: 1- un contributo lineare nel tempo (ossia la velocità di spostamento), 2- componenti stagionali annuali e semi-annuali e 3- possibili salti di posizione dovuti a cambi strumentali ed eventuali salti di natura co-sismica. L'elaborazione dei dati è stata eseguita per tutti i file RINEX disponibili a partire dalla prima data di acquisizione di ciascuna stazione (Tabella 5.1) fino alla data del 30/09/2025.

Le serie temporali riferite rispetto al sistema di riferimento globale non ci permettono però di apprezzare le deformazioni a scala locale. Per evidenziare meglio i gradienti di velocità dell'ordine del mm/anno o inferiori, che sono tipici sia della tettonica attiva presente nell'area sia delle deformazioni locali di tipo naturale o antropico, risulta necessario ruotare e riferire il campo di spostamento rispetto a un sistema di riferimento locale, ossia rispetto ad un blocco tettonico o una placca tettonica vicina assunta come rigida e fissa (plate-fixed). Nel nostro caso le serie temporali orizzontali GPS (quelle verticali rimangono riferite al sistema di riferimento globale) sono state poste rispetto alla placca Eurasia-fissa, utilizzando come polo

di rotazione quello riportato da Altamimi et al. (2023). Per fare ciò vengono rimosse dalle serie di spostamento orizzontali assolute le velocità attese dal polo di rotazione scelto, ottenendo così serie temporali di spostamento residue utili per analizzare il campo di deformazione a scala locale per l'area di studio.

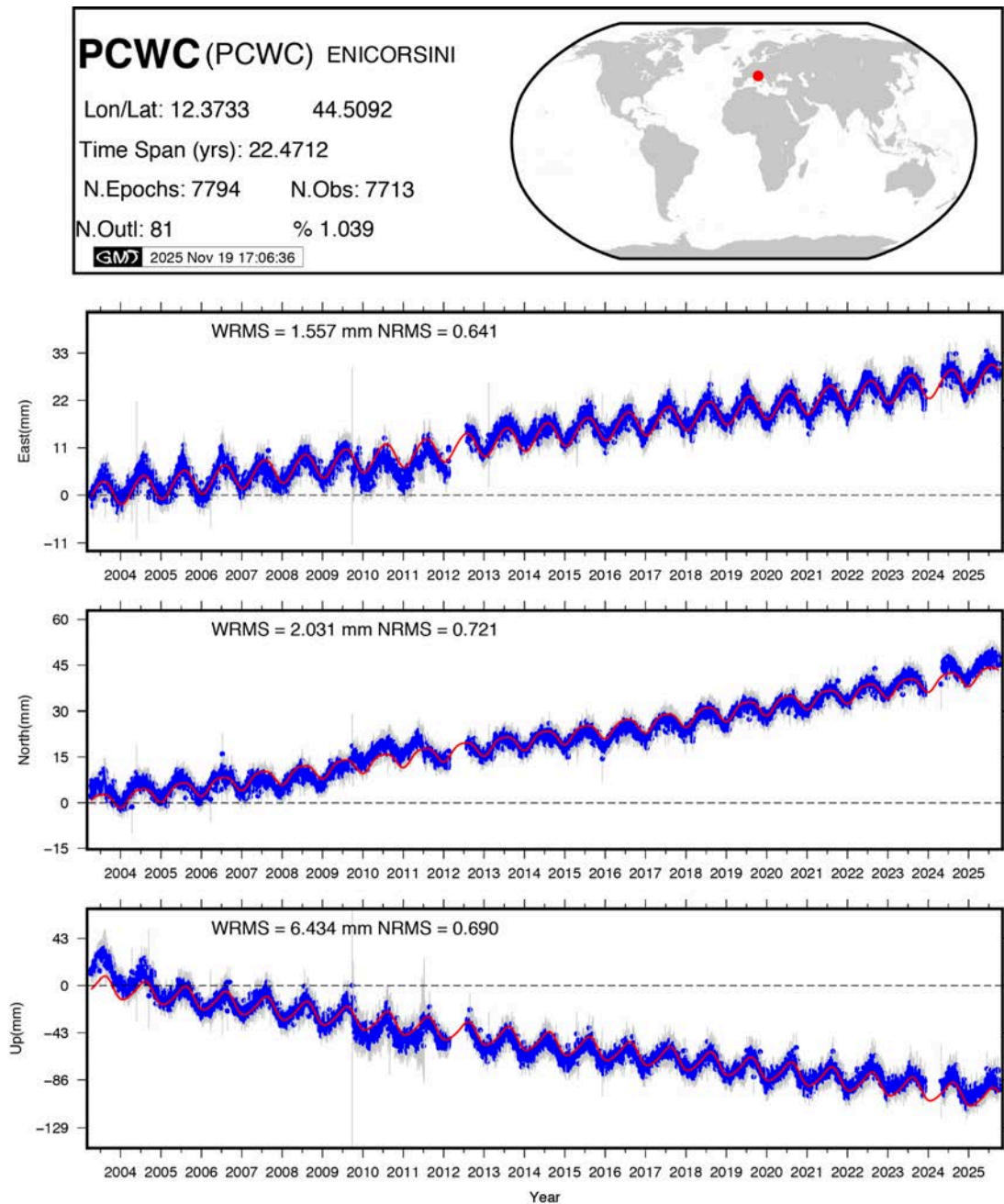


Figura 7.1. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione PCWC nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

La Figura 7.1 mostra le serie temporali di spostamento nelle tre componenti così ottenute a titolo di esempio per la stazione PCWC, mentre tutte le altre serie temporali sono riportate in Appendice C. Nelle immagini sono mostrati gli spostamenti giornalieri (epoche, punti blu) per le componenti Est e Nord nel sistema di riferimento Eurasia fisso e per la componente verticale nel sistema di riferimento IGB20. Ogni epoca ha associata un'incertezza corrispondente ad una deviazione standard (1σ) e viene riportato anche il modello funzionale atteso sopra descritto (linea rossa). Per ciascuna componente di spostamento sono riportati i residui rispetto il modello funzionale atteso in termini di WRMS (Weighted Root Mean Square) e NRMS (Normalized Root Mean Square), valori utili per avere un'indicazione della dispersione dei residui rispetto il modello considerato. Valori di NRMS maggiori di 1 suggeriscono la presenza di segnali di deformazione non contemplati nel modello funzionale, indicando quindi la presenza di possibili sorgenti deformative di natura locale.

La maggior parte delle stazioni GNSS della rete ENI mostra valori di NRMS minori di 1, tranne per le tre componenti delle stazioni ANGA e FIUN (Figure C.3 e C.8 in Appendice C), che sono caratterizzate da una decelerazione a lungo termine che interessa l'intera serie temporale. Questo comportamento può essere ascritto all'influenza del campo di coltivazione di idrocarburi adiacente relativo alla concessione "A.C27.EA", il cui tasso di produzione si è ridotto molto negli ultimi 20 anni (si veda Polcari et al., 2022 per ulteriori dettagli). Risulta importante tenere presente che l'area di monitoraggio del campo PCMW CCS è circondata da altre concessioni di coltivazione idrocarburi tuttora attive e le serie temporali di spostamento delle altre stazioni GNSS su piattaforma potrebbero essere influenzate da questi processi. Nei prossimi report sarà pertanto necessario eseguire un'analisi specifica delle serie temporali di spostamento in modo da minimizzare queste influenze e massimizzare allo stesso tempo l'osservazione degli spostamenti prevalentemente legati al campo di Porto Corsini Mare Ovest.

7.2 Campo di velocità GPS

Dall'analisi delle serie temporali di spostamento di tutte le stazioni utilizzate nei dintorni dell'area di monitoraggio viene stimato il termine lineare, generando un campo di velocità di spostamento rispetto al sistema di riferimento locale Eurasia-fisso. Le misure così ottenute descrivono la deformazione a lungo termine in atto, che nell'area di studio è prevalentemente di natura tettonica compressiva attraverso il fronte esterno dell'appennino settentrionale sepolto al di sotto della pianura padana (Argnani 1998; Vannoli et al., 2004) con tassi di accorciamento orizzontali di circa 1-2 mm/anno (Pezzo et al., 2020). Pertanto un campo di velocità fornito da stazioni stabili e affidabili dovrebbe mostrare questo andamento comune e coerente tra le stazioni adiacenti, mostrando gradualmente la compressione in atto in direzione circa Nord-Sud lungo il fronte pede-appenninico. Per quanto riguarda le velocità verticali, l'area è invece interessata da una diffusa subsidenza dovuta a diversi fenomeni naturali (es. compattazione dei sedimenti, flessione litosferica, emungimento di acque) dell'ordine di circa 3-4 mm/anno (Teatini et al., 2006).

Il risultato di questa analisi è mostrato in Figura 7.2 sia per le componenti orizzontali che verticali (dove sono indicate anche le principali strutture di faglia del fronte esterno compressivo) e che riguarda tutte le stazioni GNSS presenti nei dintorni dell'area di studio con almeno 2.5 anni di dati, valore considerato minimo per una prima valutazione attendibile della stima dei tassi di spostamento a lungo termine (Blewitt and Lavallée, 2002). Le stazioni aggiuntive considerate appartengono a reti sia pubbliche che private e alcune di esse non sono più attive, ma le cui misure sono utili per vincolare il campo di deformazione a scala regionale. In Tabella 7.1 sono riportati i valori di velocità stimati per le stazioni GNSS della rete ENI.

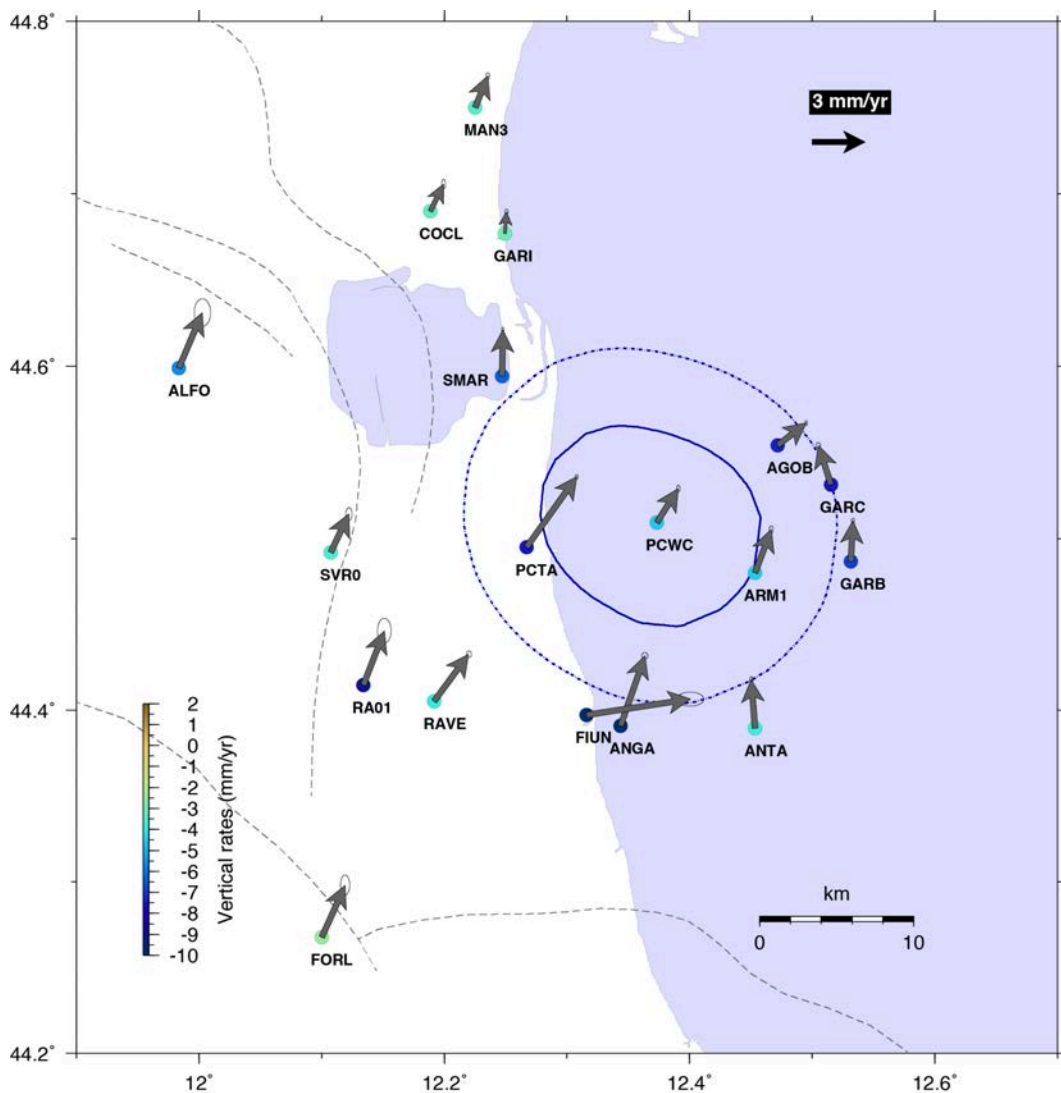


Figura 7.2. Campo di velocità di spostamento ottenuto dall'analisi dei dati GPS per le componenti orizzontali (freccie grigie) nel sistema di riferimento locale Eurasia-fissa con ellissi di errore al 95%, e le corrispondenti componenti verticali, mostrate dai cerchi colorati secondo la palette in basso a sinistra. I domini di monitoraggio sono indicati in blu e i principali lineamenti di faglia sono descritti dalle linee tratteggiate in grigio.

Dai risultati in Figura 7.2 si osserva come buona parte delle stazioni di monitoraggio della rete ENI mostrino un andamento abbastanza coerente in termini di intensità e direzione rispetto al campo di convergenza atteso in direzione Nord Nord Est-Sud SudOvest, con alcune eccezioni riguardanti le stazioni ANGA, FIUN e PCTA. Queste stazioni, come già evidenziato nel precedente paragrafo, potrebbero risentire degli effetti dovuti alle attività estrattive dei giacimenti adiacenti al campo PCMW CCS e sarà quindi necessario eseguire delle analisi specifiche in modo da minimizzare queste influenze e massimizzare allo stesso tempo l'osservazione degli spostamenti prevalentemente legati al campo PCMW CCS.

Stazione	VE (mm/anno)	VN (mm/anno)	VU (mm/anno)	S_VE (mm/anno)	S_VN (mm/anno)	S_VU (mm/anno)
AGOB	1,60	1,25	-7,33	0,03	0,06	0,27
ANGA	1,37	3,91	-14,84	0,07	0,08	0,39
ANTA	-0,22	2,71	-3,78	0,04	0,07	0,36
ARMI	0,91	2,42	-4,52	0,05	0,09	0,34
FIUN	5,83	0,89	-11,96	0,31	0,16	0,44
GARB	0,12	2,28	-6,92	0,04	0,06	0,29
GARC	-0,71	2,19	-7,53	0,05	0,07	0,32
PCTA	2,81	3,94	-7,52	0,03	0,05	0,26
PCWC	1,20	1,90	-4,61	0,04	0,08	0,30
SMAR	0,05	2,60	-6,32	0,03	0,05	0,27

Tabella 7.1: Velocità di spostamento delle componenti Est (VE), Nord (VN), e verticale (VU) e relative incertezze (S_VE, S_VN e S_VU) in mm/anno delle stazioni GNSS della rete locale con almeno 2,5 anni di dati, forniti nel sistema di riferimento locale Eurasia-fissa per le componenti orizzontali e in Igb20 per quelle verticali.

7.3 Misure di deformazione tramite InSAR

Nell'ambito del monitoraggio delle deformazioni del suolo tramite tecniche di interferometria satellitare applicate a dati SAR (Synthetic Aperture Radar), il concessionario ha fornito le serie storiche di deformazioni e relative mappe di velocità di spostamento del suolo ottenute utilizzando i dati satellitari di tre diverse costellazioni: Sentinel-1 (S1), Radarsat 2 (R2) e COSMO-SkyMed (CSK). I dati consegnati coprono spazialmente l'area costiera ravennate dove si estende in parte il DE. La copertura temporale dei diversi dataset è riportata in tabella 7.2.

Dataset	Inizio	Fine
S1 Ascendente	31/03/2015	31/12/2024
S1 Discendente	24/10/2014	30/12/2024
R2 Ascendente	02/04/2012	07/12/2024
R2 Discendente	13/04/2012	18/12/2024
CSK Ascendente	29/02/2012	30/08/2024
CSK Discendente	26/09/2008	19/08/2024

Tabella 7.2. Copertura temporale dei dataset SAR forniti da Eni.

Nelle Figure da 7.3 a 7.5 si riportano le velocità medie relative al dataset S1, R2 e CSK in geometria ascendente (A) e discendente (B). Per tutti i dataset i risultati mostrano valori di velocità media del suolo spazialmente non omogenei nell'area del DE. In generale l'area mostra valori di deformazione molto bassi, con velocità di allontanamento del suolo dal sensore entro i 3 mm/anno. Localmente si osservano allontanamenti molto marcati, con valori entro i -10/mm all'anno, con rari punti che superano tale valore solo nell'area lagunare compresa tra Ravenna e Marina di Ravenna. In tutti i dataset i valori di spostamenti negativi del suolo sono spazialmente poco estesi.

Le velocità di spostamento nelle componenti verticali e orizzontali (E-O) (da Figura 7.6 a Figura 7.8), evidenziano valori in linea con quanto osservato nelle mappe in LoS. L'area del DE mostra valori di subsidenza molto bassi, con velocità di abbassamento del suolo entro i 3 mm/anno. Localmente si osservano subsidenze molto più marcate, con valori entro i -10/mm all'anno, con alcuni punti che superano tale valore solo nell'area lagunare compresa tra Ravenna e Marina di Ravenna. Gli spostamenti lungo la componente E-O sono essenzialmente nulli nell'area di interesse, con pochi punti localizzati in cui si raggiungono valori comunque compresi entro i 3 mm/anno e legati alle subsidenze sopra descritte.

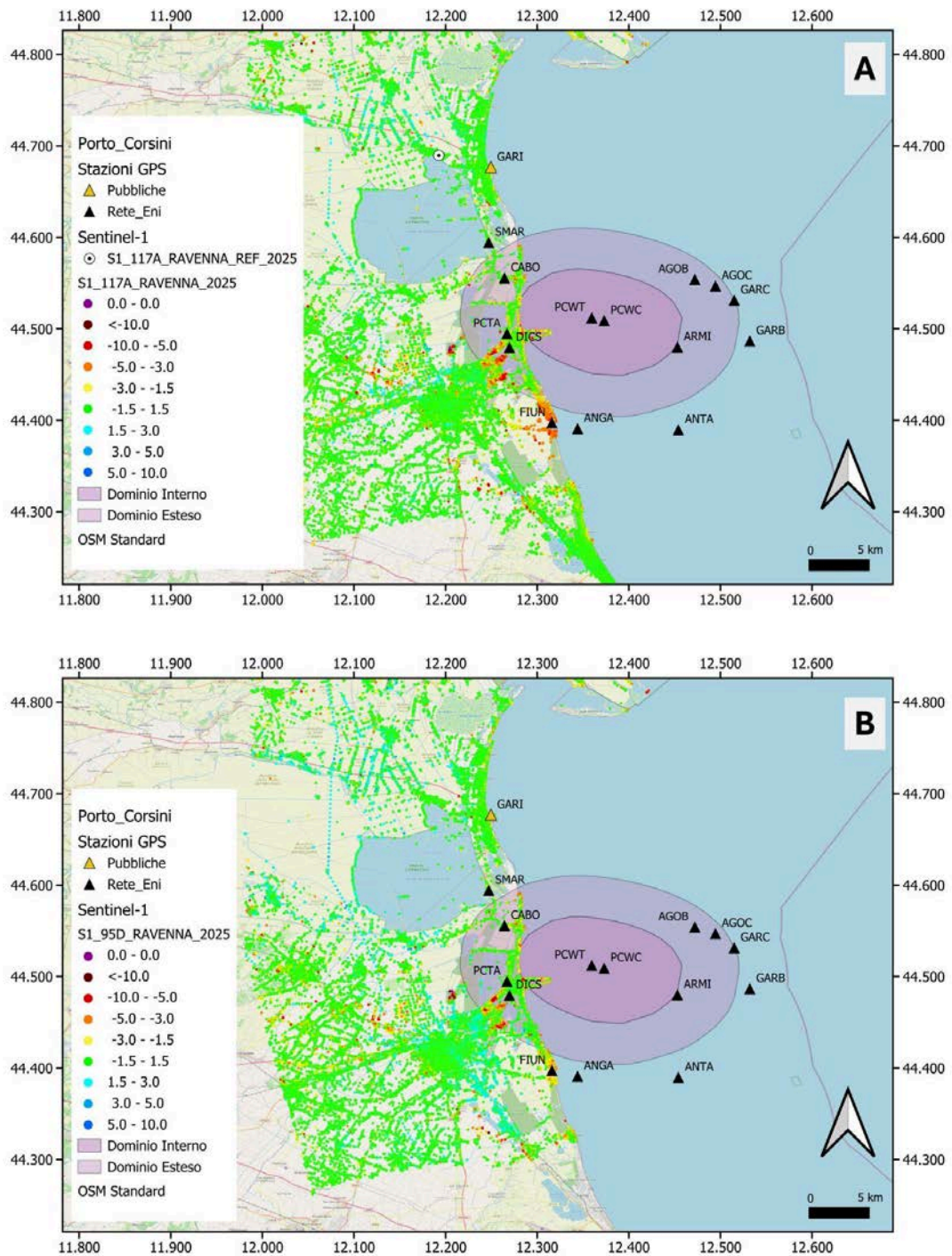


Figura 7.3 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite in orbita ascendente (A) e discendente (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nelle mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

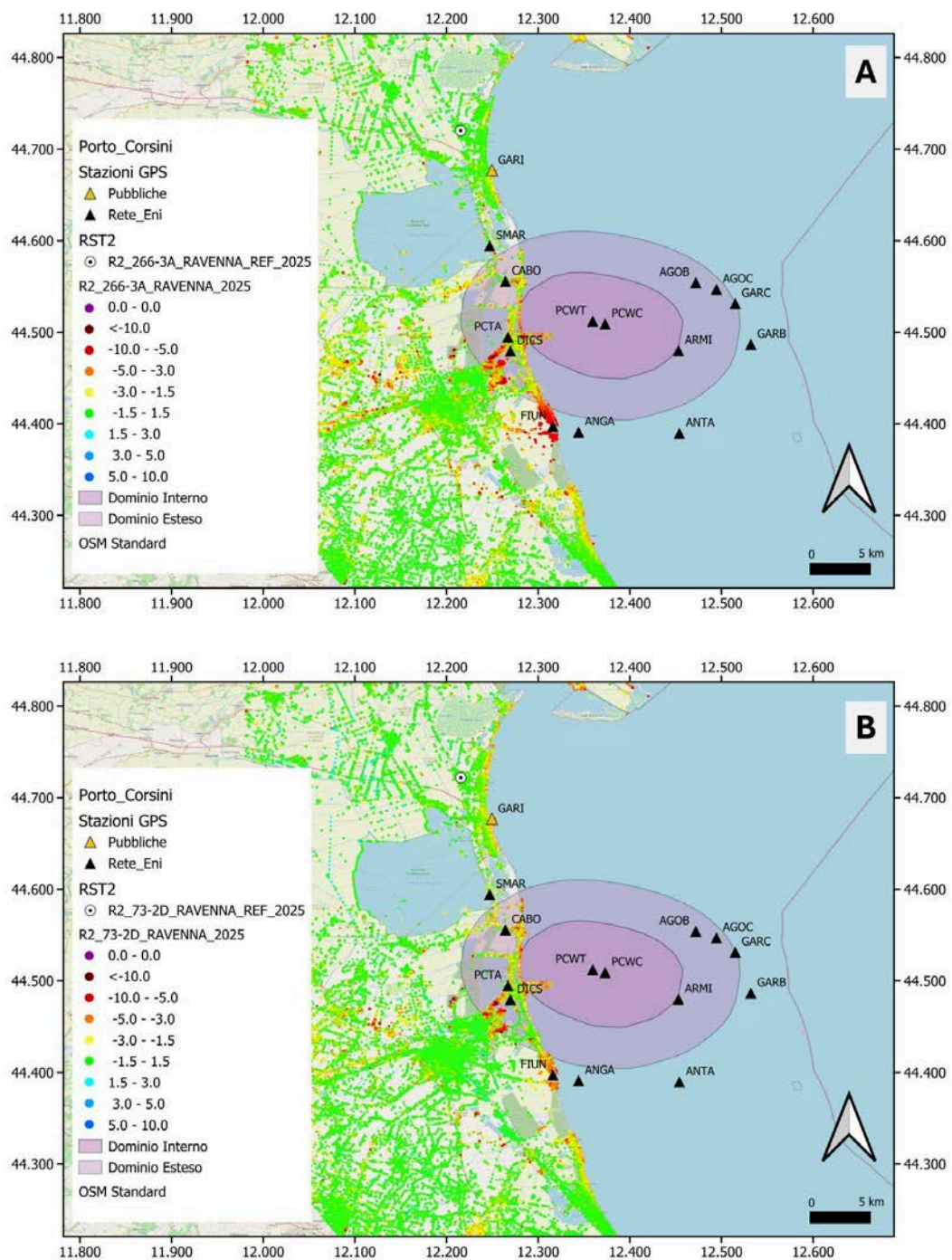


Figura 7.4 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite in orbita ascendente (A) e discendente (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Radarsat 2. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nelle mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

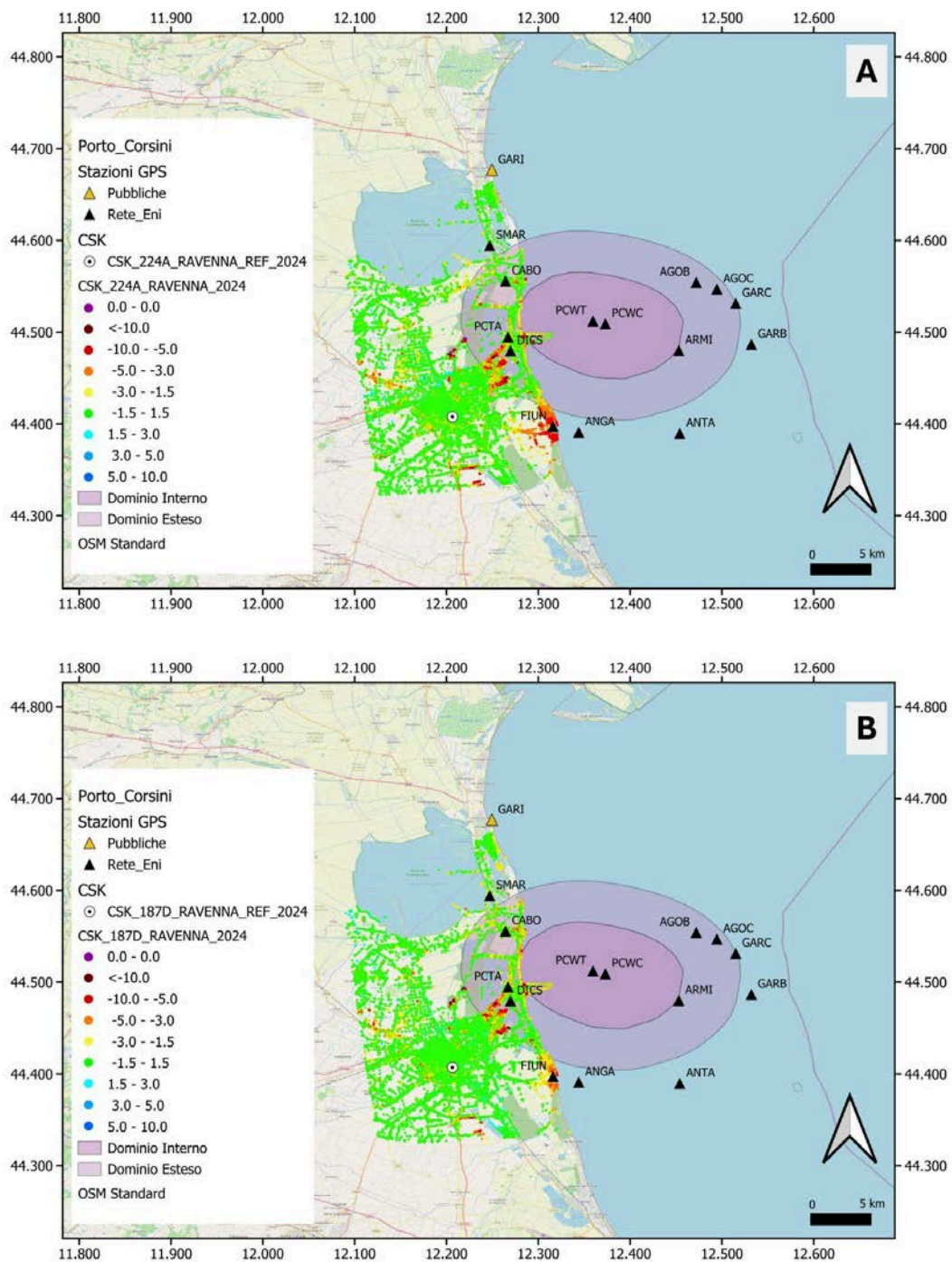


Figura 7.5 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite in orbita ascendente (A) e discendente (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione CSK. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nelle mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

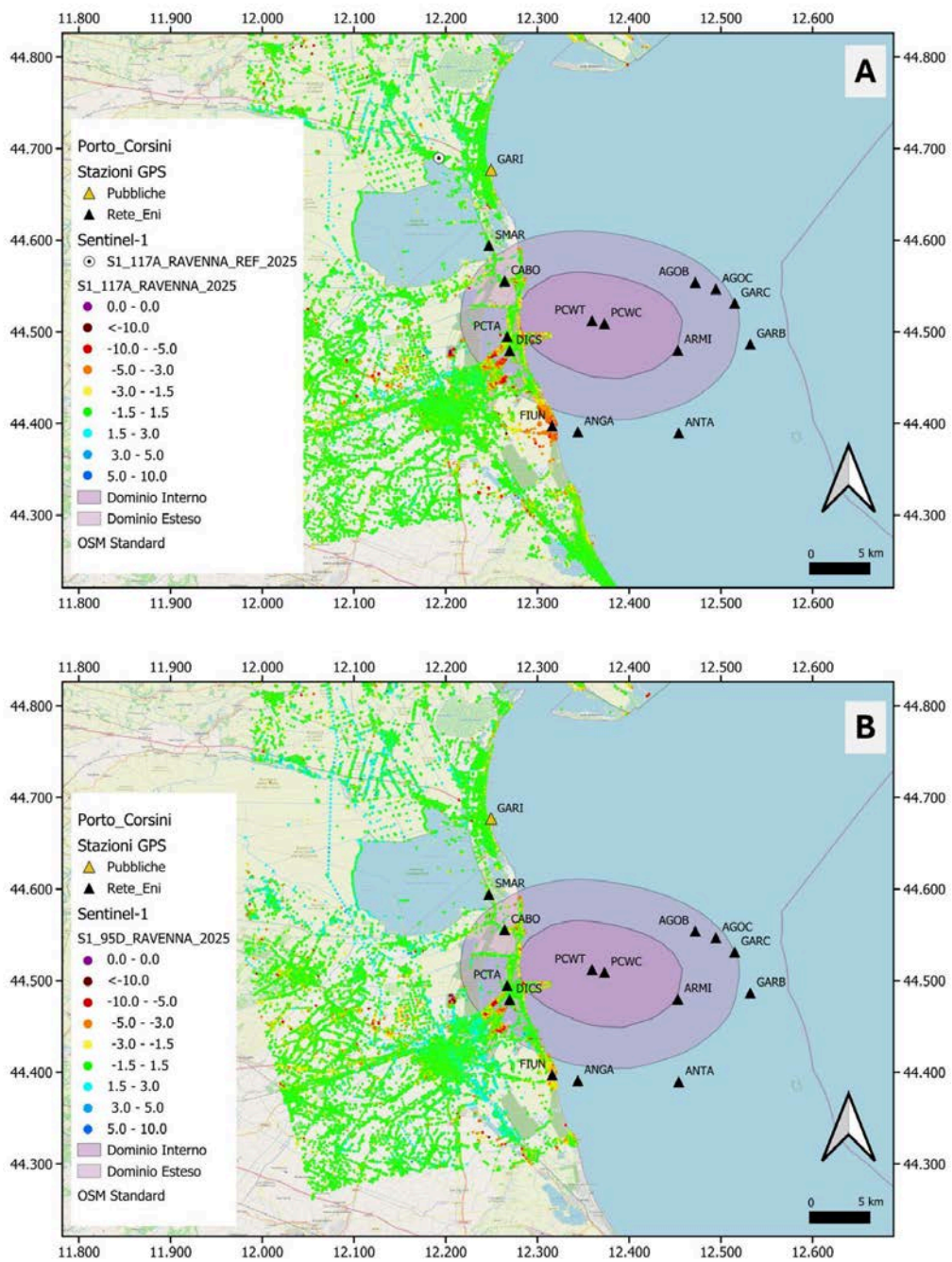


Figura 7.6 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la componente verticale (A) ed est-ovest (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Nel Pannello A, i valori negativi indicano subsidenza, mentre quelli positivi indicano sollevamento del suolo; nel pannello B, valori positivi indicano spostamenti verso est, mentre valori negativi indicano spostamenti verso ovest. Nella mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

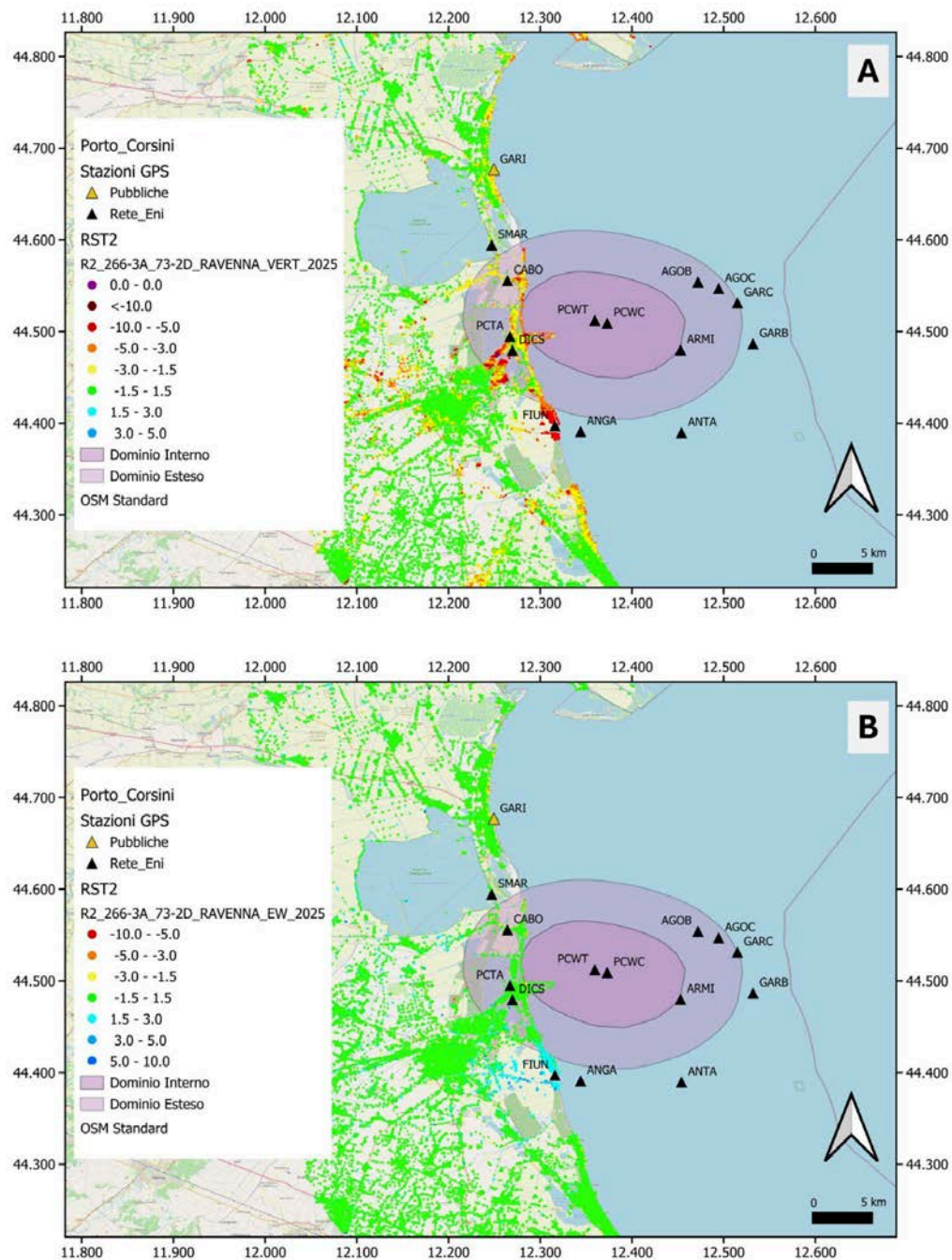


Figura 7.7 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la componente verticale (A) ed est-ovest (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Radarsat 2. Nel Pannello A, i valori negativi indicano subsidenza, mentre quelli positivi indicano sollevamento del suolo; nel pannello B, valori positivi indicano spostamenti verso est, mentre valori negativi indicano spostamenti verso ovest. Nella mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

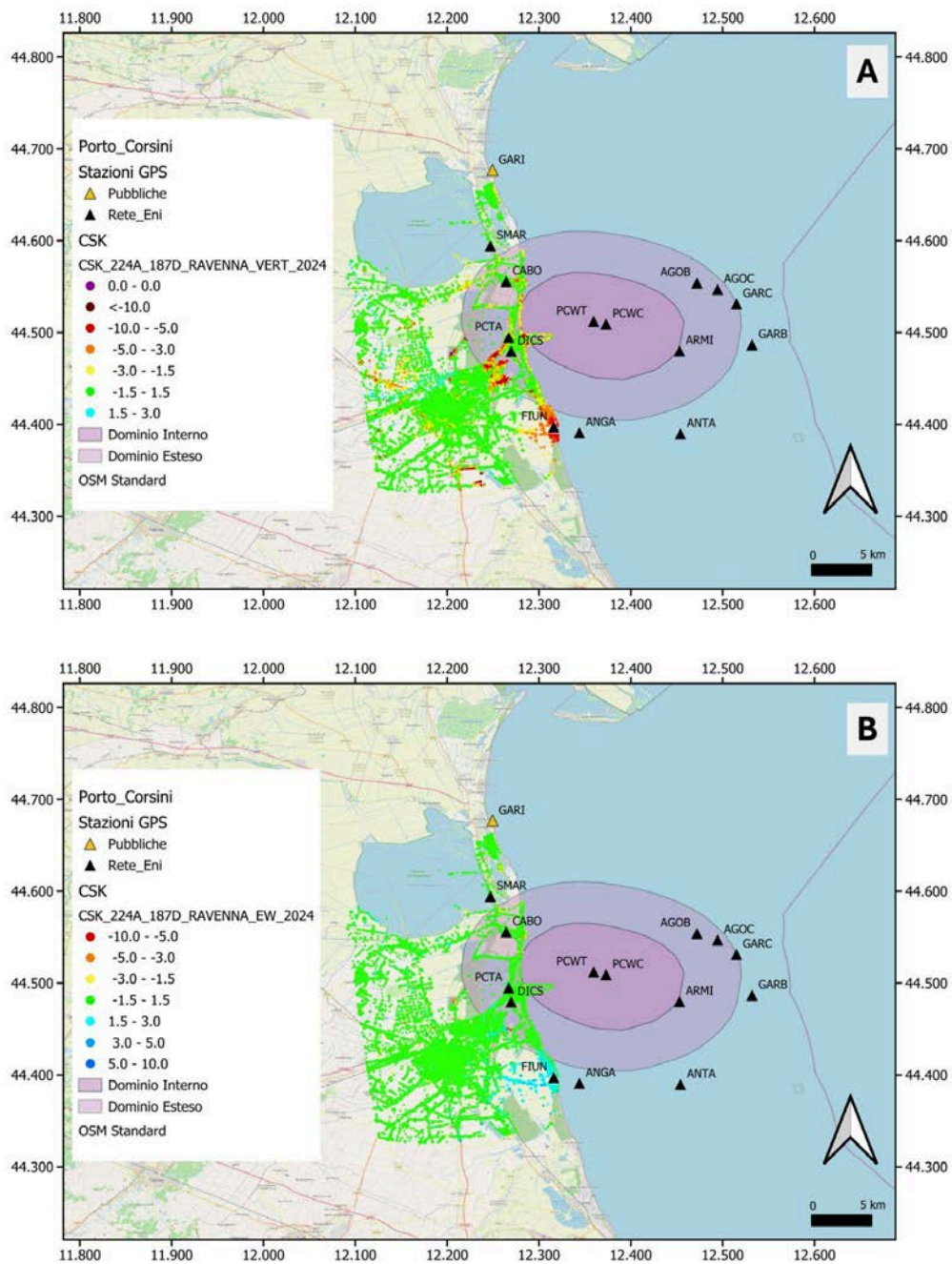


Figura 7.8 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la componente verticale (A) ed est-ovest (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione CSK. Nel Pannello A, i valori negativi indicano subsidenza, mentre quelli positivi indicano sollevamento del suolo; nel pannello B, valori positivi indicano spostamenti verso est, mentre valori negativi indicano spostamenti verso ovest. Nella mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

Oltre all'analisi effettuata dal concessionario come descritto sopra, la SPM ha effettuato un'analisi indipendente delle deformazioni del suolo utilizzando i dati del sensore Sentinel-1, dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) con un approccio di tipo SBAS (Small BAseline Subset) (Berardino et al., 2002).

Le misure di deformazione del suolo hanno confermato quanto già evidenziato dall'analisi dei dati forniti dal concessionario evidenziando deformazione basse, con velocità di allontanamento del suolo dal sensore entro i 3 mm/anno. Localmente si osservano allontanamenti più marcati, con valori entro i -10/mm all'anno, con rari punti che superano tale valore solo nell'area lagunare compresa tra Ravenna e Marina di Ravenna (Figura 7.9). L'extrapolazione delle componenti verticale e orizzontale mostra valori simili nelle subsidenze per le stesse aree già descritte (Figura 7.10).

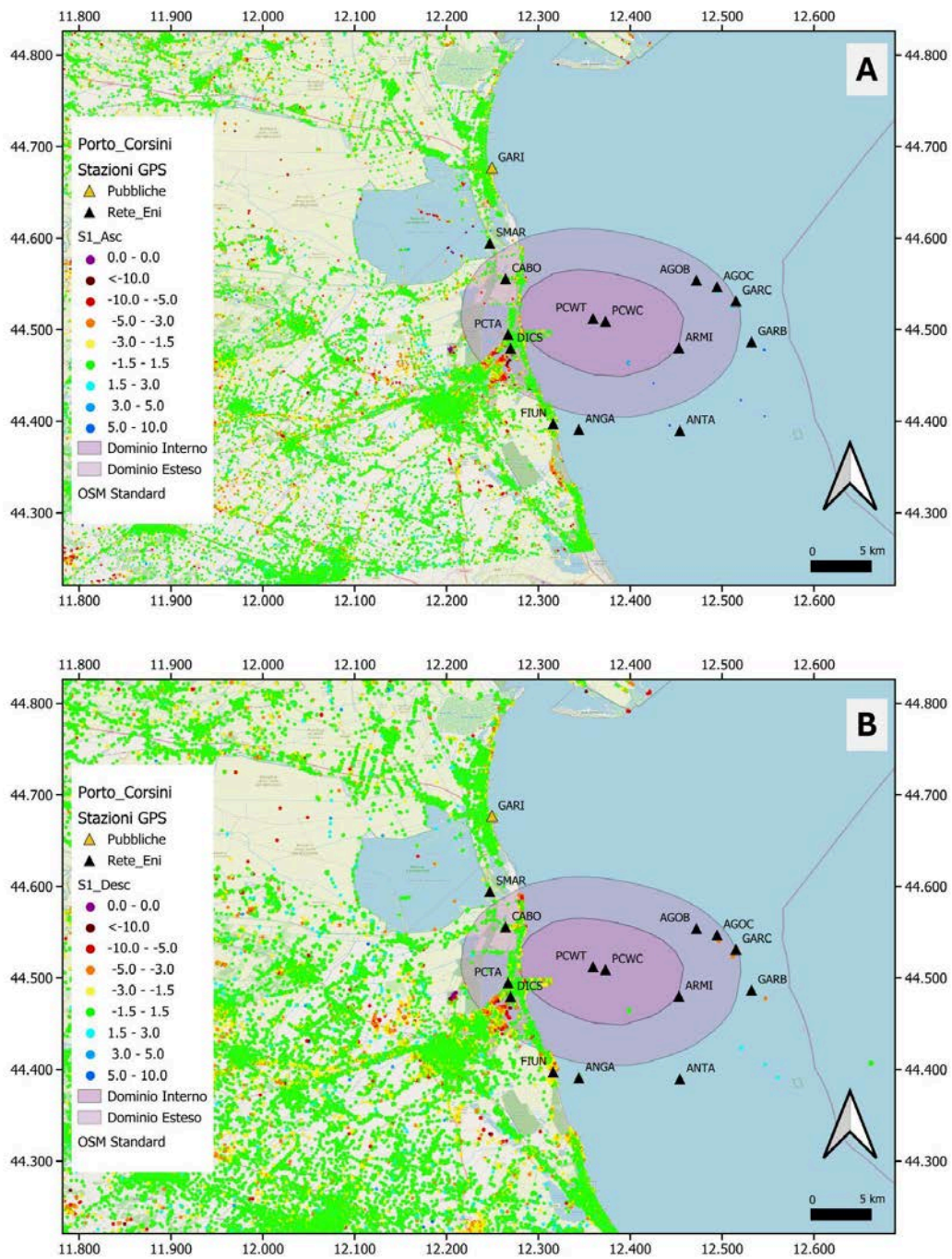


Figura 7.9 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite in orbita ascendente (A) e discendente (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nelle mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

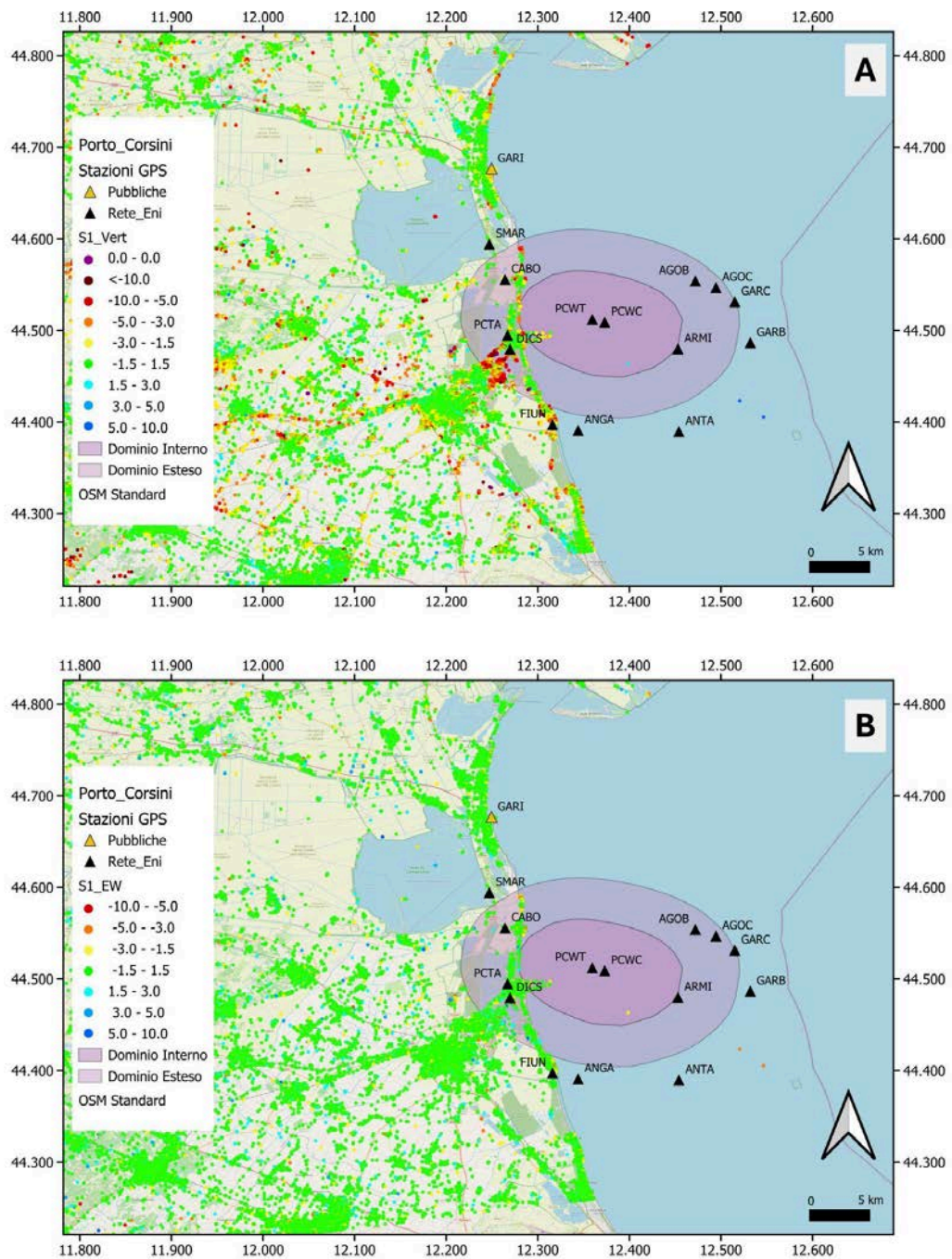


Figura 7.10 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la componente verticale (A) ed est-ovest (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione CSK. Nel Pannello A, i valori negativi indicano subsidenza, mentre quelli positivi indicano sollevamento del suolo; nel pannello B, valori positivi indicano spostamenti verso est, mentre valori negativi indicano spostamenti verso ovest. Nella mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

7.4 Livellazioni

Il Concessionario ha trasmesso i valori dei dislivelli misurati e delle quote compensate, ottenuti elaborando i dati di una campagna di livellazione tra le Valli di Comacchio e Cervia, realizzata dalla Società SER.IN.T nell'autunno 2023. Questa campagna di misura rispetta le indicazioni fornite nella prescrizione n.7 dal Comitato ETS in cui viene richiesto al Gestore di *“effettuare subito dopo il rilascio dell'autorizzazione allo stoccaggio una misura delle linee”*. I valori elaborati sono stati supervisionati dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna (DICAM). In particolare, le misure di livellazioni si riferiscono ad una rete costituita da 12 poligoni principali, si estendono lungo una distanza totale di 272 km e sono state acquisite nel periodo 21/9/2023-23/11/2023. I valori di chiusura dei principali poligoni sono compresi all'interno della tolleranza richiesta e la compensazione delle misure è stata fatta utilizzando il metodo dei minimi quadrati e considerando quattro capisaldi coincidenti con le stazioni GNSS di Eni (Relazione conclusiva DICAM, 2024). Al momento, non si dispone della geo-referenziazione dei capisaldi. Pertanto, non è possibile attribuire i valori ricevuti ad una posizione geografica e individuare eventuali criticità. Si rimanda questo aspetto ad una fase successiva di valutazione, previa ricezione delle informazioni mancanti. In una fase successiva di analisi, si verificherà anche la disponibilità di dati relativi ad altre reti di livellazione (e.g., la rete IGM) e il collegamento con la rete realizzata dal Concessionario, al fine di migliorare la mappatura della deformazione nello spazio e nel tempo.

7.5 Considerazioni finali

L'elaborazione dei dati geodetici GNSS ha permesso di verificare che, per le stazioni di lunga data, le misure di spostamento mostrano andamenti che non si discostano molto dal campo di deformazione atteso per l'area di monitoraggio, validando la bontà degli strumenti di monitoraggio. Per le stazioni di nuova installazione invece non è possibile validarne la stabilità e l'affidabilità delle misure perché l'intervallo di acquisizione è ancora troppo breve. Risulta inoltre necessario evidenziare che alcune stazioni, come FIUN ed ANGA sono caratterizzate da una decelerazione a lungo termine che interessa l'intera serie temporale e ciò può essere ascritto all'influenza del campo di coltivazione di idrocarburi adiacente relativo alla concessione “A.C27.EA”, il cui tasso di produzione si è ridotto molto negli ultimi 20 anni (si veda Polcari et al., 2022 per ulteriori dettagli). Inoltre risulta importante tenere presente che l'area di monitoraggio del campo PCMW CCS è comunque circondata da altre concessioni di coltivazione idrocarburi tuttora attive e le serie temporali di spostamento delle altre stazioni GNSS su piattaforma potrebbero essere influenzate da questi processi. Nei prossimi report sarà pertanto necessario eseguire delle specifiche analisi per le serie temporali di spostamento in modo da minimizzare queste influenze e massimizzare allo stesso tempo l'osservazione degli spostamenti prevalentemente legati al campo di Porto Corsini Mare Ovest.

L'analisi delle deformazioni del suolo tramite tecniche InSAR, applicate ai dati radar di tre diversi sensori in entrambe le geometrie di acquisizione ascendente e discendente, mostra

valori di subsidenza del suolo generalmente bassi, entro i 3 mm/anno, che localmente possono arrivare a valori entro i 10 mm/anno. Raramente vengono superati valori di 10 mm/anno se non nel settore compreso tra Ravenna e Marina di Ravenna. Le subsidenze misurate con valori compresi tra 3 e 10 mm/anno mostrano una estensione spaziale molto limitata nell'area del DE, probabilmente attribuibile a fenomeni estremamente locali. Questi risultati sono generalmente in accordo con le misure ottenute tramite le elaborazioni GNSS, nonostante i periodi di acquisizione dei dati non siano esattamente coincidenti.

Dalle analisi GNSS e InSAR finora effettuate non si rilevano comunque evidenti variazioni delle deformazioni del suolo legate alle attività di iniezione eseguita nel campo PCMW CCS.

Per i dati di livellazione acquisiti nell'autunno del 2023 non si evidenziano particolari criticità. La trasmissione da parte del Concessionario di ulteriori informazioni relative alla georeferenziazione dei capisaldi e all'esistenza di altre reti di livellazione consentirà di dettagliare ulteriormente l'estensione della deformazione superficiale, come suggerito nel Par. 6.2 del documento ILG.

8 Monitoraggio DAS

Fra le varie prescrizioni elencate dal Decreto Ministeriale di autorizzazione al progetto di stoccaggio geologico della CO₂ 'CCS Ravenna fase 1', troviamo la specifica '*[...] di includere, in via sperimentale, dati della fibra ottica DAS tra quelli del monitoraggio microsismico*'³. Seguendo questa prescrizione, il Concessionario ha equipaggiato il pozzo di iniezione con un cavo in fibra ottica, interrogato da un sistema DAS posizionato a bordo piattaforma. Oggetto di questo capitolo è la descrizione del sistema di acquisizione e una prima valutazione sui dati acquisiti nell'ottica del monitoraggio geofisico delle operazioni di stoccaggio.

Negli ultimi anni, le applicazioni dei sistemi DAS alla sismologia sono aumentate in maniera considerevole, come testimoniato dalla crescita esponenziale della letteratura scientifica in materia (vedasi, ad esempio, Zhan, 2020). Ciò nonostante, i sistemi DAS presentano delle peculiarità per le quali ogni installazione rappresenta un caso specifico, la cui trattazione richiede l'implementazione di procedure dedicate. Non esiste ancora un contesto unificato di metodologie standard di analisi, ed i codici di calcolo utilizzati sono ancora ad un livello prototipale, richiedendo spesso l'adeguamento agli specifici casi esaminati. Questa doverosa premessa per chiarire che i risultati di seguito illustrati derivano da calcoli non ancora uniformati a livello procedurale.

Trattandosi di una tecnologia innovativa il cui utilizzo in ambito geofisico è molto recente, la prima parte di questo rapporto è dedicata a presentare i fondamenti teorici della strumentazione, con particolare riguardo alla diversità delle grandezze fisiche misurate rispetto alla sismometria tradizionale (deformazione piuttosto che velocità/accelerazione del terreno). Alla luce di queste particolarità, le analisi condotte per questo primo rapporto sono dedicate alla caratterizzazione dei segnali acquisiti, investigandone il contenuto spettrale e la relativa evoluzione nel tempo e nello spazio, ovvero lungo l'estensione in profondità del cavo di fibra ottica. Le prestazioni del sistema sono poi valutate analizzando i rapporti segnale-rumore (SNR) per varie registrazioni di terremoti locali e di una esplosione controllata, comparando i risultati con quanto osservato ai sismometri installati in prossimità del pozzo di iniezione.

8.1 Descrizione generale dei sistemi DAS

8.1.1 Principio di funzionamento

I sistemi DAS (Hartog & Kader, 2012) si fondano su una versione avanzata del principio di riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR), basato sulla trasmissione di impulsi luminosi altamente coerenti all'interno di un cavo in fibra ottica. Mentre ciascun singolo impulso viaggia lungo il cavo, piccole fluttuazioni dell'indice di rifrazione all'interno della fibra,

³ Decreto Ministeriale 26 gennaio 2023 della Direzione Generale Infrastrutture e Sicurezza del Ministero dell'ambiente e della Sicurezza Energetica, pubblicato sul BUIG - Bollettino ufficiale degli idrocarburi e delle georisorse - Anno LXVII, n. 1 -31 gennaio 2023 Appendice all'Al.1, par. 9.1 della prescrizione n. 6.

congelate durante il processo di produzione, causano la diffusione di parte della luce, secondo un processo chiamato *scattering* (diffusione) *di Rayleigh*. Si tratta di un tipo di *scattering* elastico generato da inhomogeneità fisse: ciò implica che la lunghezza d'onda della luce diffusa rimane invariata rispetto a quella incidente. Nelle fibre ottiche di silice fusa, comunemente usate nelle telecomunicazioni, la potenza del segnale luminoso associato allo *scattering* di Rayleigh è circa 3-4 ordini di grandezza più debole rispetto a quello incidente, a seguito dell'alta qualità delle fibre.

Nei sistemi DAS, un laser pulsato invia brevi impulsi di luce all'interno di una fibra ottica standard; gli impulsi devono avere elevata coerenza e stabilità in frequenza. La luce viaggia lungo la fibra e interagisce con le microscopiche irregolarità del vetro, che generano *scattering* di Rayleigh. Una piccola parte della luce diffusa ritorna indietro verso il sensore, dove un interrogatore misura ampiezza, fase e tempo di arrivo dell'eco di ogni impulso. Poiché il tempo di ritorno è proporzionale alla lunghezza del cammino ottico percorso, ogni determinato impulso di luce retrodiffusa viene associato ad una precisa porzione della fibra. Se una vibrazione, un suono o una pressione agiscono su una sezione della fibra, questa subisce una micro-variazione (positiva o negativa) di lunghezza, che si traduce in una modifica nel cammino ottico e quindi nella fase della luce retrodiffusa da quella specifica posizione. Misurando l'angolo di fase della luce retrodiffusa da una determinata sezione della fibra è quindi possibile risalire alla possibile deformazione. Tuttavia, il DAS non misura la fase assoluta, in quanto molto rumorosa. Piuttosto, il sistema determina la differenza di fase tra due posizioni separate da una distanza di riferimento G , chiamata *gauge length*. L'interrogatore misura quindi le differenze di fase tra la luce retrodiffusa da sezioni consecutive della fibra, utilizzando l'informazione fornita dal segnale retrodiffuso miscelato con quello sorgente. Combinando i dati di fase provenienti da numerose acquisizioni, è quindi possibile determinare la deformazione relativa ϵ (*strain*) della fibra lungo ogni tratto di lunghezza G : $\epsilon = \Delta G / G$. Sebbene la fase e l'ampiezza della luce retrodiffusa dipendano dalle fluttuazioni casuali delle inhomogeneità distribuite lungo il cavo ottico, la differenza di fase tra regioni diverse della fibra è direttamente correlata allo *strain* e varia in modo lineare rispetto a questo. Lo *strain* $\epsilon(z,t)$ in un generico punto z della fibra all'istante t è relazionato alla differenza di fase $\Delta\theta(z,t)$ secondo la formula:

$$\epsilon(z,t) = \Delta\theta(z,t) \lambda / 4 \pi n \gamma G \quad (8.1)$$

dove λ è la lunghezza d'onda nel vuoto della luce laser utilizzata dall'interrogatore (tipicamente 1550 nm), n è l'indice di rifrazione del vetro della fibra ($n \approx 1.468$ per le fibre G652 a 1550 nm), γ è il fattore di scala fotoelastico ($\gamma \approx 0.78$ per le fibre di silice fusa) e G è la *gauge length*. E' così possibile ottenere una mappa continua delle deformazioni lungo la fibra, con una risoluzione spaziale nell'ordine di 1-10m lungo distanze fino a 100 km.

8.1.2 Parametri di acquisizione

8.1.2.1 Gauge length

Nell'acquisizione DAS, la *gauge length* è uno dei parametri più importanti. La scelta di questa grandezza è condizionata da due esigenze fondamentali: [i] campionare il campo d'onda sismico in maniera sufficientemente densa, e [ii] avere un adeguato rapporto segnale-rumore (SNR). Una *gauge length* grande diminuisce l'ampiezza dello spettro utilizzabile del segnale sismico, ma fornisce un miglior SNR. Per rumore bianco, infatti, il SNR diminuisce come la radice quadrata della *gauge length*. Il compromesso è quindi utilizzare una *gauge length* più grande possibile, senza tuttavia sacrificare la sensibilità verso le frequenze caratteristiche dei segnali che si desidera misurare. Questo contenuto in frequenza dipende da diverse condizioni, come il tipo di terreno, l'origine del fenomeno sismico, le caratteristiche della sorgente.

8.1.2.2 Frequenza degli impulsi

Tipicamente l'interrogatore DAS invia gli impulsi laser con una frequenza nell'ordine di grandezza del kHz o delle decine di kHz (10^3 - 10^4 Hz). Il tempo tra questi impulsi deve essere scelto in modo tale che un impulso abbia il tempo di raggiungere la fine della fibra e tornare indietro prima dell'impulso successivo, in modo cioè che la fibra sia interessata da un solo impulso alla volta. La massima frequenza utilizzabile per la generazione degli impulsi diminuisce quindi in modo inversamente proporzionale alla lunghezza della fibra. Tale frequenza è anche limitata dalla capacità del sistema di acquisizione di elaborare i segnali e immagazzinare le informazioni su supporto informatico.

8.1.2.3 Durata dell'impulso (Pulse Width)

La durata degli impulsi laser è un altro importante parametro da scegliere. La velocità della luce nella fibra ottica mette in relazione la durata dell'impulso con la lunghezza della fibra da esso interessata. In base ai principi di funzionamento precedentemente descritti, questa durata deve essere scelta in modo che la luce ricevuta dall'interrogatore provenga da un tratto di fibra di lunghezza inferiore ad una *gauge length*. Il vantaggio di usare una durata dell'impulso più grande è che una maggiore quantità di luce viene usata nella determinazione della fase, e ciò migliora il SNR della misura, tuttavia se la lunghezza dell'impulso nella fibra è maggiore della *gauge length* utilizzata la qualità della misura dello strain ne viene gravemente compromessa.

8.1.3 Applicazioni della tecnologia DAS alla sismologia

Da quanto sopra accennato, i sistemi DAS trasformano le fibre ottiche in migliaia di sensori sismici virtuali ad alta densità, misurando deformazioni lungo la fibra con risoluzioni spaziali fino all'ordine del metro. Negli ultimi anni si sono quindi affermati come uno strumento rivoluzionario, per la capacità di ottenere registrazioni ad alta risoluzione su scale molto estese ed in ambienti altrimenti inaccessibili, utilizzando un singolo strumento di interrogazione ed acquisizione. Fra le varie applicazioni si ricorda il monitoraggio in ambienti tettonici, vulcanici o glaciali (Jousset et al. 2022; Klaasen et al. 2021; Li et al. 2021; Lindsey et al., 2017; Zeng et al.

2022), aree offshore (Shinohara et al. 2022); misure in pozzo (Lellouch & Biondi 2021), monitoraggio di traffico stradale e ferroviario (Wang et al. 2021); monitoraggio di sismicità indotta (Webster et al. 2013; Karrenbach et al. 2019), di impianti di stoccaggio geologico della CO₂ (Daley et al. 2013) di processi di stimolazione idraulica (Karrenbach et al. 2017) ed impianti geotermici (Lellouch et al., 2020, 2021). Una esauriente sintesi delle applicazioni DAS alla sismologia si trova in Zhan, (2020). Tuttavia, il segnale DAS presenta delle peculiarità che impediscono l'applicazione diretta delle tecniche proprie della sismologia tradizionale, e richiedono procedure di interpretazione più complesse. Le principali differenze riguardano:

- I. L'unidirezionalità della misura (viene misurata solamente la componente della deformazione lungo l'asse della fibra);
- II. La grandezza fisica misurata (strain vs velocità / accelerazione del terreno);
- III. La forte dipendenza della misura dall'accoppiamento del cavo di fibra ottica con il terreno circostante.

8.1.3.1 Direttività

Come descritto in precedenza, il sistema DAS rileva la deformazione associata a diverse porzioni della fibra ottica, con una sensibilità che dipende quindi dalla proiezione del tensore delle deformazioni lungo la direzione del cavo. La risposta angolare del DAS presenta quindi alcune analogie, ma anche differenze significative, rispetto alla risposta angolare della singola componente di un sismometro convenzionale che misura la velocità di vibrazione del terreno, come mostrato nella Figura 8.1.

Sia il DAS che la componente verticale del geofono risultano insensibili alle onde P quando l'angolo di incidenza è di 90°, ovvero quando le onde si propagano perpendicolarmente all'asse della fibra. Invece, il comportamento della fibra ottica rispetto alle onde S è più complesso. Entrambi gli strumenti sono insensibili alle onde S che si propagano parallelamente all'asse verticale del geofono e all'asse della fibra. Tuttavia, mentre il geofono presenta la massima sensibilità alle onde S che si propagano perpendicolarmente al suo asse verticale, la fibra ottica raggiunge la sua massima sensibilità quando l'angolo di propagazione è di 45° rispetto all'asse della fibra.

Un'altra differenza rilevante tra DAS e sismometri riguarda la polarità. Come evidenziato nella Figura 8.1, la polarità delle onde P nel DAS rimane invariata indipendentemente dall'angolo di incidenza. Ciò significa che, sia che le onde P si propagano verso l'alto che verso il basso lungo l'asse della fibra, la polarità è sempre positiva. Al contrario, nel geofono la polarità varia in funzione della direzione di propagazione dell'onda P, ossia se questa si muove parallelamente all'asse verticale verso l'alto o verso il basso. Per quanto riguarda le onde S, nel DAS la polarità rimane costante per le onde che si propagano lateralmente all'asse della fibra (verso destra o sinistra). Nel caso del geofono, invece, la polarità è invertita in entrambe le direzioni.

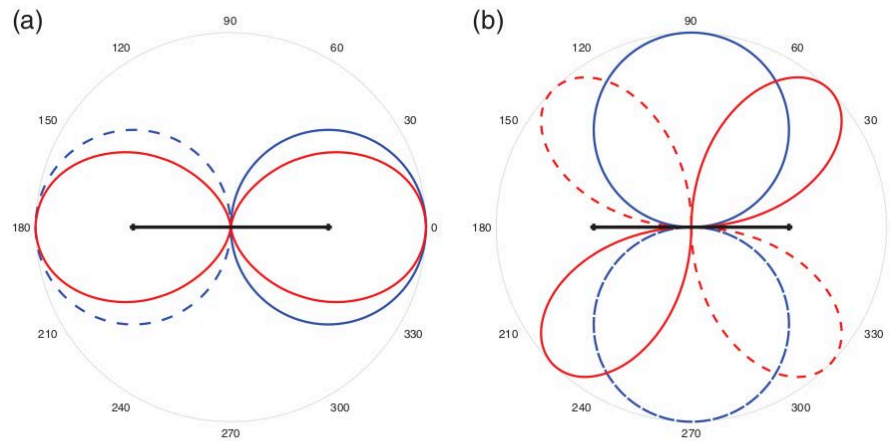


Figura 8.1. (a) Le linee rosse mostrano la sensibilità direzionale del DAS, o dello strainmeter lineare in generale, all'onda P per una sezione di fibra dritta allineata lungo l'asse orizzontale (linea nera). Le linee continue e tratteggiate indicano rispettivamente polarità positiva e negativa. La sensibilità direzionale della componente orizzontale di un sismometro convenzionale è indicata dalle linee blu come riferimento. (b) Come nel pannello (a), ma relativamente alle onde S (modificato da Zhan, 2020).

8.1.3.2 Relazioni fra deformazione dinamica e moto del suolo

La relazione tra deformazione e velocità delle particelle nel contesto DAS è stata presentata, fra gli altri, da Daley et al. (2015). Per un'onda piana di ampiezza A che si propaga nella direzione x , lo spostamento del terreno alla posizione x ed al tempo t è dato da: $u(x, t) = A(x)e^{i(kx - \omega t)}$ dove k è il numero d'onda e ω la frequenza angolare. Supponendo che $A(x)$ sia costante, allora:

$$\varepsilon = \partial u / \partial x = +/- S \partial u / \partial t = +/- S \dot{u} \quad (8.2)$$

dove $S = 1/c = k/\omega$ è la lentezza apparente (inverso della velocità apparente di fase c) nella direzione del cavo, anch'essa considerata costante; $\dot{u} = \partial u / \partial t$ è la velocità delle particelle misurata da un sismometro convenzionale, ed il segno è positivo quando il numero del canale del cavo aumenta nella direzione di propagazione dell'onda.

L'equazione 8.2 Stabilisce una relazione diretta fra la deformazione e la velocità di vibrazione del terreno. Ciò ha un'importanza fondamentale in quanto permette di relazionare i dati acquisiti da un sistema DAS con un parametro tipico della sismologia tradizionale quale la velocità di oscillazione del suolo, necessaria anche per il calcolo della magnitudo. Deformazione e velocità di vibrazione sono relazionate attraverso l'inverso della velocità apparente di propagazione: questo implica che, per un'onda piana che si propaga lungo la direzione del cavo, l'ampiezza della deformazione è inversamente proporzionale alla velocità di propagazione. Il segnale DAS risulta quindi particolarmente sensibile alla geologia dei terreni attraversati, assumendo ampiezze maggiori in corrispondenza dei terreni con proprietà meccaniche scadenti.

In conclusione, vi sono tre elementi che rendono l'interpretazione del segnale DAS particolarmente complessa. Il primo, riguarda l'unidirezionalità dello strumento, la cui sensibilità è limitata all'asse di allungamento della fibra. Il secondo, è l'estrema sensibilità alle proprietà meccaniche locali dei terreni attraversati. Il terzo riguarda invece un fattore difficilmente predicibile, ovvero la dipendenza dell'ampiezza dal grado di accoppiamento del cavo con il terreno. Queste complicazioni rendono difficoltosa l'interpretazione dei segnali osservati, richiedendo analisi specifiche per ogni diversa installazione.

8.2 Sistema DAS nel programma sperimentale 'CCS Ravenna fase 1'

Il monitoraggio microsismico sperimentale DAS si avvale di un cavo di fibra ottica installato nel pozzo di iniezione PCMW-30DIR, la cui geometria schematica è illustrata nella Figura 8.2. La fibra è installata nel tubino di iniezione, per una lunghezza di circa 3 km. La parte più superficiale del pozzo di iniezione (0 - ~1330 m) è equipaggiata con un casing non cementato, mentre per la parte sottostante il casing è cementato. Il tubino di iniezione è vincolato solo a testa e fondo pozzo, dove termina il cavo di fibra ottica. Il cavo di fibra ottica è connesso ad un interrogatore DAS HalliBurton; le misure dell'angolo di fase dell'impulso retro-diffuso sono memorizzate con una dinamica di 16bit in formato H5, su file di durata 1s. Gli attributi di questi file contengono tutti i parametri che caratterizzano l'acquisizione; in Tabella 8.1 ne riportiamo quelli più significativi. Con questi parametri, la quantità dei dati registrati ammonta a circa 135 GB/giorno, ovvero più di 4TB/mese.

L'interrogatore DAS è posizionato sulla piattaforma, e le registrazioni sono trasferite manualmente con cadenza variabile (~15 giorni) presso il centro dati del Concessionario. Il trasferimento dei segnali verso la SPM avviene in maniera asincrona mediante collegamento remoto al centro dati. Lo scarico dei dati ha sofferto della inevitabile latenza del collegamento internet, e della difficoltà ad automatizzare l'accesso al centro dati per problematiche legate sia alle procedure di autenticazione, che al sistema operativo in uso presso il concessionario.

Nel periodo compreso fra il 24 maggio 2024 ed il 27 giugno 2024 l'acquisizione è stata effettuata su un tratto ridotto di fibra, compreso tra 1.700 e 3.282 metri di profondità. Dal 27 giugno 2024 alla data del presente rapporto l'acquisizione è invece avvenuta sull'intero tratto di fibra, compreso fra la superficie e 3.297 metri di profondità. La disponibilità dei dati presso il centro dati del concessionario, aggiornata al 14 Novembre 2025, è illustrata in Figura 8.3.

A questo proposito, notiamo come le relazioni fra l'ampiezza dell'impulso (*pulse width*) e la *gauge length* siano consistenti con quanto raccomandato in letteratura (vedasi ad es. la Fig. 2.4 in Willis et al., 2021).

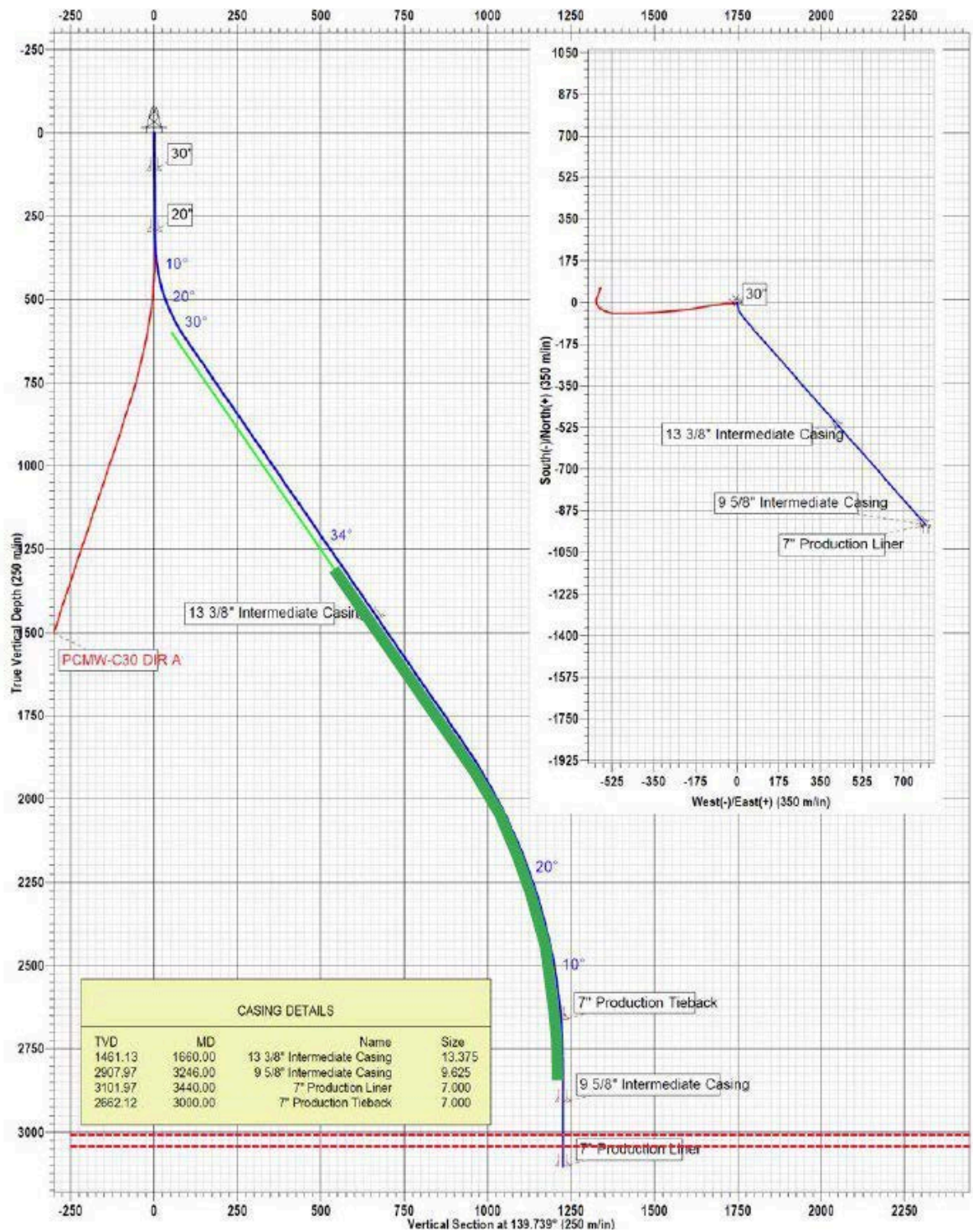


Figura 8.2 - Rappresentazione schematica della geometria di acquisizione. Tratto verde chiaro (da testa pozzo a 1329 m TVD [True Vertical Depth]) : casing non cementato. Tratto verde scuro (intervallo utile ca. 1329-2842 m TVD): casing cementato. Il livello iniezione è compreso nell'intervallo 3003-3036 m TVD. Immagine gentilmente fornita dal Concessionario.

Gauge length (m)	15
Number of channels	1627
Laser Pulse Rate (Hz)	10000.0
Laser Pulse Width (ns)	80.0
Channel spacing (m)	2.042183
Start Channel Index	241
Refractive Index	1.468000
DataType	Raw
Interrogator Serial	CRI-4400_B065
Output Data Rate (Hz)	500.00
Start Locus Index	251
RawDataUnit Differential phase, scaled by 10430	$(2^{15} - 1) / \pi$

Tabella 8.1 - Parametri di acquisizione ricavati dagli attributi di un file H5

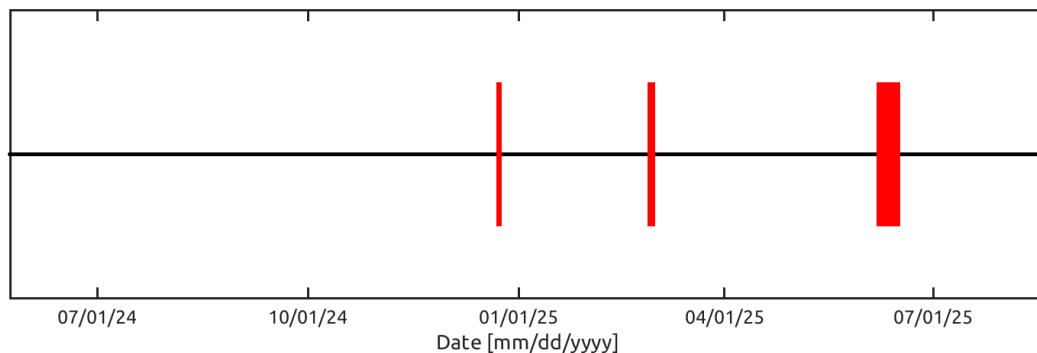


Figura 8.3 - Disponibilità delle registrazioni DAS al centro dati del Concessionario, aggiornata al 15 Novembre 2025. Le linee rosse indicano gli intervalli mancanti. Nell'insieme, la disponibilità dei dati è del 97.3%.

La Figura 8.4 mostra un esempio di registrazione di alcuni secondi acquisita sull'intera schiera di canali DAS, contenente anche un terremoto a distanza locale. Nei diversi pannelli è illustrato l'effetto delle principali tecniche di pre-condizionamento del segnale, utilizzate per attenuare i disturbi tipici delle misure DAS. Nel pannello 8.4a è riportata la registrazione originale: la variazione dell'angolo di fase (proporzionale allo strain dinamico) è rappresentata in funzione del tempo e della posizione lungo la fibra. Emergono due caratteristiche principali:

- [i] Il rumore di fondo è nettamente più intenso nelle porzioni superficiali della fibra;
- [ii] La presenza di un segnale che si propaga apparentemente a velocità infinita, interessando simultaneamente tutti i canali e manifestandosi nella mappa come righe verticali. Si tratta del noto rumore di modo comune (*common mode noise*; Willis, 2017), riconducibile alle vibrazioni dell'interrogatore. A partire dal secondo 2 compare un segnale coerente che si propaga dal basso verso l'alto, associato al primo arrivo di un terremoto a distanza locale.

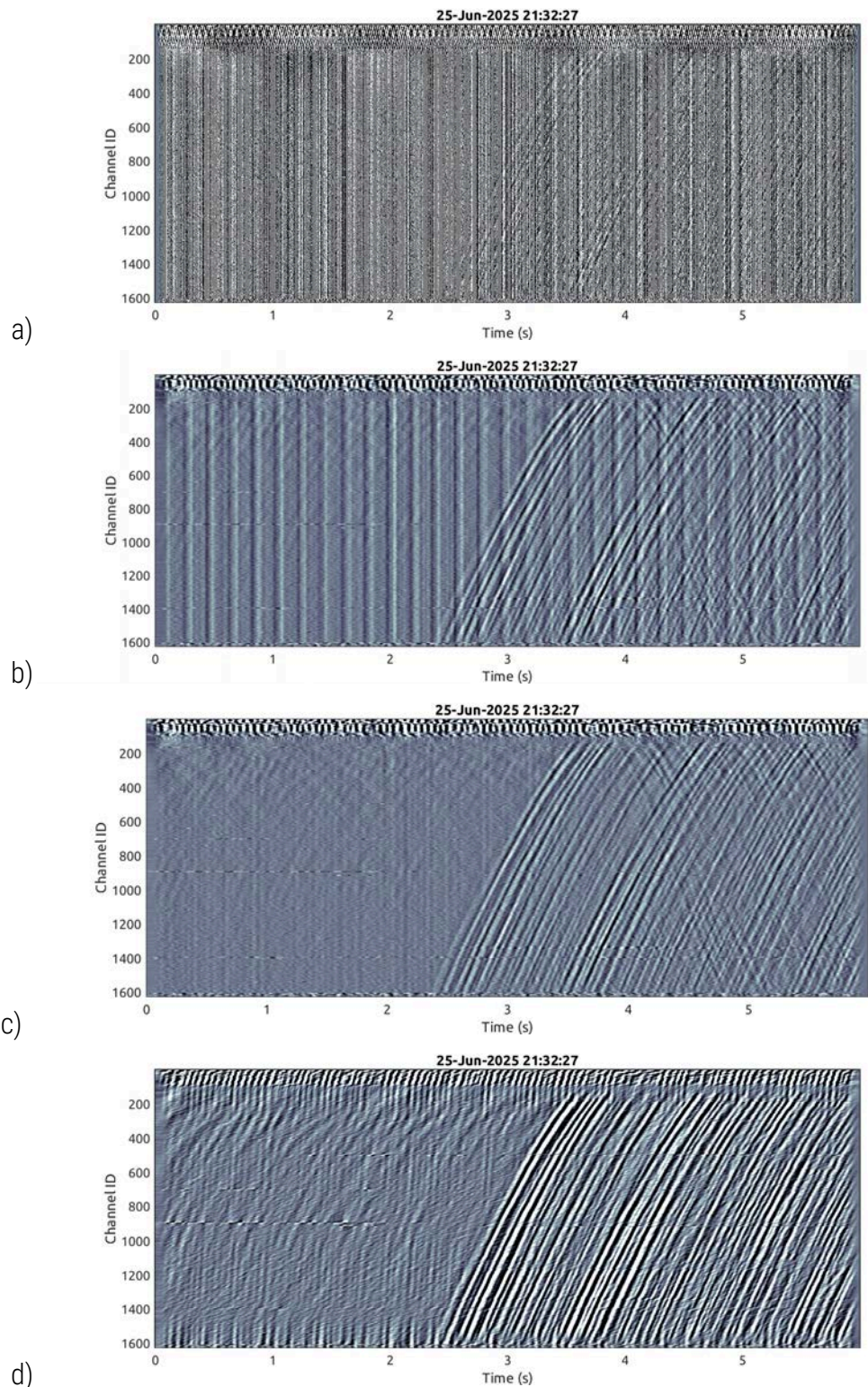


Figura 8.4 - (a) Esempio di 6 secondi di registrazione DAS che includono l'arrivo di un piccolo terremoto a distanza locale (circa 27 km). (b) Lo stesso che in (a), dopo l'applicazione di un filtro passa banda nel dominio del tempo. (c) Dopo la sottrazione della media di tutti i canali. (d) Dopo l'applicazione di un filtro FK per rimuovere i segnali a che si propagano a velocità infinita o negativa. In tutti i pannelli i segnali sono normalizzati rispetto al massimo assoluto calcolato su tutti i canali.

Il pannello 8.4b mostra invece l'effetto di un semplice filtro passa-banda [2–20] Hz applicato nel dominio del tempo a tutti i canali. Il segnale del terremoto inizia a emergere chiaramente; dal secondo 4 in avanti è visibile anche la riflessione delle onde sismiche sulla superficie terrestre (in questo caso sul fondale marino), che si presenta come un segnale con tempo di arrivo crescente con la profondità. Il rumore di modo comune, tuttavia, rimane ancora molto evidente. Il pannello 8.4c illustra gli effetti dell'applicazione alle tracce in [b] di una tecnica standard per la mitigazione del rumore di modo comune, che consiste nel sottrarre da ciascun canale la media delle registrazioni di tutti i canali, che rappresenta appunto il modo comune. Il risultato mostra come le bande verticali caratteristiche del modo comune siano del tutto scomparse, mentre rimangono le riflessioni all'interfaccia terra-acqua. Infine, nel pannello 8.4d viene mostrato l'effetto dell'applicazione alle tracce in [b] di un filtro frequenza numero d'onda, progettato per eliminare i segnali con velocità infinita (come il rumore di modo comune) o negativa, ovvero con propagazione dalla superficie verso la profondità. In questo caso si osserva la quasi totale scomparsa sia degli effetti del modo comune, che della riflessione all'interfaccia terra-acqua.

8.3 Caratterizzazione del rumore sismico

La caratterizzazione del rumore sismico è un passo fondamentale nella valutazione delle prestazioni di ogni sistema di monitoraggio sismico, incluso quelli basati su sistemi DAS (vedasi, ad esempio, Pecci et al., 2024). Il rumore sismico è associato all'azione di diverse sorgenti, che influenzano specifiche bande di frequenza e/o intervalli temporali. Ad esempio, in prossimità delle coste una delle principali sorgenti di rumore sismico è costituita dal microsisma marino, i cui picchi spettrali caratteristici sono associati alle frequenze di ~ 0.1 Hz e ~ 0.2 Hz per il microsisma primario e secondario, rispettivamente (Cessaro, 1994). Sempre in questi contesti, può essere presente anche rumore sismico nella banda 0.5-10 Hz, dovuto all'infrangersi delle onde (e.g., Poppeliers and Mallinson, 2015). A frequenze maggiori di 0.5-1 Hz, le sorgenti di rumore sono generalmente associate a fenomeni meteorologici, e ad una varietà di azioni antropiche, quali attività industriali, traffico stradale e ferroviario, impianti di produzione di energia (McNamara e Buland, 2004). L'ampiezza e le caratteristiche del rumore antropico presentano generalmente una marcata modulazione giorno-notte, e dipendono ovviamente dalla vicinanza alle rispettive sorgenti.

Il rumore sismico, sia di origine naturale che antropica, può essere sufficientemente elevato da sovrastare il segnale associato a terremoti locali, riducendo quindi la sensibilità del sistema di monitoraggio verso la rilevazione e localizzazione di eventi sismici. Per questo motivo, la caratterizzazione del rumore e delle sue variazioni spazio-temporali rappresenta un passo fondamentale per determinare le capacità di rilevamento e localizzazione del sistema di monitoraggio. Per quanto sopra accennato, le principali sorgenti di rumore hanno un'origine superficiale; di conseguenza, l'installazione di strumentazione sismometrica in pozzo porta a significativi miglioramenti del rapporto segnale-rumore, come dimostrato in numerosi studi (si veda, ad esempio, Rossi et al., 2023, e la bibliografia lì riportata). In generale, l'attenuazione del rumore sismico con la profondità dipende principalmente dalle bande di frequenza considerate

e dalle proprietà meccaniche dei terreni attraversati. Nel caso specifico dei sistemi DAS, un ulteriore fattore è costituito dall'accoppiamento della fibra ottica con il terreno circostante.

Questa Sezione è quindi dedicata alla caratterizzazione del rumore sismico misurato dal sistema DAS, analizzando la modulazione della potenza spettrale nel tempo e la sua variazione con la profondità. Ciò permette di identificare specifiche sorgenti di rumore, associate a fenomeni sia naturali che artificiali. Poiché in questa fase siamo interessati solamente alle variazioni relative del rumore in funzione della profondità, del tempo e della frequenza, dove non altrimenti specificato i dati sono espressi nell'unità di misura nativa del sistema di acquisizione, ovvero la differenza di fase misurata su porzioni consecutive della fibra separate da una Gauge Length.

8.3.1 Proprietà spettrali: descrizione generale

La prima analisi ha riguardato le proprietà spettrali del rumore. In questo caso, le registrazioni sono state sottocampionate spazialmente mediando gruppi contigui di 5 canali, passando quindi dai 1627 canali originali a 325, con una spaziatura di 10 metri. Le densità di potenza spettrale (PSD; Power Spectral Density) sono state calcolate su intervalli successivi di lunghezza 30 minuti, mediando le trasformate di Fourier calcolate su finestre di lunghezza 60s con sovrapposizione del 50% (Welch, 1967).

Da questa procedura la potenza spettrale viene definita nella sua dipendenza dalla posizione lungo la fibra (profondità), frequenza, tempo. Componendo queste informazioni, possiamo quindi rappresentare la variazione dell'energia in funzione della frequenza e della profondità per un determinato intervallo temporale, oppure le variazioni -per una determinata banda di frequenza- con il tempo e la profondità.

Come primo esempio, nella Figura 8.5 viene mostrata la PSD in funzione della frequenza e della posizione lungo la fibra, per un intervallo di mezz'ora nella notte del 2 Aprile 2025.

L'energia elastica è distribuita su una ampia banda di frequenza. La caratteristica più prominente di questa immagine riguarda la banda di frequenza [0.3 - 1]Hz, verosimilmente attribuibile al microsisma marino secondario. L'ampiezza spettrale di questa banda diminuisce con l'aumentare della profondità, come conseguenza della differente profondità di penetrazione delle onde di Rayleigh per le diverse lunghezze d'onda. In altre parole, le lunghezze d'onda maggiori (frequenze minori) interessano spessori crostali maggiori e, viceversa, la perturbazione elastica associata alle lunghezze d'onda minori (frequenze più elevate) rimane confinata alla parte più superficiale della crosta.

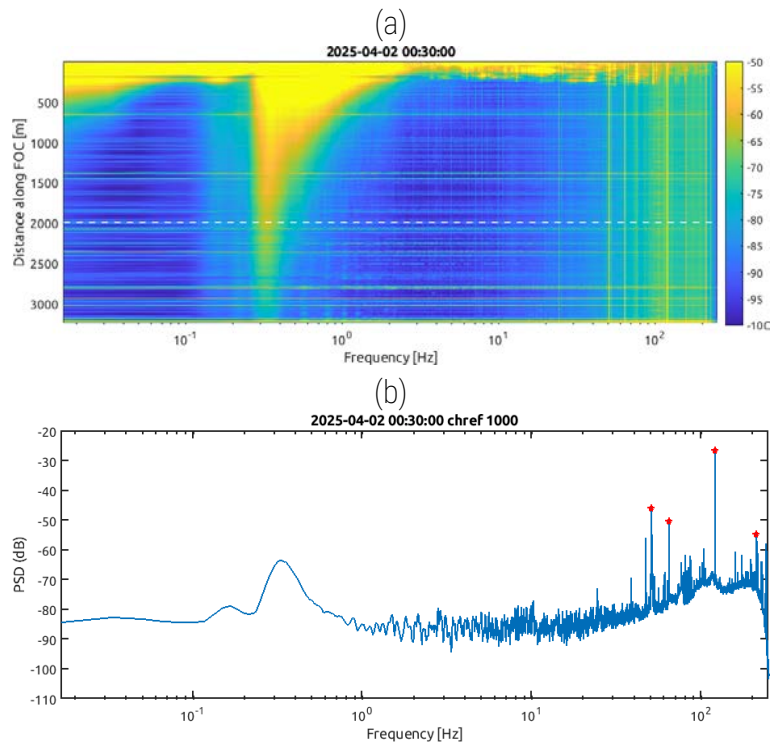


Figura 8.5 - (a) PSD per tutti i canali della fibra. La scala dei colori indica la differenza di fase della luce retro-diffusa, proporzionale alla potenza della deformazione dinamica, espressa in decibel (dB). La linea tratteggiata bianca identifica il canale numero 1000, scelto come canale di riferimento, la cui PSD è illustrata nel pannello (b). PSD al canale di riferimento. I quattro picchi spettrali di maggior potenza sono identificati da stelline rosse.

Si osservano poi alcuni picchi in bande di frequenza molto ristrette, che interessano tutti i canali, che compaiono come linee verticali nella mappa frequenza-profondità di Figura 8.5.

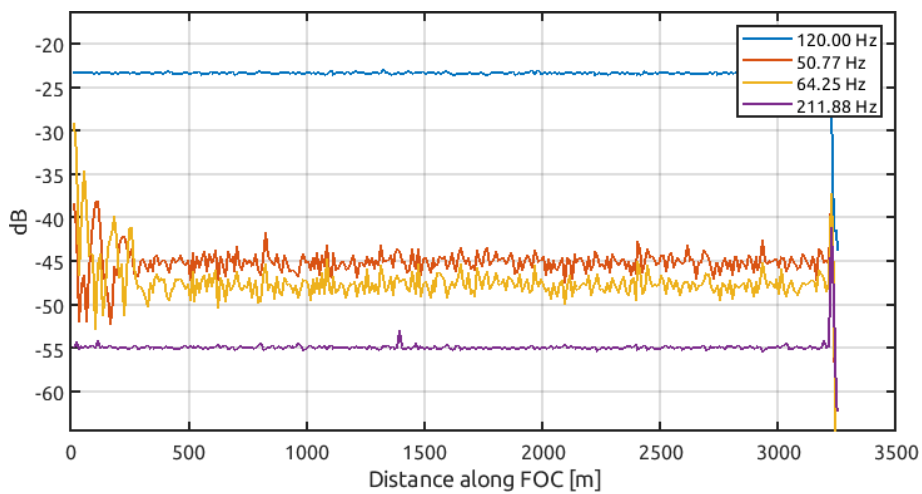


Figura 8.6 - Variazione lungo il cavo della potenza dei picchi spettrali identificati in Figura 8.5b.

Per i picchi a frequenza 120 Hz e ~212 Hz, la potenza rimane invariata lungo tutto il cavo, suggerendo quindi un'origine prettamente strumentale (Fig. 8.6). Per gli altri due picchi a ~50 Hz e ~64 Hz, la potenza diminuisce in maniera sostanziale nei primi 250 metri di cavo, per poi rimanere pressoché invariata sino al termine della fibra. L'interpretazione della natura di questi picchi non è immediata, ma possiamo senz'altro escludere una origine profonda, proprio in virtù del carattere stazionario del segnale per profondità maggiori di 250 metri.

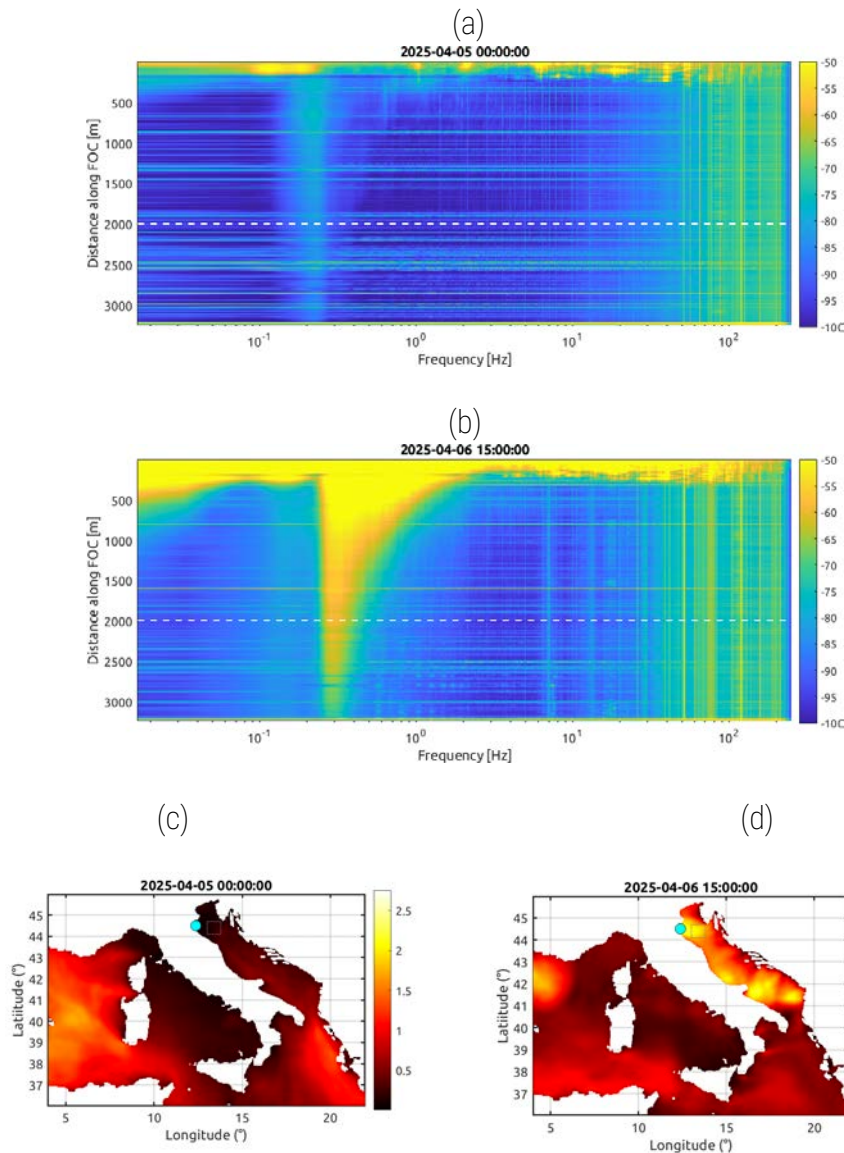


Figura 8.7 - [a,b] Mappe di potenza spettrale in funzione di frequenza e profondità per due diversi intervalli di tempo. Le mappe in [c,d] illustrano l'altezza significativa d'onda (m) in accordo alla scala di colori riportata a destra. Il cerchietto celeste indica il campo PCMW; ad Est di questo, il piccolo riquadro delimita la regione utilizzata per estrarre l'altezza media d'onda media riportata nella successiva Figura 8.8.

8.3.2 Le componenti a bassa frequenza ed il microsisma marino.

Ritornando alla banda [0.3 - 1] Hz, la corrispondenza tra deformazione dinamica e microsisma marino secondario trova conferma anche dalla comparazione con i dati di altezza significativa di onda del Mediterraneo, resi disponibili dal programma Copernicus (Korres et al., 2023). La Figura 8.7 illustra il confronto fra le PSD e la distribuzione dell'altezza d'onda nel Mediterraneo, per due intervalli di tempo in cui il clima marino dell'Adriatico settentrionale era significativamente differente.

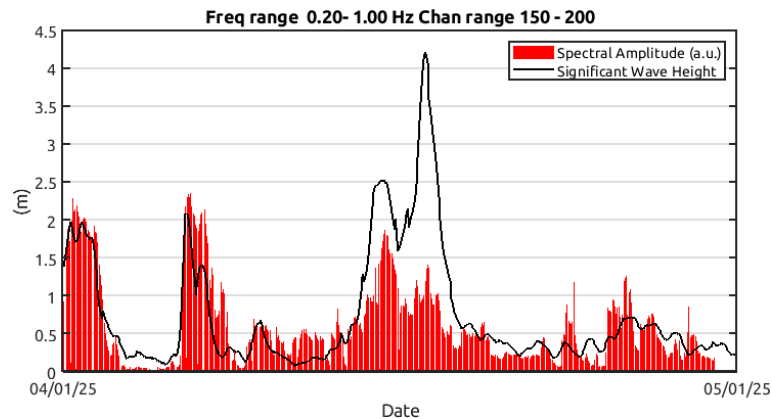


Figura 8.8 - Confronto fra gli andamenti temporali della deformazione dinamica a bassa frequenza ed il livello significativo d'onda del mar Adriatico Settentrionale, durante il mese di Aprile 2025. La linea nera indica l'altezza significativa d'onda, mediata entro il dominio riportato in Figura 8.7. Le barre rosse rappresentano l'ampiezza spettrale mediata nella banda di frequenza [0.2,1.0] Hz e sui canali [150,200], corrispondenti alla porzione di cavo compresa tra 300 e 400 m di profondità. Le ampiezze spettrali sono state scalate e per un fattore arbitrario così da renderle confrontabili con il dato meteo marino.

8.3.3 Variazioni del rumore con il processo di iniezione

Abbiamo poi investigato se l'attività di iniezione avesse delle corrispondenze sulle caratteristiche del rumore sismico. La Figura 8.9 mostra l'evoluzione temporale della potenza spettrale al canale di riferimento numero 1000 durante il mese di agosto 2024. Questo periodo comprende l'inizio dell'attività di iniezione, avvenuto il 4 agosto 2024. L'energia è concentrata principalmente nella banda compresa fra 50 e 200 Hz; in particolare, notiamo un picco spettrale che compare subito dopo l'inizio dell'iniezione a frequenza di circa 170 Hz e che perdura per circa 2 settimane. Un'altra caratteristica è costituita da un ampio picco spettrale che, all'inizio delle attività di iniezione, è centrato sulla frequenza di circa 150 Hz, la cui frequenza caratteristica diminuisce progressivamente verso l'intervallo 70-100 Hz alla fine del mese di agosto.

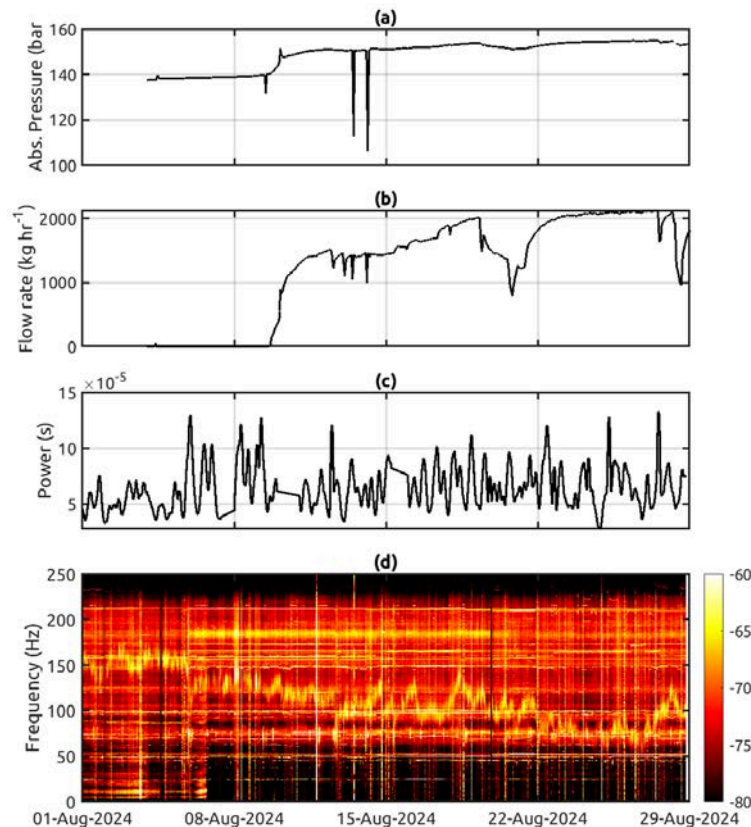


Figura 8.9 - evoluzione temporale della densità di Potenza spettrale del segnale DAS comparata con i parametri di iniezione. (a) Pressione assoluta di iniezione (b) portata oraria (c) potenza del segnale di deformazione integrato su tutta la banda di frequenza utile; (d) rappresentazione tempo-frequenza (spettrogramma) del segnale DAS al canale di riferimento numero 1000.

Un'ulteriore osservazione in merito alle rappresentazioni della potenza spettrale in funzione del tempo e della frequenza riguarda l'assenza, a frequenze maggiori di 1 Hz, di quelle ciclicità a periodo giornaliero e settimanale che invece caratterizzano il rumore sismico ambientale nelle registrazioni in terraferma. Questo può naturalmente essere interpretato con la diversità dei ritmi del lavoro e di operatività dei macchinari in piattaforma piuttosto che in terraferma.

Infine, una caratteristica molto evidente è data da dei picchi spettrali a bassa frequenza, compresi nell'intervallo [5 - 20]Hz, che scompaiono progressivamente con il progredire delle attività di iniezione. Questa caratteristica è meglio descritta nelle mappe spettrali $P(f,z)$ della Figura 8.11. Precedentemente all'inizio dell'attività iniettiva le porzioni più distanti della fibra (profondità maggiori di 2.000 metri) sono interessate da tre picchi spettrali a frequenze comprese fra 5 e 15 Hz, e da un livello di rumore bianco ad una distanza di poco inferiore ai 2000 m. Con l'inizio delle operazioni di iniezione, questi picchi diminuiscono di ampiezza ed interessano progressivamente zone più profonde, fino a scomparire totalmente dopo circa una settimana dall'inizio dell'iniezione.

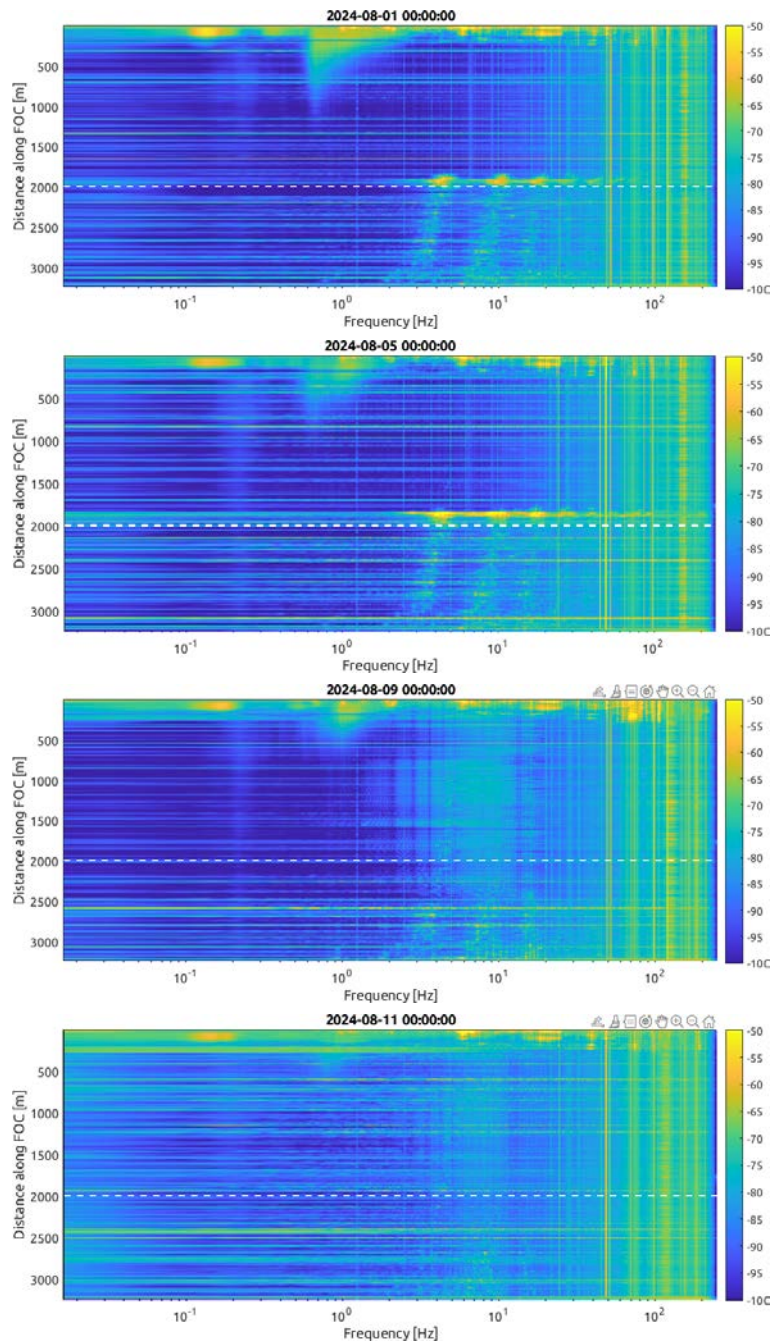


Figura 8.10 - Densità di Potenza spettrale in funzione della distanza lungo la fibra e della frequenza per diversi periodi all'interno di un intervallo di 10 giorni che comprende l'inizio delle attività di iniezione. Nelle prime due immagini sono ben visibili, nelle porzioni più profonde del cavo, dei picchi spettrali a frequenze comprese fra 2 e 15 Hz, la cui ampiezza diminuisce progressivamente con il progredire delle attività di iniezione.

Questa considerazione emerge chiaramente anche dalla Figura 8.11 dove la potenza spettrale integrata sulla banda 5 - 15 Hertz è rappresentata in funzione del tempo e della profondità. Come si può notare, il processo di iniezione è accompagnato da un progressivo assottigliamento di una zona ad alto rumore sismico associata alle parti più profonde del pozzo di iniezione.

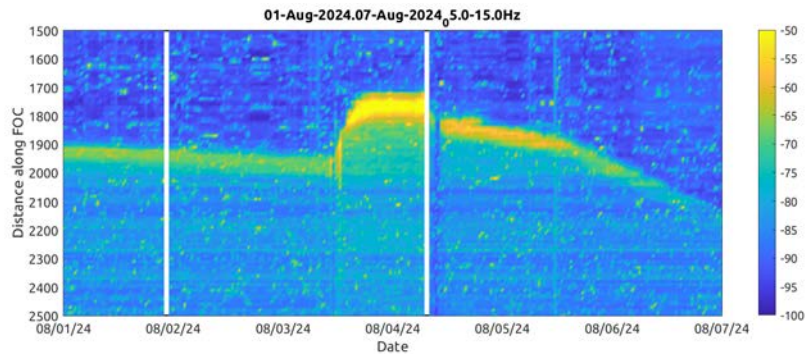


Figura 8.11 Densità di Potenza spettrale in funzione della distanza lungo la fibra e del tempo. Le singole PSD sono integrate sulla banda 5 - 15 Hz. La scala dei colori rappresenta la potenza spettrale espressa in decibels (dB).

Una possibile spiegazione di questo fenomeno è data dal graduale cambiamento delle proprietà acustiche dei fluidi contenuti nel tubino di iniezione. Con l'aumentare della pressione, densità e velocità del suono nel fluido aumentano, portando di conseguenza ad una diminuzione del contrasto di impedenza con il mezzo roccioso circostante. Questo potrebbe causare una diminuzione di efficacia di possibili fenomeni di intrappolamento di energia elastica all'interno del pozzo, e quindi un decremento del rumore sismico associato.

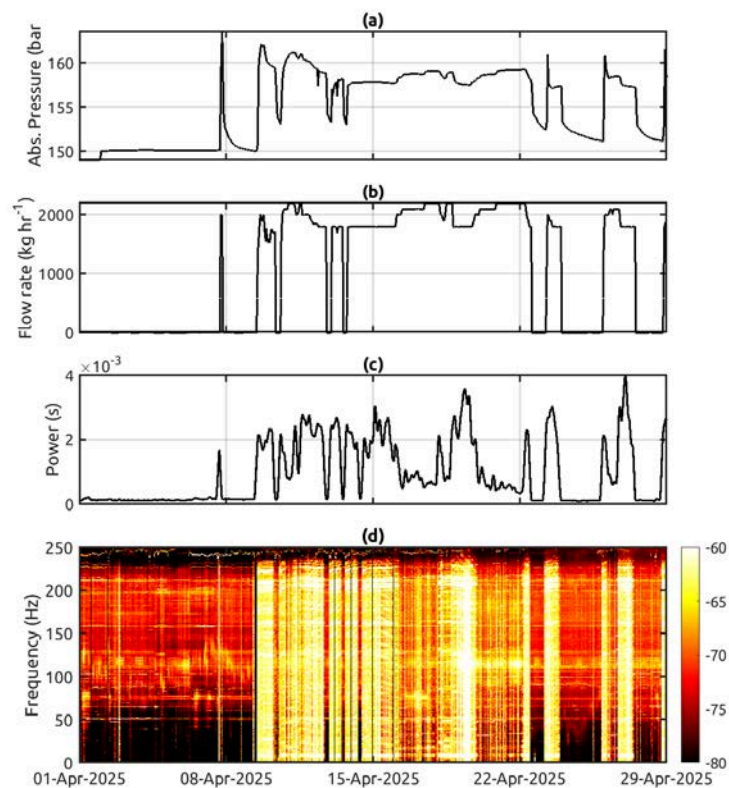


Figura 8.12 - Lo stesso che nella Figura 8.9, ma per un intervallo mensile che include la ripresa delle attività di iniezione.

L'esame di un periodo di ripresa dell'iniezione (Aprile 2025) porta ad una figura completamente differente. In questo caso, l'attività iniettiva è accompagnata da un marcato aumento del rumore di fondo, che si estende su tutta la banda di frequenze misurata. La sincronia tra rumore sismico e pressione di iniezione lascia intendere che tale rumore è direttamente relazionato con le vibrazioni del compressore che, come successivamente indicato dal Concessionario, era posizionato a bordo piattaforma. Risulta evidente come in tale situazione il dato non sia più utilizzabile, risultando completamente obliterato dalle vibrazioni dei macchinari in azione.

8.4 Rapporti segnale-rumore

In questa sezione analizziamo il rapporto segnale rumore lungo i canali della fibra per segnali transienti di origine sia naturale (terremoti) che artificiale (esplosione controllata di un ordigno bellico). Queste procedure hanno un duplice obiettivo. Il primo, individuare quali sono le porzioni della fibra con la minore rumorosità: questa determinazione è propedeutica all'implementazione di sistemi automatici per la discriminazione di eventi transienti. Il secondo obiettivo è quello di determinare l'effettiva sensibilità della fibra, ovvero la magnitudo minima discriminabile dal sistema per la micro-sismicità locale. Per l'analisi dei rapporti segnale-rumore abbiamo utilizzato alcuni terremoti registrati a distanza locale con magnitudo comprese tra 1 e 3 ed un esplosione controllata di un ordigno bellico nell'Adriatico. I parametri di questi eventi sono riportati nella tabella. Per ogni evento l'analisi ha seguito il seguente workflow:

1. Filtraggio nella banda 1 - 200 Hertz e filtraggio nel dominio frequenza-numero d'onda per rimuovere i segnali a numero d'onda uguale a zero, ovvero che si propagano a velocità infinita;
2. Identificazione manuale dei tempi di arrivo delle onde di volume P ed S ad un certo numero di canali rappresentativi; ai restanti canali la stima dei tempi di arrivo è stata effettuata interpolando linearmente i tempi identificati precedentemente;
3. Identificazione delle finestre di segnale e del rumore. Le finestre del segnale sono definite come un intervallo di 2 secondi successivo ai tempi di arrivo (P, S) stimati come descritto al punto precedente. La finestra del rumore ha la medesima lunghezza di quella del segnale, ed inizia 4 secondi prima del tempo di arrivo P (vedi Figura 8.14 e seguenti);
4. Calcolo degli spettri di Fourier per le finestre di segnale e del rumore;
5. Calcolo SNR nel dominio della frequenza, come rapporto tra gli spettri di ampiezza del segnale e del rumore, separatamente per le onde P ed S;
6. Calcolo SNR nel dominio del tempo, tramite la relazione:

$$\text{SNR} = \sigma_{\text{sig}} / \sigma_{\text{noise}} \quad (8.3)$$

dove σ è la deviazione standard delle registrazioni calcolata sugli intervalli di tempo definiti precedentemente.

OT	Lat(°)	Lon(°)	Depth (km)	ML	Dist (km)	ID e link evento
2024-11-28T14:10:21.39	44.6868	12.6265	0.1	2.1	28.25	40946591
2025-05-26T08:38:31.06	44.4588	11.9603	10.0	2.2	34.76	42824712
2025-05-30T14:07:32.50	44.2192	12.1377	9.6	2.6	38.41	42280561
2025-06-03T05:14:10.85	44.5517	12.6152	35.4	2.6	40.58	42909392
2025-06-25T21:32:23.92	44.3328	12.4417	18.4	1.3	27.36	43231552
2025-08-05T02:15:04.48	44.3417	12.6958	5.7	1.8	32.18	43630852

Tabella 8.2 - eventi sismici utilizzati per la valutazione del rapporto segnale rumore e conseguente confronto con i dati del sismometro posizionato a testa pozzo (stazione PCWC). l'identificativo dell'evento si riferisce al codice utilizzato nel bollettino sismico INGV, consultabile all'indirizzo <https://terremoti.ingv.it>

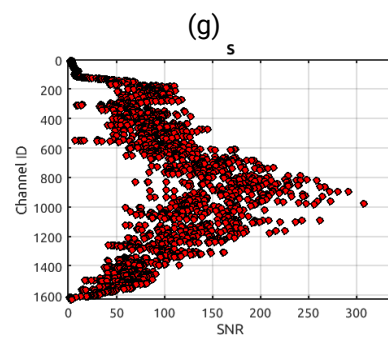
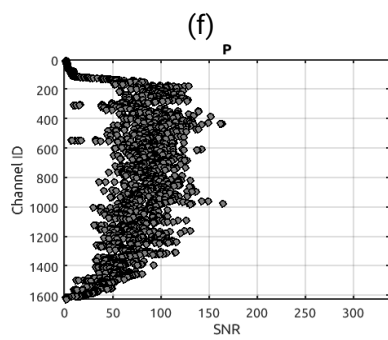
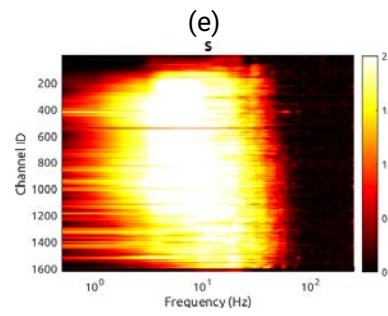
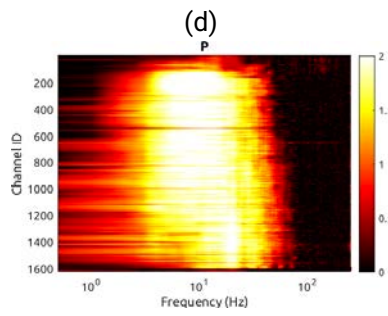
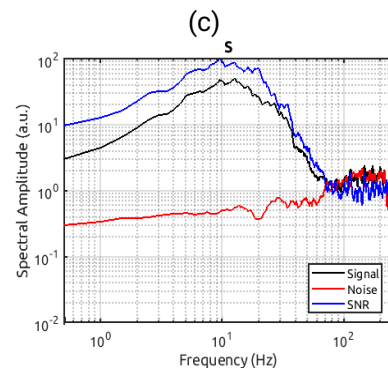
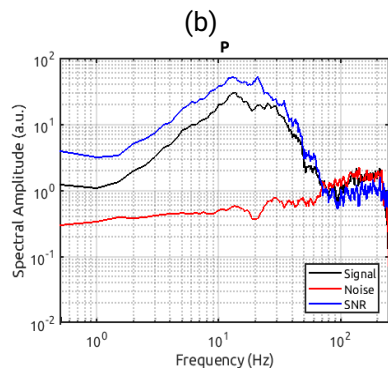
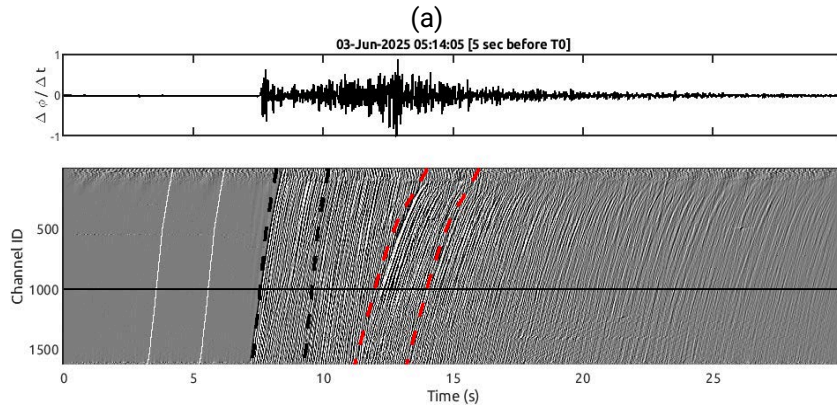


Figura 8.13 - Studio del rapporto segnale rumore per un terremoto locale (ID [42909392](#)) . (a) composizione delle registrazioni di deformazione dinamica misurata a tutti i canali della fibra. La traccia in alto è relativa al canale numero 1000, scelto come canale di riferimento. Nella mappa a toni di grigio le linee tratteggiate nere e rosse identificano le finestre di segnale per le onde P ed S, rispettivamente; le due linee sottili bianche identificano invece la finestra del rumore. La linea nera continua corrisponde al canale di riferimento. (b,c) Densità di ampiezza spettrale per le onde P,S e per l'intervallo di rumore, misurate al canale di riferimento. Il rapporto tra gli spettri del segnale e quello del rumore definisce l'SNR in funzione della frequenza. (d,e) Rapporti spettrali segnale-rumore in funzione della frequenza e della posizione lungo la fibra, sia per le onde P che per le onde S. I colori indicano il logaritmo del SNR, secondo la scala di colori alla destra. (f,g) Rapporti segnale rumore nel dominio del tempo ottenuti secondo l'equazione 8.3 nel testo.

	Sismometro (PCWC, comp. Z)				DAS (ch 800-1200)			
	Tempo		Frequenza (2-20 Hz)		Tempo		Frequenza (2-20 Hz)	
Tempo Origine (UTC)	P	S	P	S	P	S	P	S
28-Nov-2024 14:10:21	4.79	2.38	3.83	1.52	27.29	15.65	21.30	10.29
26-May-2025 08:38:31	1.43	2.17	1.40	1.18	0.57	3.21	0.68	3.19
30-May-2025 14:07:32	0.97	1.07	0.97	1.91	26.01	53.59	48.81	56.84
03-Jun-2025 05:14:10	3.86	3.81	6.15	3.30	80.30	153.01	76.83	137.85
25-Jun-2025 21:32:23	0.81	0.93	0.85	0.88	2.48	8.15	2.35	8.09
5-Aug-2025 02:15:04	0.99	0.91	1.03	1.18	10.22	9.52	11.62	10.06

Tabella 8.3 - Sintesi dei risultati dello studio sul rapporto segnale rumore sia nel dominio del tempo che della frequenza. I valori relativi al sistema DAS sono stati ottenuti dalla media sui canali 800-1200; per l'SNR nel dominio della frequenza si è considerato il valore medio calcolato nella banda 2-20 Hz.

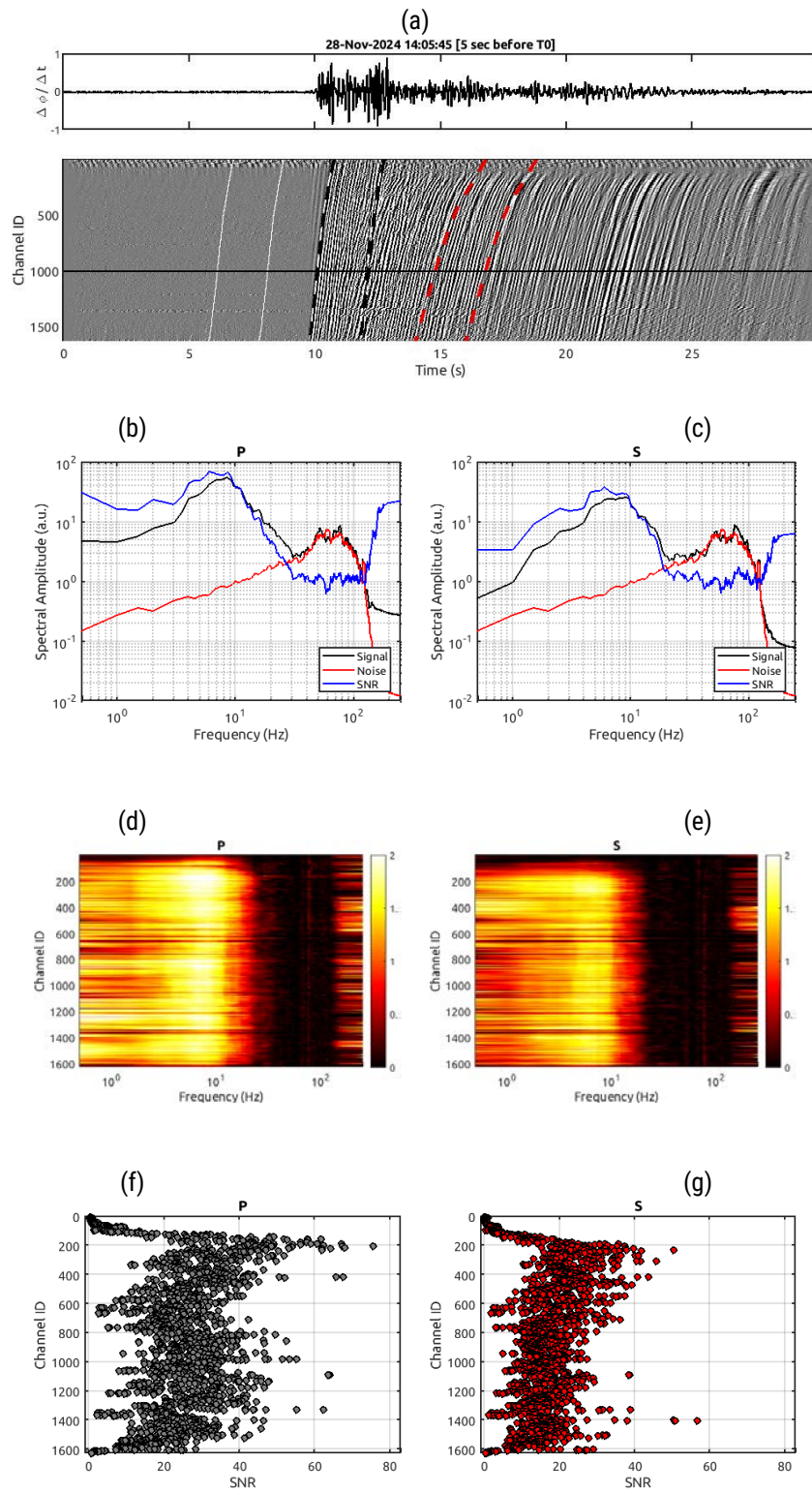


Figura 8.14 - Come in Figura 8.13, ma per l'esplosione controllata con ID 42909392.

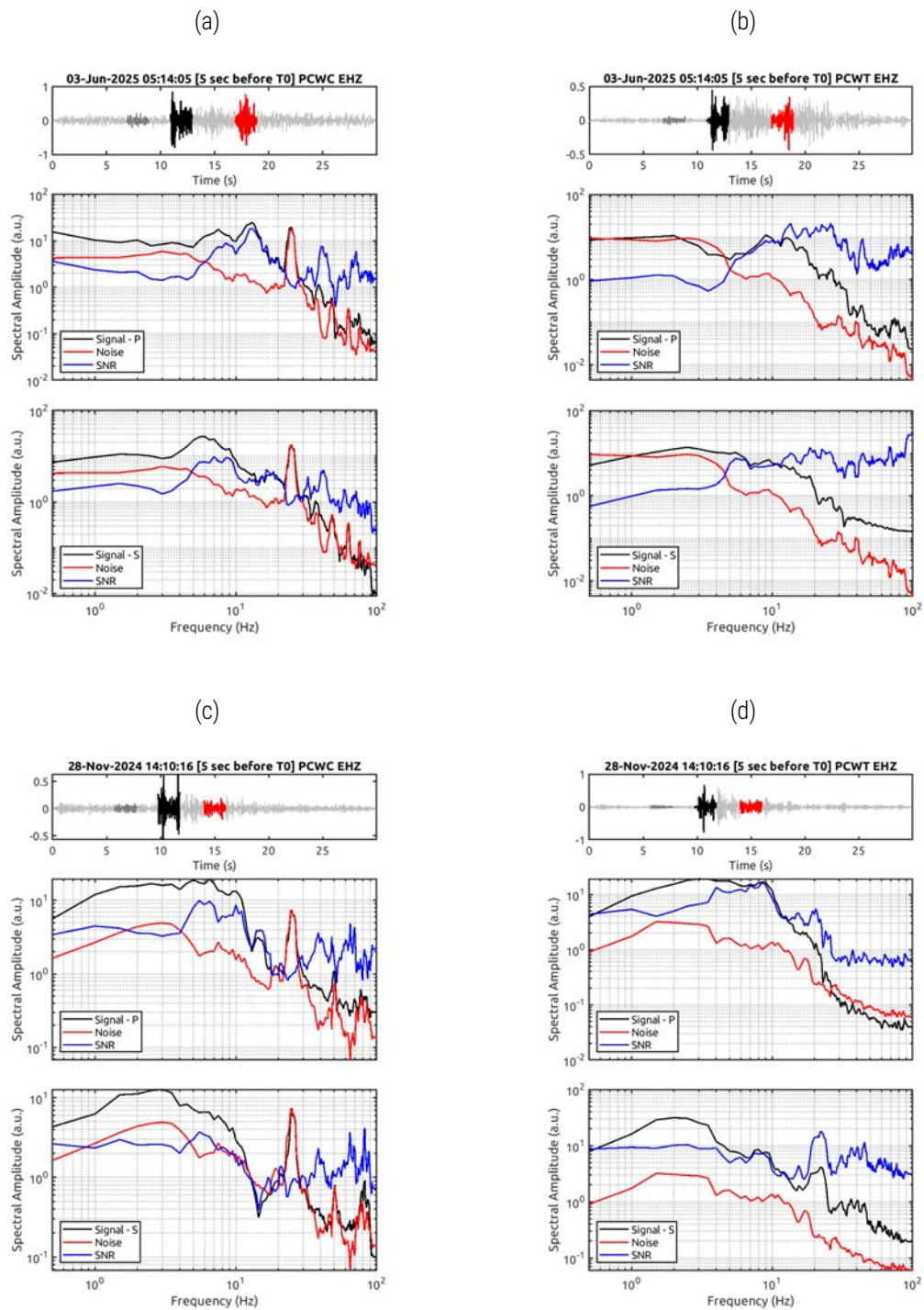


Figura 8.15 - Valutazione del rapporto segnale rumore nel dominio del tempo e della frequenza alle due stazioni sismiche più vicine al pozzo di iniezione, per il terremoto locale (a,b) e l'esplosione controllata (c,d) mostrati nelle Figure 8.13 e 8.14, rispettivamente.

8.5 Valutazione delle prestazioni per la localizzazione

Nella localizzazione di eventi sismici, uno degli elementi che condizionano maggiormente le prestazioni di un sistema di monitoraggio è la copertura azimutale dell'area epicentrale. Questa proprietà può essere valutata a priori calcolando, per una data area sorgente e geometria della rete, la precisione nella procedura di localizzazione basata sull'inversione dei tempi di tragitto delle onde di volume.

Si è considerato il piano verticale (xz) contenente il pozzo di iniezione. Scelta una sorgente sintetica giacente su questo piano, vengono quindi calcolati i tempi di tragitto delle onde P a una selezione di canali DAS, nell'assunzione di terra omogenea ed isotropa (e quindi, a velocità sismica costante). Si sono utilizzate le sole onde P in quanto, per piccole distanze ipocentrali, la differenza nei tempi di arrivo P ed S è comparabile all'errore nella stima dei tempi di arrivo medesimi; pertanto, l'aggiunta delle fasi S nella procedura di localizzazione non porta a miglioramenti significativi.

I tempi di tragitto sintetici sono poi contaminati con un rumore tratto da una distribuzione Gaussiana con deviazione standard di 0.02s. L'inversione di questi tempi di arrivo sintetici è condotta mediante ricerca su una griglia regolare di nodi equispaziati di 25 metri. Per ogni nodo della griglia, viene calcolata la differenza tra i tempi di arrivo osservati e quelli predetti per quella determinata sorgente. Il nodo della griglia in cui la norma L1 di tale differenza assume valore minimo corrisponde alla miglior stima delle coordinate ipocentrali (Aster et al., 2012)

Questa procedura viene iterata un gran numero (2000) di volte, cambiando per ciascuna iterazione il rumore che contamina i tempi di tragitto. L'insieme delle localizzazioni ottenute durante tutte le iterazioni consente quindi una visione esaustiva della capacità risolutiva con cui il sistema riesce a localizzare sorgenti posizionate in diverse regioni del piano (xz), ed una valutazione realistica dell'errore (Moser et al., 1992).

Un esempio dei risultati di questa procedura è riportato nella Figura 8.16, per diverse posizioni della sorgente sintetica; le nuvole di punti mostrano l'insieme delle localizzazioni appartenenti alla regione di confidenza del 95%. Si osserva come le incertezze siano nell'ordine del migliaio di metri, una quantità abbastanza rilevante considerando la scala del problema. Inoltre, in alcuni casi (pannelli c,d) vi sono due possibili set di soluzioni, come conseguenza della geometria quasi lineare della fibra. In altre parole vi sono distinte aree epicentrali cui sono associati tempi di arrivo molto simili ai vari canali DAS, creando quindi un'ambiguità nella soluzione ipocentrale. Sempre come conseguenza della geometria di acquisizione, la risoluzione è minore lungo la direzione coassiale con il principale allungamento del cavo.

In conclusione, se viene utilizzata una procedura di localizzazione basata sull'inversione dei tempi di primo arrivo, per molte aree sorgente vi possono essere scarsa risoluzione e/o non unicità delle soluzioni; per questi aspetti, un significativo miglioramento potrebbe essere raggiunto con l'installazione di un'altra DAS in un secondo pozzo.

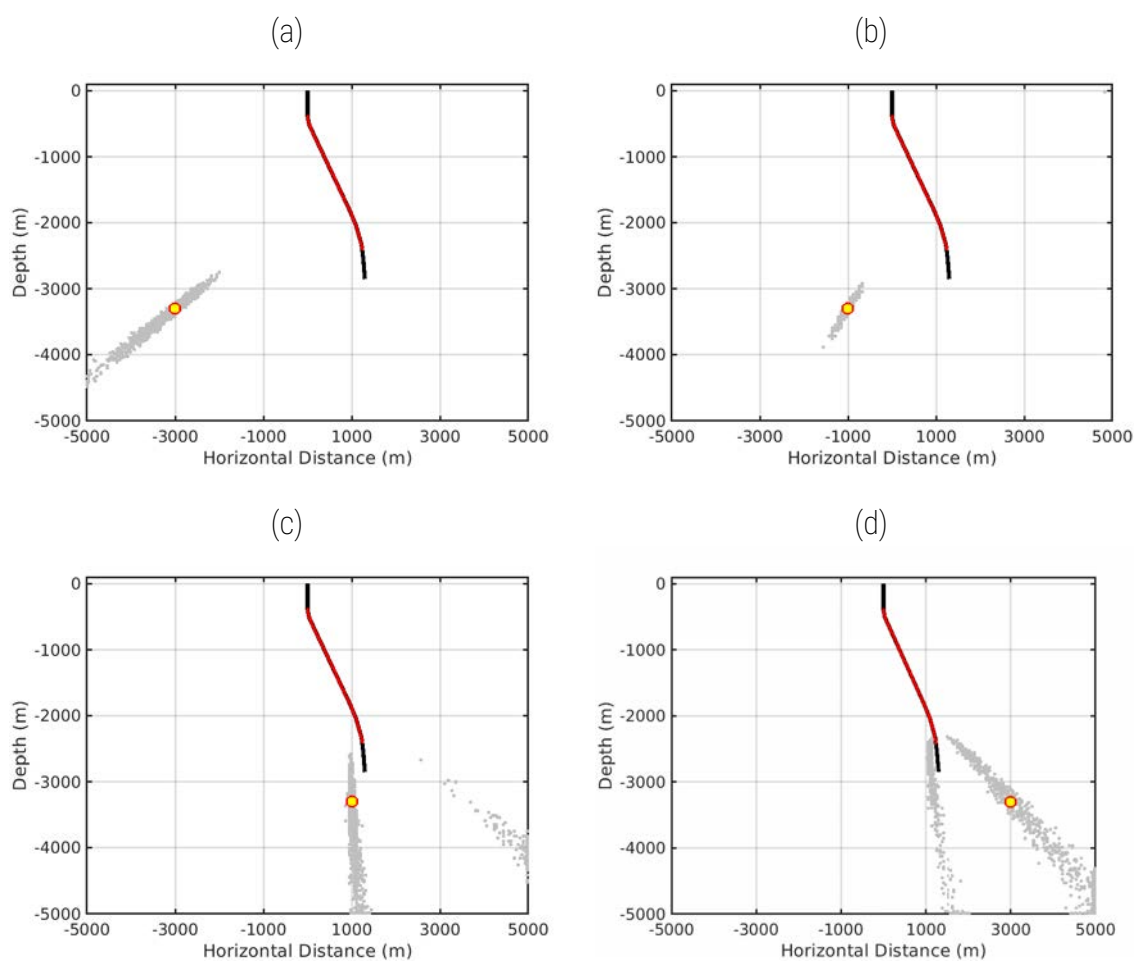


Figura 8.16 Risultati della localizzazione di sorgenti sintetiche posizionate in vari punti del piano Verticale contenente il pozzo di iniezione, la cui geometria è schematizzata dalla linea nera. Il cerchietto giallo indica la posizione della sorgente sintetica, ed i punti rossi individuano i canali utilizzati per la procedura di localizzazione. Le nuvole di punti grigi rappresentano le localizzazioni ottenute nelle 2000 iterazioni, in ciascuna delle quali i tempi di arrivo teorici sono stati contaminati con un rumore Gaussiano.

8.6 Osservazioni conclusive

Per quanto preliminari, le analisi dei segnali di deformazione dinamica registrati dal sistema DAS illustrate in questo capitolo permettono di trarre alcune considerazioni e conseguenti raccomandazioni.

1. Il rumore che influenza i dati della fibra è riconducibile all'azione di diverse sorgenti, che sono: [i] naturali, quali il microsisma marino; [ii] artificiali, associate alle attività di iniezione; [iii] elettroniche, legate alla catena di acquisizione. Questi disturbi presentano una complessa distribuzione spettrale, ed una marcata variabilità sia temporale che spaziale. Ciò rende difficoltoso la predisposizione di un unico *workflow* per il pre-condizionamento dei segnali.

2. Comparati con il segnale del sismometro, i dati di deformazione dinamica presentano un rapporto segnale-rumore che può essere superiore anche di 40-50 volte, lasciando prevedere quindi un sensibile miglioramento nella capacità di detezione di eventi microsismici, particolarmente quelli situati in prossimità del pozzo iniettore. Queste prestazioni possono essere ulteriormente migliorate adottando delle procedure di *stacking* delle forme d'onda registrate da canali adiacenti, sfruttando la ridondanza di campionamento spaziale offerta dalla fibra.
3. È senz'altro auspicabile che uno o più sistemi DAS entrino a far parte del sistema di monitoraggio in tempo reale. Questo tuttavia implica una complessità legata alla trasmissione e gestione dell'enorme mole di dati. Una possibile soluzione è data quindi dal sottocampionamento spaziale e temporale che potrebbe essere effettuato *in situ*, in maniera tale da ridurre significativamente la quantità di informazioni da trasmettere ad un centro di analisi remoto. Una volta identificata e consolidata la catena di elaborazione più efficace, è anche possibile ipotizzare l'implementazione di un sistema di analisi locale, da interrogarsi periodicamente per l'estrazione di pochi parametri significativi.
4. In questa prima sperimentazione la continuità del dato è stata sicuramente di ottimo livello (maggiore del 97%); aspetti su cui concentrare l'attenzione riguardano:
 - a. la sincronizzazione dei segnali: durante i primi mesi di operatività, i segnali DAS non risultano sincronizzati al tempo universale, come emerge ad esempio dalle Ffigg. 8.14a e 8.15c, in cui il tempo DAS risulta anticipato di circa 4'30" rispetto a quanto riportato dalla stazione PCWC;
 - b. l'influenza di rumori antropici, quali ad esempio quelli dovuti al posizionamento su piattaforma del compressore.

9 Analisi di dati di pressione e portata

I paragrafi che seguono intendono presentare i dati ricevuti dal Concessionario e mostrare i risultati delle analisi effettuati dalla SPM, con particolare attenzione agli andamenti nel tempo della pressione e della portata in relazione ai limiti di soglia indicati dai documenti ministeriali. Infatti, il progetto di svolgimento del programma sperimentale "CCS Ravenna fase 1" veniva autorizzato con il Decreto Ministeriale 26 gennaio 2023 ammettendo un volume di iniezione di 25.000 t/a. Lo stesso documento indicava il valore di 120 bar come limite massimo di pressione di poro a fondo pozzo (prescrizione n. 2). Questo valore è stato successivamente modificato, come riportato nel punto 8 dell'Accordo Quadro: *"si prende atto della modifica della prescrizione n. 2 del parere del Comitato ETS ovvero "incremento da 120 bar a 240 bar del limite alla pressione a fondo pozzo nel livello PL2-C del campo Porto Corsini Mare Ovest (PCMW) [...] a condizione che il proponente: I) trasmetta a questa Amministrazione, con frequenza mensile e per tutta la durata del progetto, il profilo dell'andamento delle portate di CO₂ iniettata, nonché delle pressioni di giacimento e di fondo pozzo su base giornaliera; II) comunichi tempestivamente eventuali deviazioni rilevanti rispetto alle condizioni operative di progetto simulate"*.

9.1 Presentazione dei dati

I dati di pressione e portata si riferiscono alla fase 1 del progetto "Ravenna CCS", iniziata ad agosto 2024 e terminata a settembre 2025 (Report Eni, 2024). In questo periodo di attività, l'anidride carbonica è stata iniettata nel livello PL2-C del giacimento a gas esaurito di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW CCS), ad una profondità di circa 3000 m sotto al livello marino (Comunicato Eni-Snam, 2024).

Il Concessionario ha fornito le misure orarie di portata e pressione (misure di fondo pozzo) per il periodo compreso tra il 4/8/2024 e il 29/9/2025, e il valore cumulativo giornaliero di gas iniettato per il periodo 2/4/2025 - 29/9/2025 (Figura 9.1). Il Concessionario ha inoltre comunicato che in data 31/8/2025 è stato fermato l'impianto di cattura ed iniezione di CO₂.

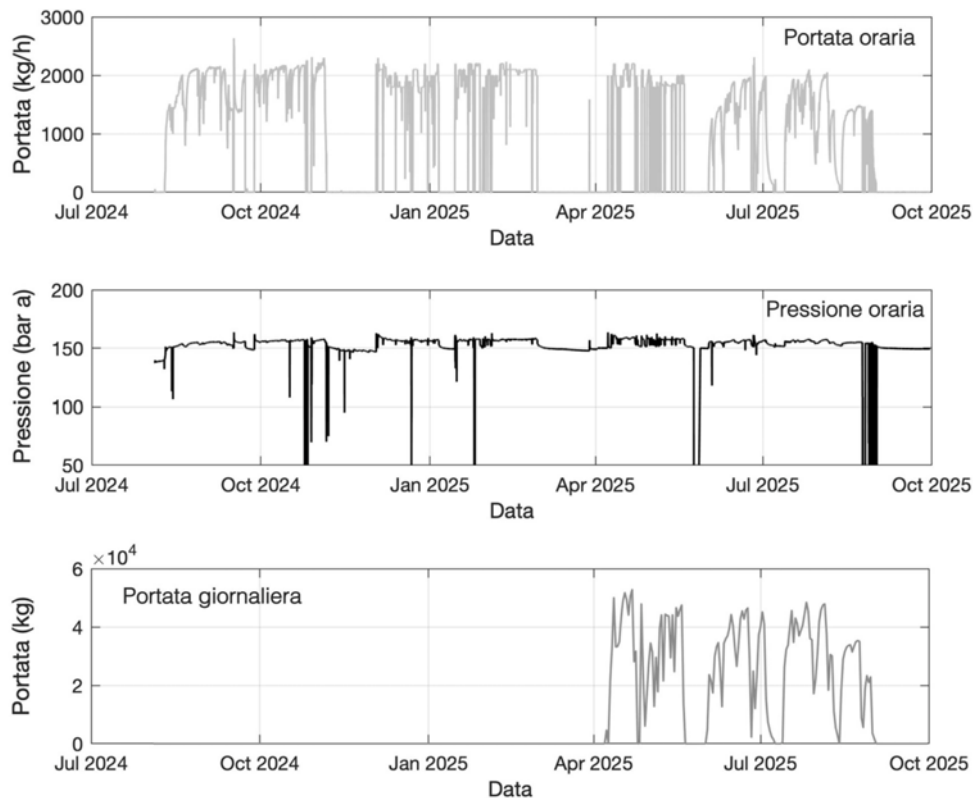


Figura 9.1: Dati di portata di iniezione e di pressione di fondo pozzo riferiti al pozzo iniettore del campo a gas esaurito PCMW CCS durante la fase 1 di iniezione. Le linee grigia e nera rappresentano rispettivamente la portata e la pressione. La pressione è espressa in bar assoluti.

9.2 Analisi e risultati

Per analizzare gli andamenti della pressione e della portata durante le attività di iniezione della CO_2 è stato utilizzato l'indice di Spearman (e.g., Gibbons, 1985). Più i valori di questo coefficiente di correlazione si avvicinano ad 1, più i due andamenti crescono o decrescono insieme, anche non linearmente. Specificamente, sono state prima ricavate le medie giornaliere di portata e pressione a partire dai dati orari e, successivamente, tali valori sono stati normalizzati rispetto agli intervalli min-max delle serie (Figura 9.2). Come mostrato in Figura 9.2, l'intera fase di iniezione è stata suddivisa in tre periodi: iniziale, intermedio e finale.

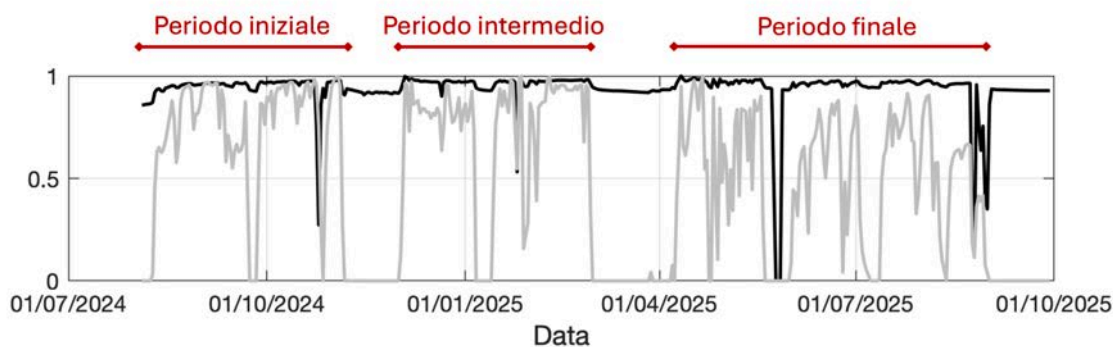


Figura 9.2: Media giornaliera normalizzata della portata (linea grigia) e della pressione di iniezione (linea nera) durante la fase 1 di iniezione. L'immagine mostra i periodi di analisi utilizzati per ricavare il coefficiente di Spearman (vedere il testo per ulteriori dettagli).

I risultati evidenziano che tra il periodo iniziale a quello finale il coefficiente di correlazione aumenta (Tabella 9.1), probabilmente in relazione ad una maggiore efficienza del sistema, cioè nel modo in cui la pressione di poro risponde alla variazione del volume di gas iniettato.

Periodo analizzato	Coefficiente di Spearman
Iniziale: 4/8/2024 - 8/11/2024	0.78
Intermedio: 1/12/2024 - 1/3/2025	0.91
Finale: 5/4/2025 - 2/9/2025	0.92

Tabella 9.1: Coefficiente di correlazione di Spearman applicato alle serie temporali della portata e della pressione in relazione ai periodi analizzati.

Per quanto riguarda le raccomandazioni e le prescrizioni ministeriali (cfr. Decreto Ministeriale del 26 gennaio 2023, e punti 4 e 8 dell'Accordo Quadro), non sono stati superati il volume di 25.000 tonnellate annue (Figura 9.3), e il limite massimo della pressione a fondo pozzo, fissato a 240 bar e riferito al top del livello PL2-C nel pozzo iniettore (cfr. Figura 9.1).

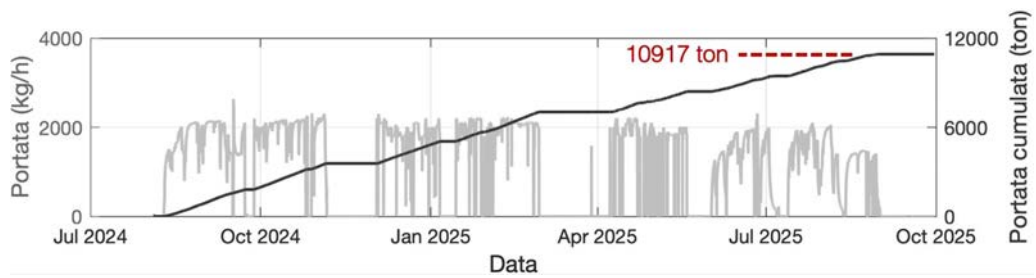


Figura 9.3: Andamento della portata giornaliera (linea grigio-chiara) durante la fase 1 di iniezione e relativa curva cumulativa (linea grigio-scura). In rosso è indicato il volume di iniezione totale raggiunto al termine della fase sperimentale.

Infine, ulteriori analisi orientate a quanto suggerito nel Cap. 2 del documento ILG, e cioè alla valutazione dell'evoluzione delle pressioni di poro nello spazio e nel tempo e alla comprensione di fenomeni di interferenza con i pozzi limitrofi (e.g., il pozzo spia), sono rimandate ad una fase successiva di attività. Questa fase si baserà su informazioni già trasmesse dal Concessionario e su ulteriori dati da fornire e da richiedere, e integrerà i dati geologici di sottosuolo con quelli di pressione, temperatura e chimismo dei fluidi.

10 Considerazioni conclusive

In questo capitolo vengono raccolte e integrate le principali conclusioni emerse nei capitoli precedenti. L'obiettivo è offrire una visione complessiva e coerente dei risultati ottenuti, mettendo in relazione i diversi aspetti affrontati durante le analisi del monitoraggio, fornendo una sintesi organica degli aspetti di maggior forza e di quelli critici del monitoraggio.

Monitoraggio sismico

- Per quanto riguarda la sismicità registrata dalla rete sismica integrata P1 (del Concessionario) e IV (RSN-INGV) sono stati registrati:
 - 10 eventi sismici nel periodo pre-iniezione (5 eventi nel Dominio Esteso, 5 eventi fuori dai domini),
 - 2 eventi sismici (fuori dai domini) e una detonazione nel periodo successivo all'inizio delle attività di iniezione
 - 3 eventi sismici nel periodo che va dal 18 Aprile al 18 ottobre (2 eventi nel DE, 1 evento fuori dai domini)

Da questa analisi si osserva che, durante il periodo di monitoraggio e nel periodo pregresso, non vi è stato nessun evento sismico localizzato all'interno del DI. Dato il basso numero di eventi localizzati, non è possibile apprezzare nessuna variazione nel tasso di sismicità nel tempo.

- Per quanto riguarda invece le caratteristiche della rete sismica, integrata con le stazioni della RSN-INGV, la magnitudo minima degli eventi per i quali è possibile ottenere una stima affidabile della magnitudo varia negli intervalli $1.6 \leq M_w \leq 2.2$ nel DI e $1.9 \leq M_w \leq 2.3$ nel DE, che equivalgono a soglie di $0.7 \leq M_L \leq 1.6$ nel DI e di $1.2 \leq M_L \leq 1.7$ nel DE, seguendo la relazione di Munafò et al. (2016).
- L'elevato livello di rumore di fondo a ciascuna stazione della rete causa difficoltà sistematiche nel calcolo della Magnitudo locale M_{Lbj} , utilizzata come parametro di confronto tra i bollettini del Concessionario e quelli della SPM-INGV. Per la maggior parte degli eventi avvenuti durante il periodo di monitoraggio è stata calcolata la magnitudo locale M_L (Magnitudo Richter standard), con limitate possibilità di definire le incertezze associate.
- In relazione ai punti 5.3.b-c degli ILG, dalle informazioni relative all'equipaggiamento e al settaggio della strumentazione, le stazioni della rete del Concessionario sono equipaggiate con sensori a corto periodo e non vi è la presenza di nessun sensore a larga banda o a corto periodo con banda estesa. I sensori in pozzo risultano essere campionati entrambi a 200 Hz piuttosto che a 250 Hz, come invece previsto dagli ILG. Tuttavia, dati gli elevati livelli di rumore naturale e antropico che caratterizzano l'area, la maggiore frequenza di campionamento del segnale non comporterebbe sostanziali miglioramenti nella determinazioni delle ampiezze. Sempre considerando i livelli di rumore, l'utilizzo dei sensori con banda estesa sarebbe comunque limitatissimo per

tutte le stazioni off-shore, mentre potrebbe essere di qualche limitata utilità per le stazioni on-shore (ANGE, PCTE e SPIO, Figura A.1).

Monitoraggio delle deformazioni del suolo

- Dall'analisi eseguita per la validazione della rete geodetica GNSS si osserva che la rete di monitoraggio risponde alla maggior parte dei requisiti richiesti dagli ILG in termini di copertura areale dei domini, di qualità della strumentazione utilizzata e stabilità dei siti, rispettando anche le indicazioni fornite nella prescrizione n.7 dal Comitato ETS. L'unica condizione mancante richiesta dagli ILG è la presenza di una stazione GNSS co-locata con una stazione sismica a banda larga, il cui impiego, alla luce delle considerazioni relative al rumore sismico di fondo sopra descritte, sarebbe comunque molto limitato alle frequenze più basse.
- Dall'elaborazione dei dati GNSS è stato possibile verificare che, per le stazioni con un lungo periodo di acquisizione, le misure di spostamento mostrano andamenti che non si discostano molto dal campo di deformazione atteso per l'area di monitoraggio, validando la bontà degli strumenti di monitoraggio. Per le stazioni di nuova installazione invece non è possibile validarne la stabilità e l'affidabilità delle misure perché l'intervallo di acquisizione è ancora troppo breve.
- Risulta importante tenere presente che l'area di monitoraggio del campo di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW CCS) è comunque circondata da altre concessioni di coltivazione idrocarburi tuttora attive e le serie temporali di spostamento di alcune stazioni GNSS (come ANGA e FIUN) potrebbero essere influenzate da questi processi. Nei prossimi report sarà pertanto necessario eseguire delle specifiche analisi per le serie temporali di spostamento in modo da minimizzare queste influenze e massimizzare allo stesso tempo l'osservazione degli spostamenti prevalentemente legati al campo di PCMW CCS.
- L'analisi delle deformazioni del suolo tramite tecniche InSAR, applicate ai dati radar di tre diversi sensori in entrambe le geometrie di acquisizione ascendente e discendente, mostra valori di subsidenza del suolo generalmente bassi, entro i 3 mm/anno, che localmente possono arrivare a valori entro i 10 mm/anno. Raramente vengono superati valori di 10 mm/anno se non nel settore compreso tra Ravenna e Marina di Ravenna. Le subsidenze misurate con valori compresi tra 3 e 10 mm/anno mostrano una estensione spaziale molto limitata nell'area del DE, probabilmente attribuibile a fenomeni estremamente locali. Questi risultati sono generalmente in accordo con le misure ottenute tramite le elaborazioni GNSS, nonostante i periodi di acquisizione dei dati non siano esattamente coincidenti.

Monitoraggio DAS

- Il segnale DAS è affetto da rumori riconducibili all'azione di diverse sorgenti, che sono: [i] naturali, quali il microsisma marino; [ii] artificiali, associate alle attività di iniezione;

[iii] elettroniche, legate intrinsecamente alla strumentazione. Questi disturbi presentano una complessa distribuzione spettrale e una marcata variabilità sia temporale che spaziale, rendendo difficoltosa la predisposizione di un unico *workflow* per il pre-condizionamento dei segnali.

- Comparati con il segnale del sismometro, i dati di deformazione dinamica presentano un rapporto segnale-rumore che può essere superiore anche di 40-50 volte, lasciando prevedere quindi un sensibile miglioramento (almeno 1 unità di magnitudo) nella capacità di detezione di eventi microsismici. Queste prestazioni possono essere ulteriormente migliorate adottando delle procedure di *stacking* delle forme d'onda registrate da canali adiacenti, sfruttando la ridondanza di campionamento spaziale offerta dalla fibra.
- È senz'altro auspicabile che uno o più sistemi DAS entrino a far parte del sistema di monitoraggio in tempo reale. Questo tuttavia implica una complessità legata alla trasmissione e gestione dell'enorme mole di dati. Una possibile soluzione è data quindi dal sottocampionamento spaziale e temporale che potrebbe essere effettuato in situ, in maniera tale da ridurre significativamente la quantità di informazioni da trasmettere ad un centro di analisi remoto. Una volta identificata e consolidata la catena di elaborazione più efficace, è anche possibile ipotizzare l'implementazione di un sistema di analisi locale, da interrogarsi periodicamente per l'estrazione di pochi parametri significativi.
- In questa prima sperimentazione la continuità del dato è stata sicuramente di ottimo livello (maggiore del 97%); aspetti su cui concentrare l'attenzione riguardano la sincronizzazione dei segnali, di cui abbiamo verificato alcune criticità, e l'influenza di rumori antropici quali quelli dovuti al posizionamento su piattaforma del compressore.

Monitoraggio delle pressioni di poro

- Per quanto riguarda le pressioni di poro, i dati di pressione e portata forniti dal Concessionario si riferiscono al periodo che va dal 4/8/2024 al 29/9/2025. L'anidride carbonica è stata iniettata a circa 3000 m di profondità, all'interno del livello PL2-C del campo a gas esaurito PCMW CCS. In questa fase iniziale del progetto, si osserva che la portata di iniezione è sempre al di sotto del valore di 25.000 tonnellate annue e che la pressione di poro di fondo pozzo nel pozzo iniettore non supera mai il limite prescritto di 240 bar.

Glossario

AQ:	Accordo Quadro
CMS:	Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo
DAS:	<i>Distributed Acoustic Sensing</i>
DE:	Dominio Esteso
DI:	Dominio Interno
ETS:	<i>Emission Trading System</i>
GNSS:	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS:	<i>Global Positioning System</i>
GR:	Gutenberg Richter
IGS:	<i>International GNSS Service</i>
ILG:	Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità delle Deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche
InSAR:	<i>Interferometric SAR</i>
INGV:	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
IPTA:	<i>Interferometric Point Target Analysis</i>
IV:	Sigla rete (NW-Code) RSN (INGV)
MASE:	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
MISE:	Ministero dello Sviluppo Economico
MiTE:	Ministero della Transizione Ecologica
ML:	Magnitudo Locale
MLbj:	Magnitudo Locale Bakun and Joyner
MLhb:	Magnitudo Locale Hutton and Boore
NRMS:	Normalized Root Mean Square
P1:	Porto Corsini seismic network
PCMW CCS:	Campo di Porto Corsini Mare Ovest
PGA:	<i>Peak Ground Acceleration</i>
PGV:	<i>Peak Ground Velocity</i>
PPAF:	<i>Po-Plain Adriatic Foredeep</i>
PPSD:	<i>Probability Power Spectral Density</i>
REM:	Regione Emilia-Romagna
RSN:	Rete Sismica Nazionale (INGV)
SNR:	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SAR:	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SPM:	Struttura Preposta al Monitoraggio
THP:	<i>Tubing Head Pressure</i> - pressione a testa pozzo
TLS:	<i>Traffic Light System</i> - sistema a semaforo
WRMS:	<i>Weighted Root Mean Square</i>

Appendice A - Sismicità e rete sismica

Cat.	Data	Zona	lo	Lat	Lon	M
PFG	1479-10-15	RAVENNA N.E.	6	44.5	12.25	4.1
CPTI	1561	RAVENNA	5	44.417	12.167	3.6*
CPTI	1895-03-24	COMACCHIO	3	44.7	12.183	2.5*
CPTI	1895-07-03	COMACCHIO	6	44.7	12.183	4.1*
CPTI	1895-07-30	COMACCHIO	4	44.7	12.183	3.1*
PFG	1897-03-15	COMACCHIO	4	44.7	12.183	2.5
CPTI	1929-10-19	S.PIETRO	4	44.3	12.2	3.1*
PFG	1936-02-13	RAVENNA N.E.	4	44.417	12.25	3.1
PFG	1947-04-19	S.PIETRO	4	44.3	12.2	2.5
PFG	1964-09-05	FOCE DEL RENO	4	44.6	12.3	0
PFG	1966-06-27	RAVENNA S.E.	4	44.4	12.3	0
PFG	1974-11-03	RAVENNA S.O.	4	44.4	12.2	3.6
PFG	1977-05-25	RAVENNA N.E.	4	44.467	12.267	0
CPTI	1978-06-11	RAVENNA N.O.	4	44.467	12.1	0*
PFG	1980-04-19	FILETTO	4	44.317	12.05	0

Tabella A.1: Elenco dei 15 terremoti storici localizzati entro l'area di interesse secondo i cataloghi PFG o CPTI (la fonte è indicata nella prima colonna di sinistra). La magnitudo è espressa come magnitudo macrosismica (Mm), ad eccezione dei quattro eventi inclusi nel CPTI per i quali viene riportata la magnitudo momento (Mw, valori contrassegnati da un asterisco).

Data e Ora (Italia)	M	Zona	Z (Km)	Lat	Lon
1985-08-15 04:07:54	Md 3.1	7 km SW Lagosanto (FE)	10	44.722	12.081
1985-12-21 07:41:30	Md 3.1	8 km SW Comacchio (FE)	10	44.629	12.138
1988-03-10 13:07:23	Md 2.7	12 km SW Comacchio (FE)	5	44.597	12.13
1988-05-15 16:29:18	Md 2.7	Costa Ravennate (RA)	10	44.52	12.323
1988-05-22 23:31:03	Md 2.8	Costa Ravennate (RA)	5	44.527	12.446
1988-08-26 22:12:49	Md 2.8	Costa Ferrarese (FE)	5	44.66	12.486
1988-12-24 20:39:48	Md 2.8	9 km SW Comacchio (FE)	10	44.649	12.085
1990-01-19 12:46:16	Md 2.8	4 km E Bagnacavallo (RA)	5	44.424	12.021
1990-10-30 19:41:52	Md 2.6	Costa Ravennate (RA)	5	44.583	12.475

1991-02-20 13:53:30	Md 3.3	3 km S Russi (RA)	5	44.347	12.038
1991-03-04 05:08:11	Md 2.9	Costa Ferrarese (FE)	15	44.626	12.541
1992-06-25 20:19:54	Md 2.7	9 km NE Ravenna (RA)	7	44.48	12.269
1993-02-09 10:22:25	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.384	12.339
1993-03-11 22:43:56	Md 2.5	6 km S Russi (RA)	10	44.322	12.031
1993-05-01 21:53:23	Md 2.2	10 km S Ravenna (RA)	10	44.33	12.172
1993-07-04 19:50:52	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.349	12.468
1993-10-17 17:08:47	Md 2.6	Costa Ravennate (RA)	10	44.391	12.454
1993-11-14 21:26:24	Md 2.2	4 km NE Russi (RA)	5	44.409	12.059
1994-02-15 13:17:58	Md 2.6	8 km S Russi (RA)	10	44.305	12.026
1994-11-27 18:02:05	Md 2.9	11 km NE Alfonsine (RA)	8	44.594	12.107
1994-11-29 09:20:20	Md 2.3	9 km NW Cervia (RA)	10	44.337	12.306
1995-02-26 20:22:40	Md 3.0	8 km NW Ravenna (RA)	5	44.477	12.14
1995-08-09 23:35:10	Md 2.9	5 km E Alfonsine (RA)	11	44.489	12.102
1995-10-07 15:47:59	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.362	12.349
1996-01-11 10:40:36	Md 2.5	7 km E Alfonsine (RA)	5	44.482	12.125
1996-01-28 16:21:59	Md 2.4	Costa Ravennate (RA)	5	44.334	12.477
1996-03-18 02:15:52	Md 2.9	7 km E Alfonsine (RA)	5	44.506	12.133
1996-04-18 10:45:09	Md 3.4	1 km SE Ravenna (RA)	9,9	44.409	12.205
1996-08-23 05:03:51	Md 2.8	Costa Ravennate (RA)	5	44.534	12.419
1997-08-02 14:00:48	Md 2.5	5 km S Russi (RA)	11	44.329	12.031
1997-10-02 19:42:23	Md 2.4	7 km E Ravenna (RA)	42	44.417	12.284
2000-01-18 19:55:42	Md 2.4	9 km S Comacchio (FE)	5	44.615	12.16
2000-04-26 20:28:50	Md 2.7	1 km E Russi (RA)	5	44.375	12.049
2000-05-11 00:02:59	Md 2.9	7 km SW Russi (RA)	15	44.317	12.009
2000-10-16 21:58:11	Md 2.7	3 km W Alfonsine (RA)	5	44.513	12.007
2000-12-06 03:49:58	Md 3.2	10 km N Alfonsine (RA)	5	44.599	12.04
2000-12-06 04:39:51	Md 2.4	3 km N Alfonsine (RA)	10	44.53	12.048

2001-01-11 18:22:55	Md 2.6	7 km NW Alfonsine (RA)	5	44.564	12.002
2001-01-23 12:11:22	Md 2.7	9 km SE Ravenna (RA)	4	44.341	12.245
2001-04-17 22:35:27	Md 2.2	Costa Ravennate (RA)	10	44.426	12.324
2002-07-26 02:01:27	Md 2.9	15 km SE Comacchio (FE)	9	44.571	12.255
2002-08-12 22:50:37	Md 3.3	13 km SE Comacchio (FE)	5	44.596	12.262
2002-10-21 19:42:46	Md 2.5	9 km NW Ravenna (RA)	10	44.49	12.16
2002-11-02 10:57:44	Md 4.1	15 km SE Comacchio (FE)	9	44.576	12.263
2002-11-21 17:23:33	Md 3.1	14 km SE Comacchio (FE)	5	44.573	12.243
2002-12-25 23:40:36	Md 2.8	Costa Ferrarese (FE)	5	44.799	12.505
2003-02-01 08:51:54	Md 2.9	Costa Ravennate (RA)	5	44.579	12.294
2003-02-01 09:24:37	Md 3.2	13 km S Comacchio (FE)	7	44.584	12.225
2003-05-30 12:30:21	Md 2.7	7 km W Comacchio (FE)	6	44.691	12.092
2003-09-28 08:32:34	Md 2.5	Costa Ferrarese (FE)	5	44.622	12.289
2004-01-23 10:40:11	Md 2.2	6 km SE Russi (RA)	10	44.32	12.065
2004-02-06 19:02:38	Md 2.1	11 km S Ravenna (RA)	10	44.319	12.174
2004-02-12 09:13:28	Md 3.5	Costa Ravennate (RA)	5	44.484	12.579
2004-02-13 06:18:10	Md 2.4	4 km E Bagnacavallo (RA)	10	44.433	12.028
2004-02-18 23:37:19	Md 2.8	11 km SW Comacchio (FE)	5	44.634	12.07
2004-03-07 17:58:07	Md 2.6	Costa Ravennate (RA)	5	44.504	12.584
2004-03-10 09:24:26	Md 2.2	8 km S Comacchio (FE)	5	44.628	12.195
2004-07-20 11:33:46	Md 2.4	Costa Ravennate (RA)	10	44.462	12.437
2005-03-08 08:41:53	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.44	12.378
2005-03-26 16:59:18	Md 2.4	9 km NE Alfonsine (RA)	13	44.548	12.138
2005-04-11 01:32:18	Md 2.7	Costa Ravennate (RA)	5	44.363	12.333
2005-09-06 22:17:36	ML 1.7	6 km S Comacchio (FE)	12	44.641	12.193
2006-03-24 08:51:59	ML 2.3	12 km S Ravenna (RA)	10	44.307	12.181
2006-05-04 13:18:47	ML 2.3	11 km E Ravenna (RA)	12	44.369	12.322
2006-10-17 23:32:15	ML 2.1	12 km SW Comacchio (FE)	2	44.627	12.072

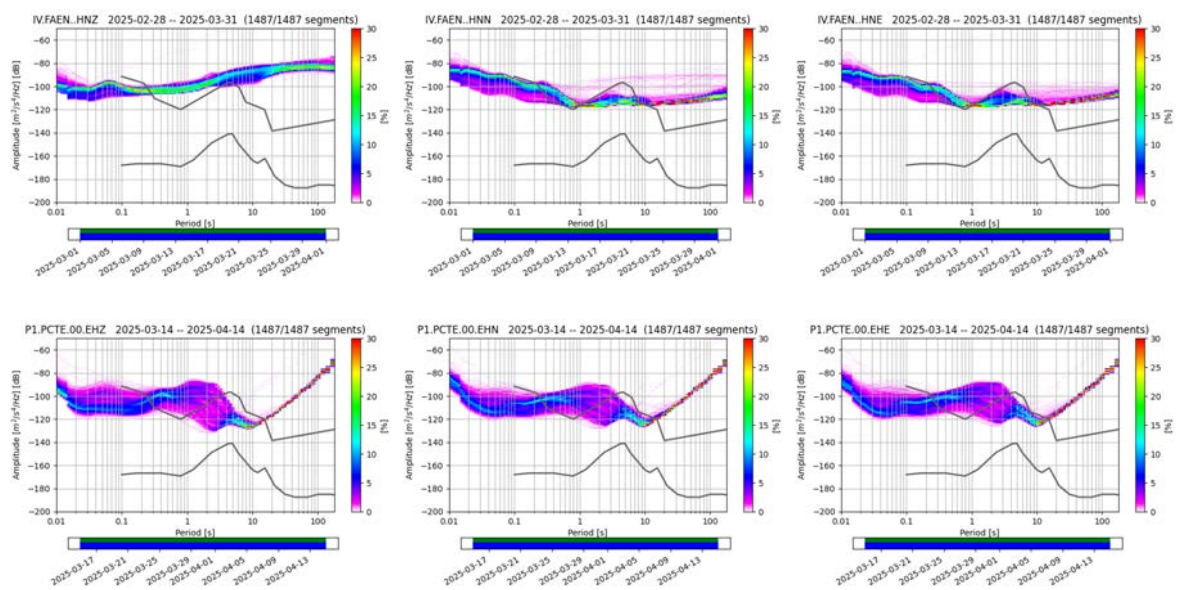
2006-12-12 22:08:25	ML 2.0	8 km N Alfonsine (RA)	12	44.575	12.056
2007-01-24 04:06:00	Md 2.2	8 km SE Ravenna (RA)	29	44.351	12.236
2007-01-27 19:41:56	ML 1.5	10 km NW Cervia (RA)	10	44.312	12.253
2007-02-14 23:10:54	ML 3.3	7 km S Russi (RA)	18	44.306	12.029
2007-02-15 00:27:30	Md 2.0	3 km SW Russi (RA)	10	44.351	12.016
2007-02-18 12:02:01	ML 1.5	6 km SE Russi (RA)	10	44.34	12.09
2007-05-11 16:20:55	ML 2.1	11 km S Ravenna (RA)	31	44.325	12.227
2008-03-29 15:12:11	ML 1.5	Costa Ravennate (RA)	10	44.309	12.358
2009-02-13 19:08:17	ML 1.8	12 km SE Ostellato (FE)	1	44.656	12.034
2009-02-18 10:14:35	ML 1.9	Costa Ravennate (RA)	10	44.302	12.446
2009-02-23 20:53:26	ML 1.5	6 km W Ravenna (RA)	5	44.403	12.124
2009-03-30 17:43:01	ML 2.0	9 km NE Ravenna (RA)	8	44.487	12.267
2009-04-06 01:03:34	ML 1.4	5 km S Russi (RA)	10	44.328	12.043
2009-07-22 03:30:56	ML 1.2	10 km NW Cervia (RA)	36	44.347	12.306
2009-09-01 22:07:13	ML 2.6	11 km N Alfonsine (RA)	32	44.603	12.04
2010-03-25 00:14:43	ML 2.3	3 km W Comacchio (FE)	1	44.691	12.146
2010-03-29 11:34:12	ML 1.9	3 km NE Comacchio (FE)	1	44.717	12.209
2010-06-29 08:05:30	ML 1.7	4 km E Russi (RA)	15	44.364	12.08
2010-08-24 13:25:35	ML 2.4	Costa Ravennate (RA)	31	44.445	12.582
2011-01-05 12:16:27	M 0.8	Costa Ravennate (RA)	10	44.3	12.55
2011-01-28 12:54:56	M 0.6	Costa Ravennate (RA)	10	44.4	12.36
2011-05-07 22:53:53	ML 1.2	Costa Ravennate (RA)	30	44.517	12.339
2011-08-11 06:34:55	ML 1.4	2 km NW Russi (RA)	10	44.382	12.018
2011-08-17 14:13:32	ML 2.5	Costa Ravennate (RA)	21	44.481	12.538
2011-11-06 20:12:07	Md 1.9	1 km E Russi (RA)	25	44.374	12.044
2012-03-15 02:00:50	ML 1.8	Costa Ravennate (RA)	22	44.542	12.557
2012-04-06 04:51:06	ML 1.2	8 km SE Russi (RA)	9	44.319	12.109
2012-06-03 02:32:42	ML 2.3	11 km E Ravenna (RA)	34	44.3742	12.3177

2012-06-06 04:08:31	Mw 4.0	Costa Ravennate (RA)	31	44.3995	12.3222
2012-06-06 04:11:47	Md 2.3	4 km E Ravenna (RA)	32	44.41	12.2512
2012-06-06 05:14:49	ML 2.1	4 km NE Ravenna (RA)	33	44.4533	12.2193
2012-06-06 09:57:06	ML 2.1	Costa Ravennate (RA)	29	44.471	12.3483
2012-06-08 01:11:39	ML 2.6	8 km NE Ravenna (RA)	21	44.4722	12.2687
2012-06-08 20:30:04	ML 2.1	Costa Ravennate (RA)	30	44.4282	12.3367
2012-06-09 02:13:57	ML 2.3	Costa Ravennate (RA)	22	44.4158	12.3263
2012-06-14 20:48:29	ML 1.3	12 km SE Russi (RA)	27	44.305	12.1482
2012-07-09 03:28:55	ML 1.6	5 km NW Cervia (RA)	40	44.301	12.3333
2012-08-29 02:27:22	ML 1.5	Costa Ravennate (RA)	29	44.4787	12.3158
2012-10-09 04:24:36	ML 2.4	Costa Ravennate (RA)	26	44.4172	12.5348
2012-11-25 17:03:28	ML 2.0	3 km SW Ravenna (RA)	36	44.3945	12.1802
2013-04-04 20:34:15	ML 2.6	6 km E Ostellato (FE)	24	44.7225	12.0153
2013-07-15 17:05:38	ML 2.2	8 km N Ravenna (RA)	20	44.4893	12.1893
2014-01-22 06:24:05	ML 2.6	Costa Ravennate (RA)	23	44.3832	12.3515
2014-06-14 22:53:25	ML 1.8	5 km S Russi (RA)	31	44.3272	12.0428
2014-08-29 19:23:58	ML 2.2	4 km E Alfonsine (RA)	33	44.5107	12.0943
2014-09-16 06:50:07	ML 1.7	3 km E Ravenna (RA)	35	44.4052	12.2377
2015-09-15 00:49:00	ML 2.2	4 km NE Bagnacavallo (RA)	31	44.4485	12.0013
2016-03-30 01:52:57	ML 1.9	Costa Ravennate (RA)	20	44.446	12.3978
2016-04-07 18:25:56	ML 3.2	11 km SW Comacchio (FE)	3	44.6453	12.0667
2016-12-11 21:54:00	ML 2.2	13 km E Argenta (FE)	9	44.6353	12.0008
2017-01-14 11:24:36	ML 2.6	Costa Ravennate (RA)	36	44.5417	12.4108
2017-04-21 00:55:33	ML 2.6	Costa Ravennate (RA)	32	44.4573	12.4117
2017-08-13 20:54:05	ML 1.7	3 km E Bagnacavallo (RA)	25	44.416	12.0142
2018-07-02 12:40:30	ML 2.5	Costa Ravennate (RA)	32	44.4053	12.3622
2019-01-14 23:03:57	Mw 4.3	10 km SE Ravenna (RA)	21	44.3467	12.2857
2019-01-14 23:17:48	ML 1.9	7 km SE Ravenna (RA)	24	44.358	12.2377

2019-01-14 23:29:07	ML 3.0	9 km E Ravenna (RA)	21	44.3773	12.3018
2019-01-15 03:44:13	ML 2.1	11 km S Ravenna (RA)	23	44.323	12.2028
2019-01-17 07:15:56	ML 2.1	8 km E Russi (RA)	23	44.3705	12.1288
2019-01-20 23:24:16	ML 2.1	5 km S Ravenna (RA)	23	44.3718	12.1893
2019-02-05 11:47:55	ML 2.1	6 km SE Ravenna (RA)	19	44.3882	12.2617
2020-01-24 17:02:35	ML 2.5	6 km E Ravenna (RA)	10	44.4282	12.2772
2020-01-24 17:02:48	ML 3.4	Costa Ravennate (RA)	9	44.4213	12.3182
2020-01-24 23:17:04	ML 2.7	10 km E Ravenna (RA)	8	44.3782	12.3125
2020-01-24 23:41:01	ML 3.0	8 km E Ravenna (RA)	8	44.4213	12.3028
2020-01-25 00:56:08	ML 1.9	7 km S Ravenna (RA)	25	44.3527	12.2043
2020-01-26 06:04:52	ML 1.9	8 km E Ravenna (RA)	21	44.4033	12.2988
2020-01-28 04:15:40	ML 2.3	5 km E Ravenna (RA)	22	44.4168	12.2593
2020-01-28 04:15:54	ML 2.5	5 km E Ravenna (RA)	18	44.399	12.2635
2020-02-23 15:39:59	ML 3.1	7 km S Ravenna (RA)	23	44.3523	12.213
2020-04-19 03:27:05	ML 2.8	Costa Ravennate (RA)	10	44.4193	12.3313
2020-04-25 18:35:27	ML 1.5	6 km S Ravenna (RA)	25	44.3638	12.2067
2020-05-08 03:17:00	ML 1.0	4 km SW Russi (RA)	25	44.3422	12.0172
2020-12-09 01:02:04	ML 2.5	Costa Ravennate (RA)	18	44.3007	12.3987
2021-05-24 04:21:35	ML 2.6	Costa Ferrarese (FE)	38	44.7543	12.5878
2021-06-05 07:06:52	ML 1.7	10 km NW Cervia (RA)	33	44.3368	12.2922
2021-07-16 18:10:37	ML 1.9	13 km E Alfonsine (RA)	24	44.5397	12.2028
2021-07-24 20:59:16	ML 1.8	2 km NE Lagosanto (FE)	23	44.7792	12.1508
2021-08-11 22:31:05	ML 1.5	9 km SE Russi (RA)	21	44.317	12.1208
2021-09-17 20:05:27	ML 1.2	1 km W Russi (RA)	22	44.3752	12.019
2022-01-29 06:55:09	ML 1.5	11 km S Ravenna (RA)	36	44.319	12.2308
2022-12-03 03:49:36	ML 2.3	Costa Ferrarese (FE)	32	44.7613	12.3237
2023-07-28 19:58:44	ML 2.3	Costa Ferrarese (FE)	24	44.6602	12.2917
2023-09-18 18:44:37	ML 2.4	Costa Ravennate (RA)	31	44.4023	12.3393

2023-09-29 23:24:59	ML 2.7	12 km N Alfonsine (RA)	15	44.613	12.0542
2023-09-30 02:52:07	ML 2.7	10 km N Alfonsine (RA)	22	44.5933	12.0608
2023-10-18 20:05:35	ML 2.0	11 km SE Russi (RA)	23	44.3243	12.1507
2023-10-19 03:08:46	ML 2.3	9 km E Russi (RA)	23	44.3432	12.1342
2024-01-17 20:32:51	ML 2.2	7 km SW Ravenna (RA)	18	44.3578	12.163
2024-04-01 05:01:08	ML 1.9	5 km S Russi (RA)	26	44.3243	12.039
2024-05-12 10:03:21	ML 2.4	8 km W Ravenna (RA)	25	44.4228	12.1038
2024-06-06 05:54:25	ML 1.6	8 km SE Russi (RA)	21	44.3297	12.1113
2024-12-20 00:23:00	ML 2.3	Costa Ferrarese (FE)	6	44.7613	12.589
2024-12-20 00:35:16	ML 3.0	Costa Ferrarese (FE)	33	44.7545	12.4877
2025-02-10 02:08:57	ML 1.6	Costa Ravennate (RA)	36	44.3627	12.5593
2025-04-29 20:43:02	ML 1.5	Costa Ravennate (RA)	18	44.3082	12.4308
2025-06-25 21:32:23	ML 1.3	Costa Ravennate (RA)	18	44.3328	12.4417

Tabella A.2: Elenco dei terremoti strumentali presenti nel bollettino INGV che ricadono nell'area di studio. Gli eventi che ricadono nel DI vengono evidenziati in fucsia, quelli che ricadono nel DE sono evidenziati in rosa.



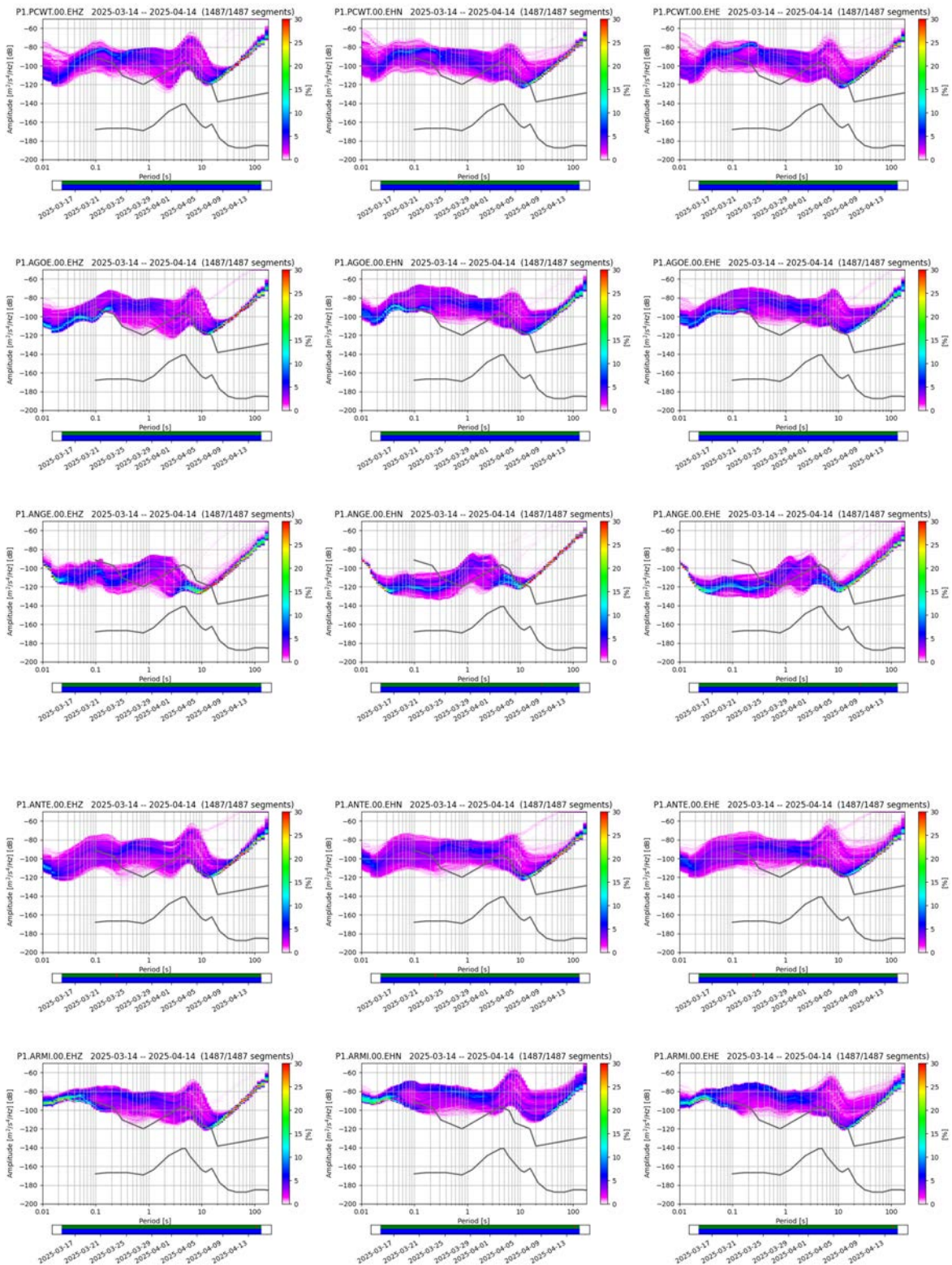


Figura A.1 Grafici delle curve di rumore medio calcolate come 90° percentile delle PSD per il periodo che va dal 15 Marzo al 15 Aprile 2025 per le delle stazioni (AGOE, ANGE, ANTE, ARMI, FAEN, PCTE, PCWT) della rete integrata alle tre componenti Z, N e E rispettivamente da sinistra a destra. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Peterson (1993) come riferimento

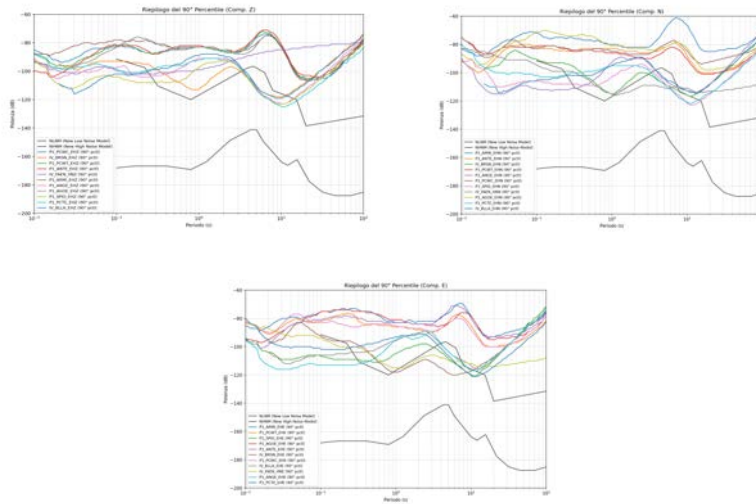


Figura A.2. Grafici delle curve di rumore medio calcolate come 90° percentile delle PPSD del periodo 15 Marzo - 15 Aprile 2025 per tutte le stazioni della rete integrata alle tre componenti Z, N e E rispettivamente da sinistra a destra. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Peterson (1993) come riferimento.

Appendice B - Parametri di qualità per le stazioni della rete GNSS

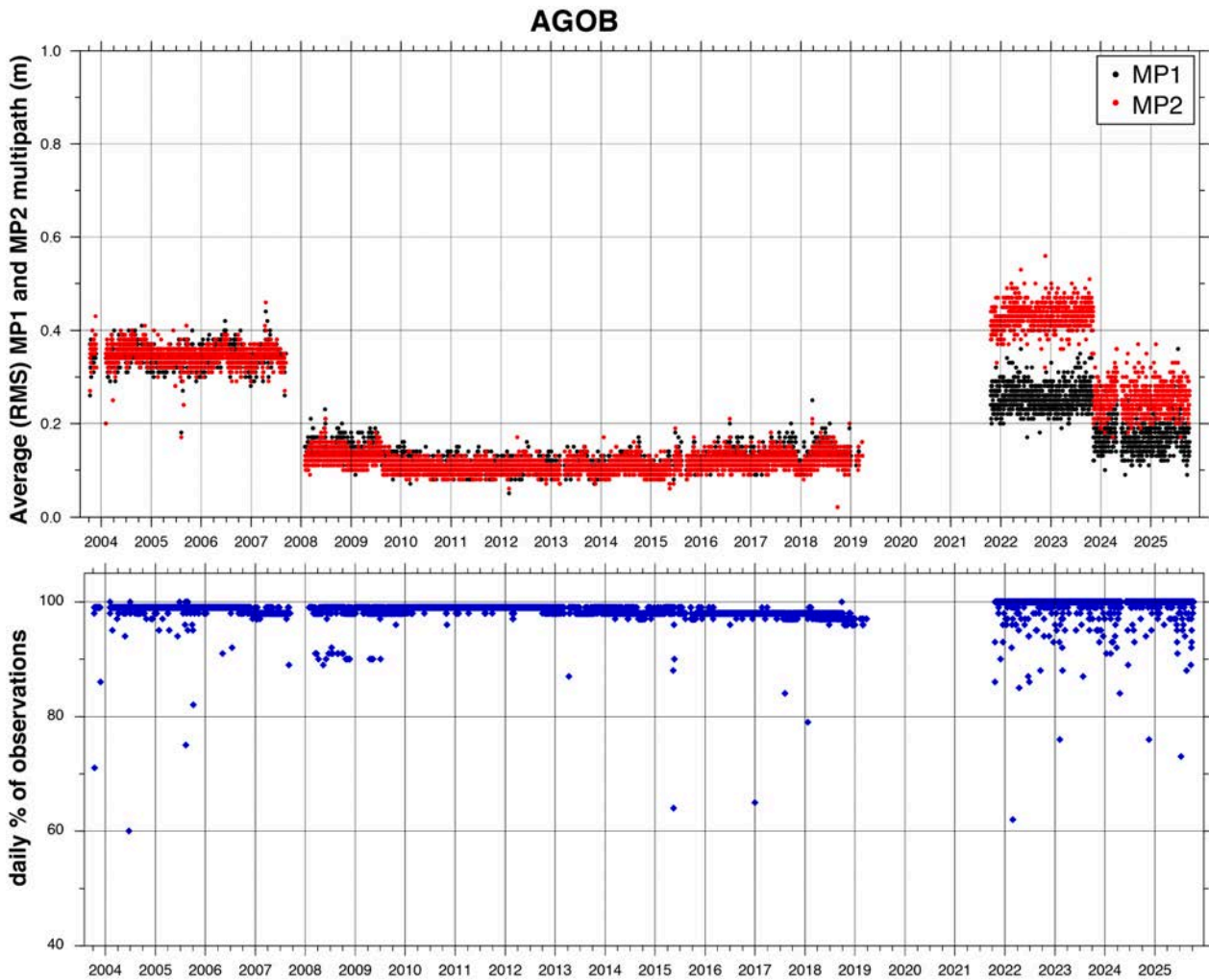


Figura B.1: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione AGOB in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

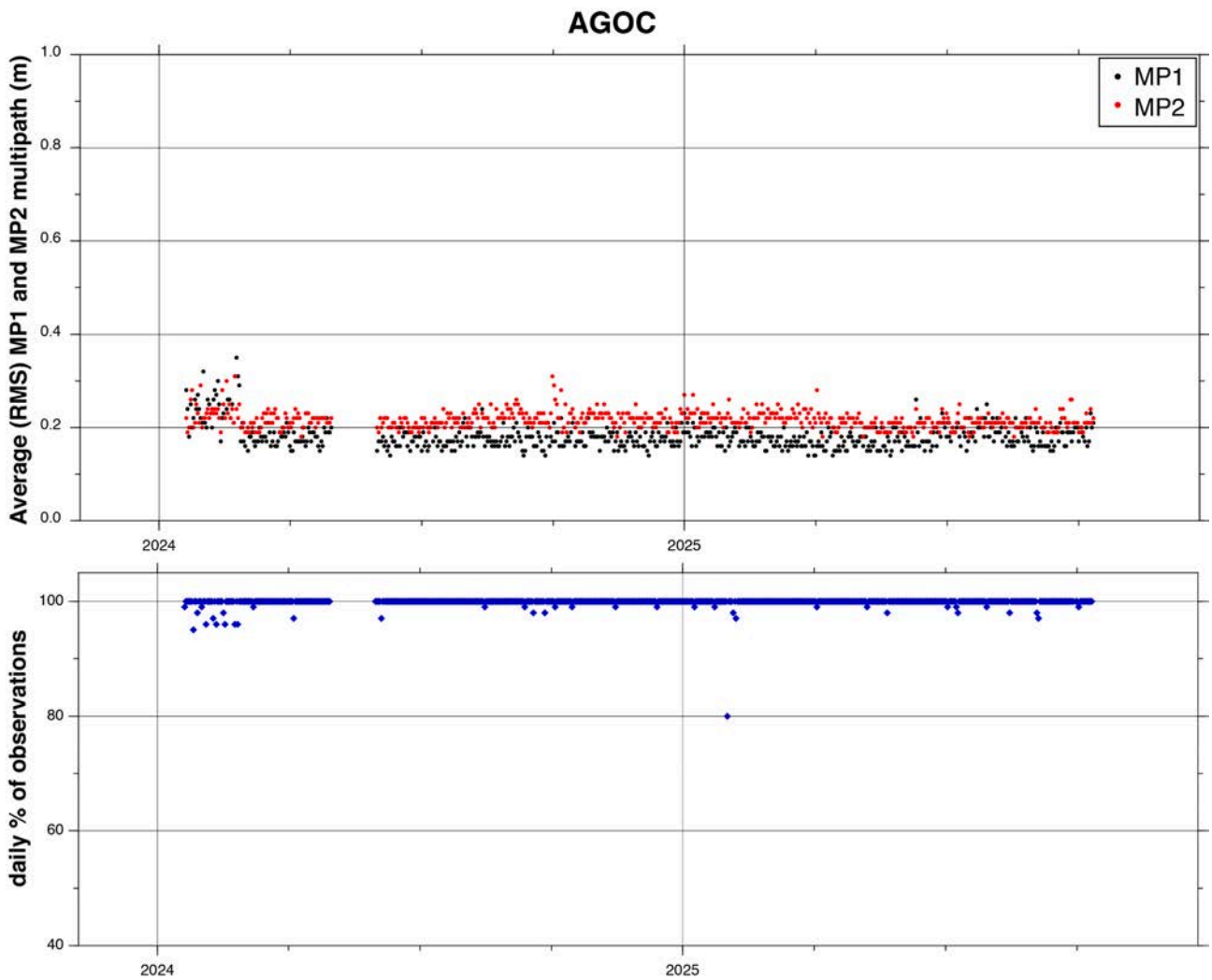


Figura B.2: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione AGOC in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

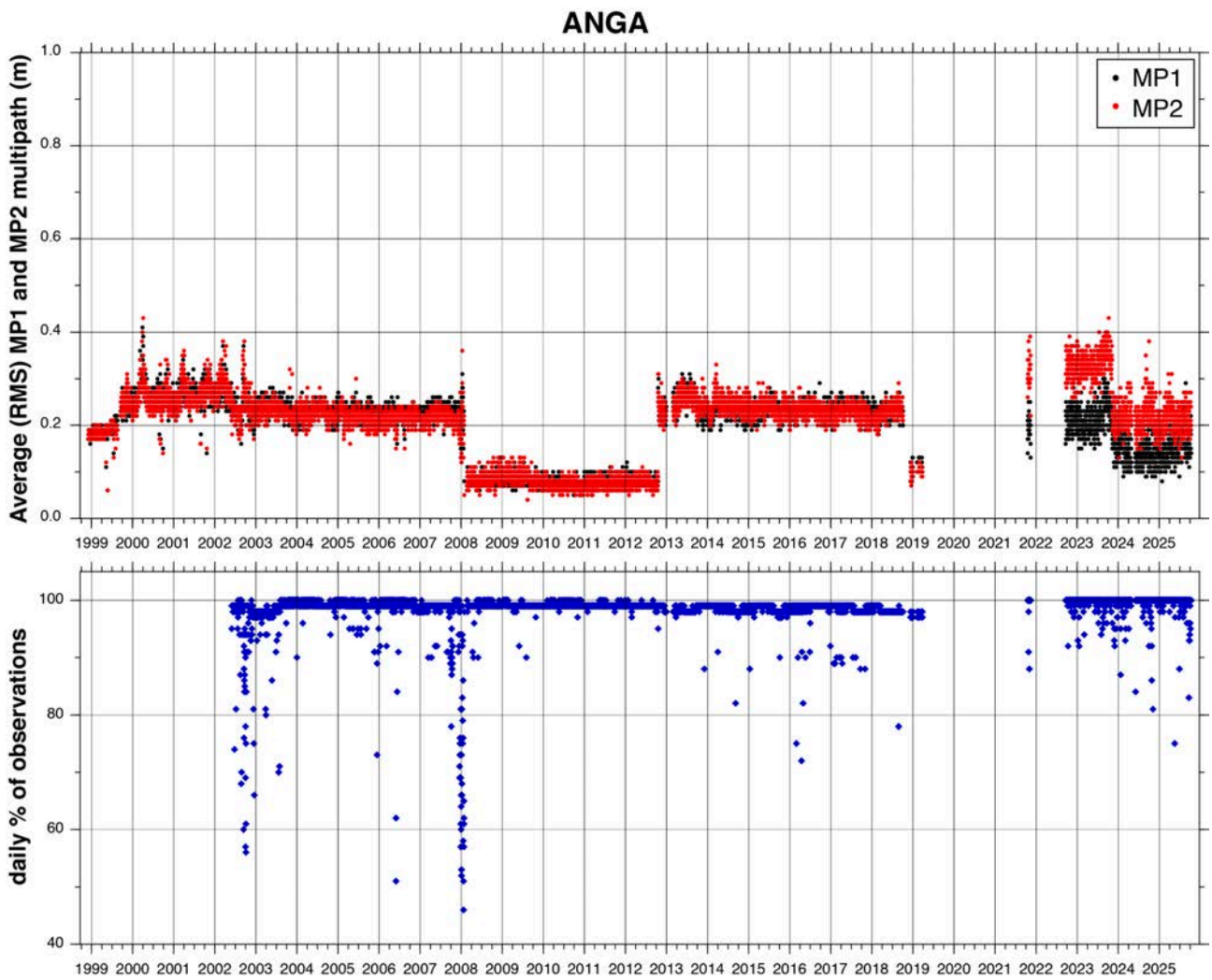


Figura B.3: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione ANGA in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

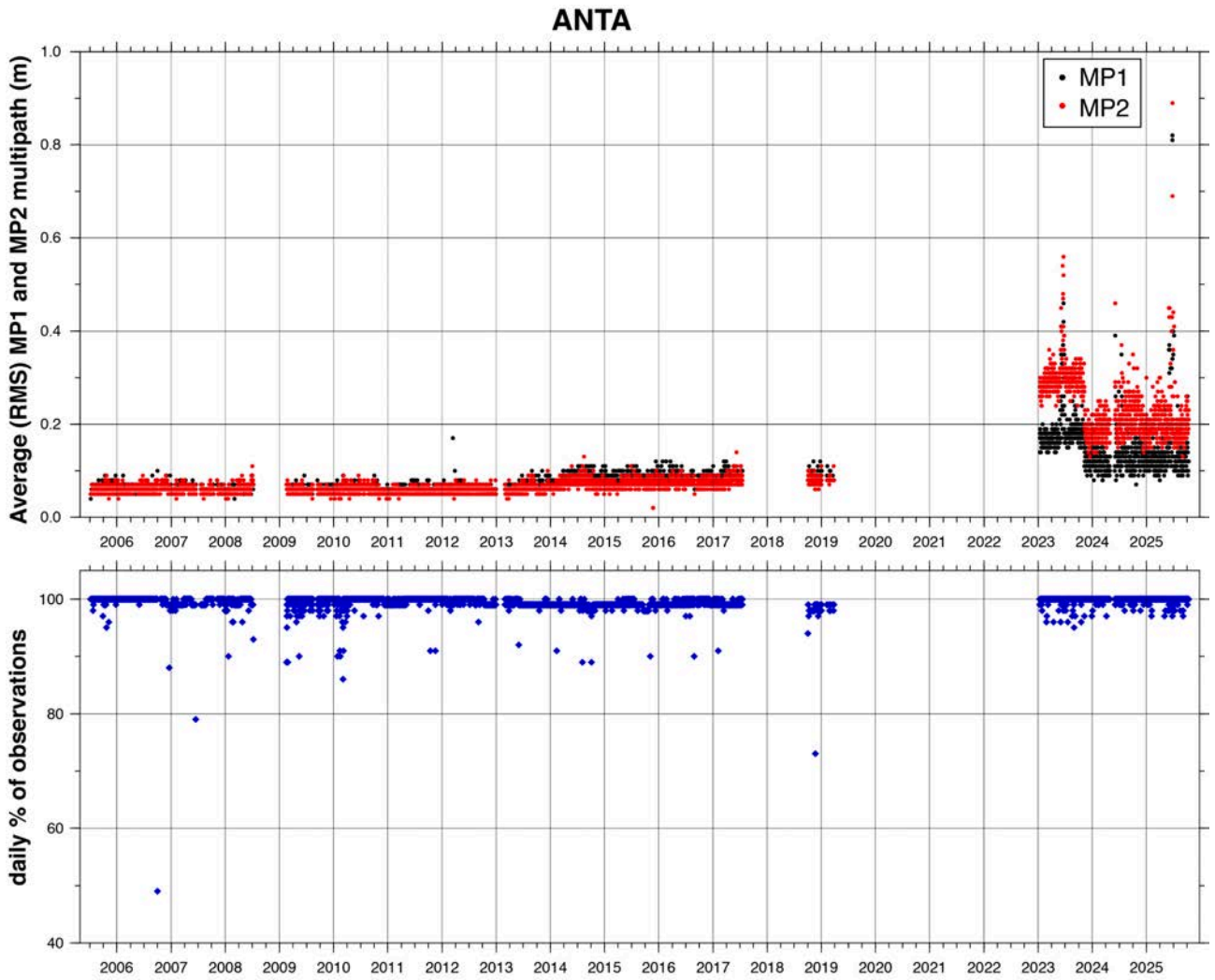


Figura B.4: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione ANTA in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

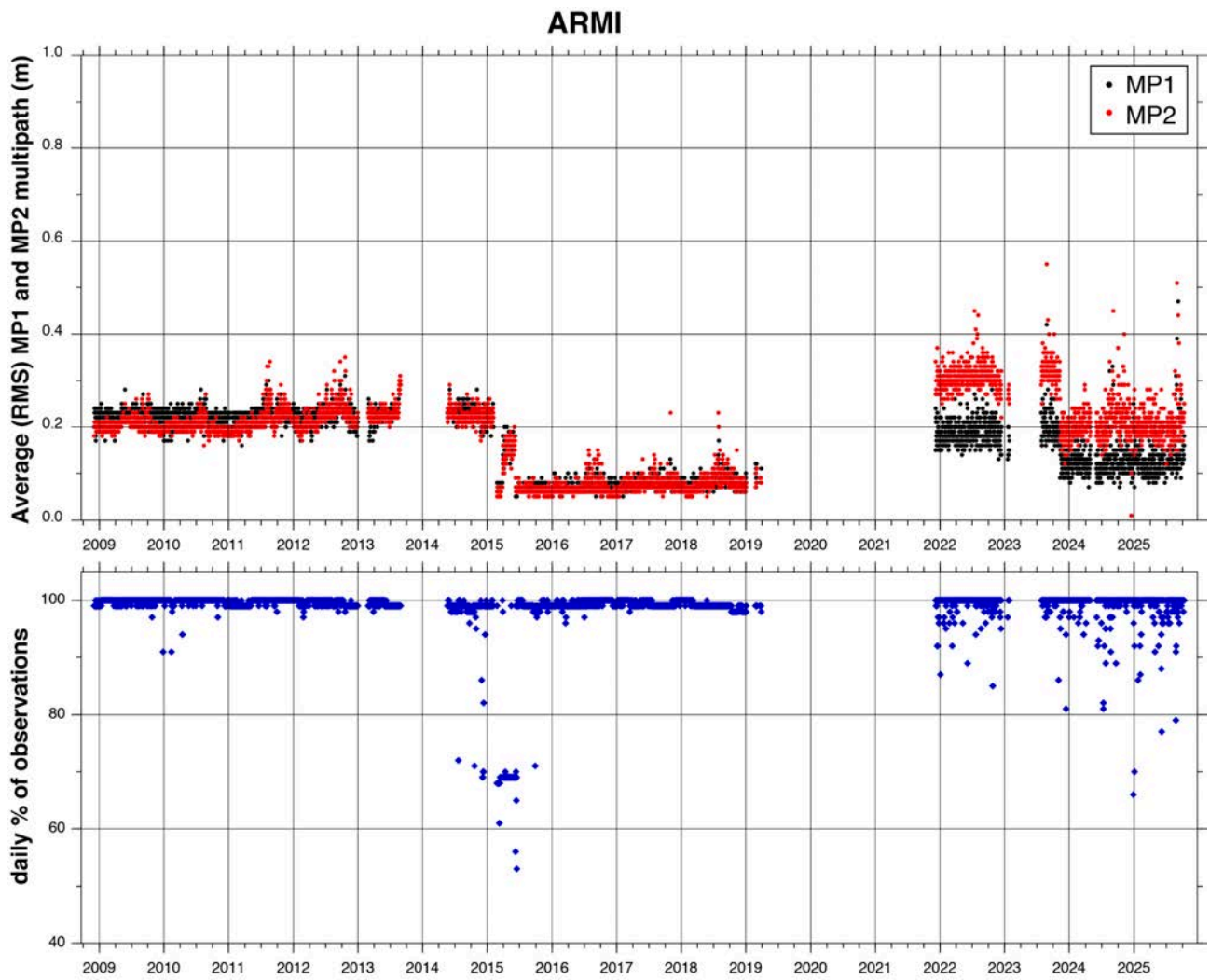


Figura B.5: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione ARMI in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

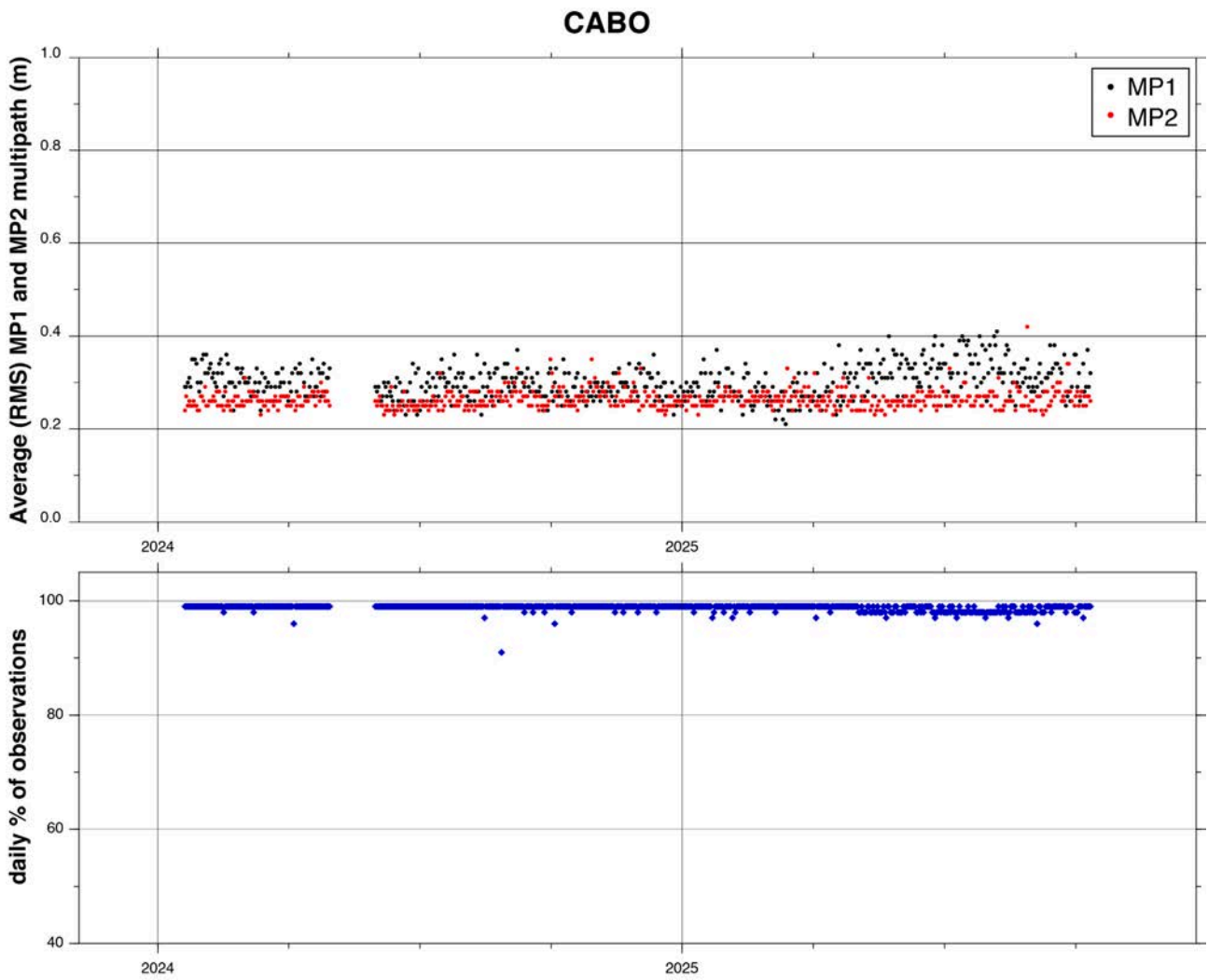


Figura B.6: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione CABO in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

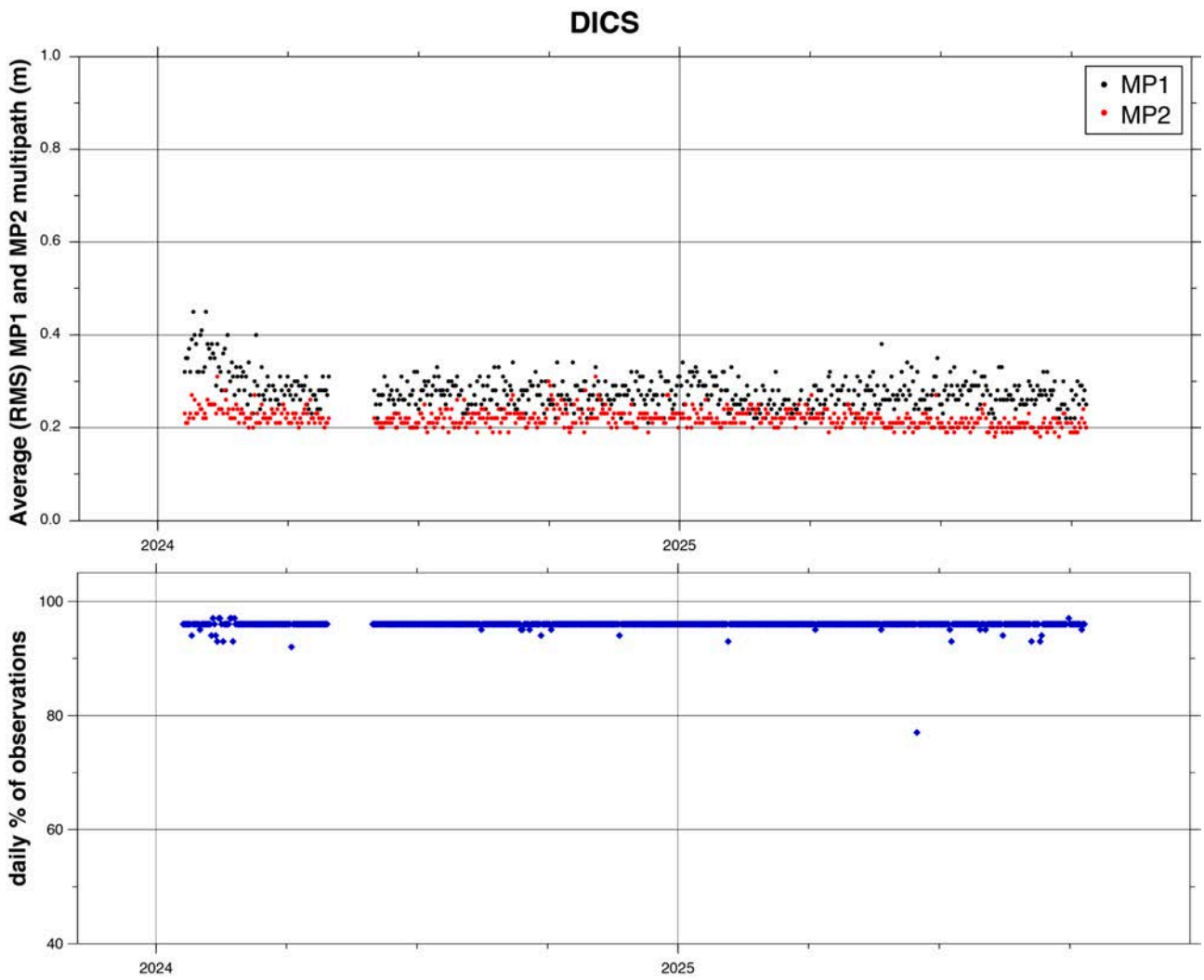


Figura B.7: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione DICS in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

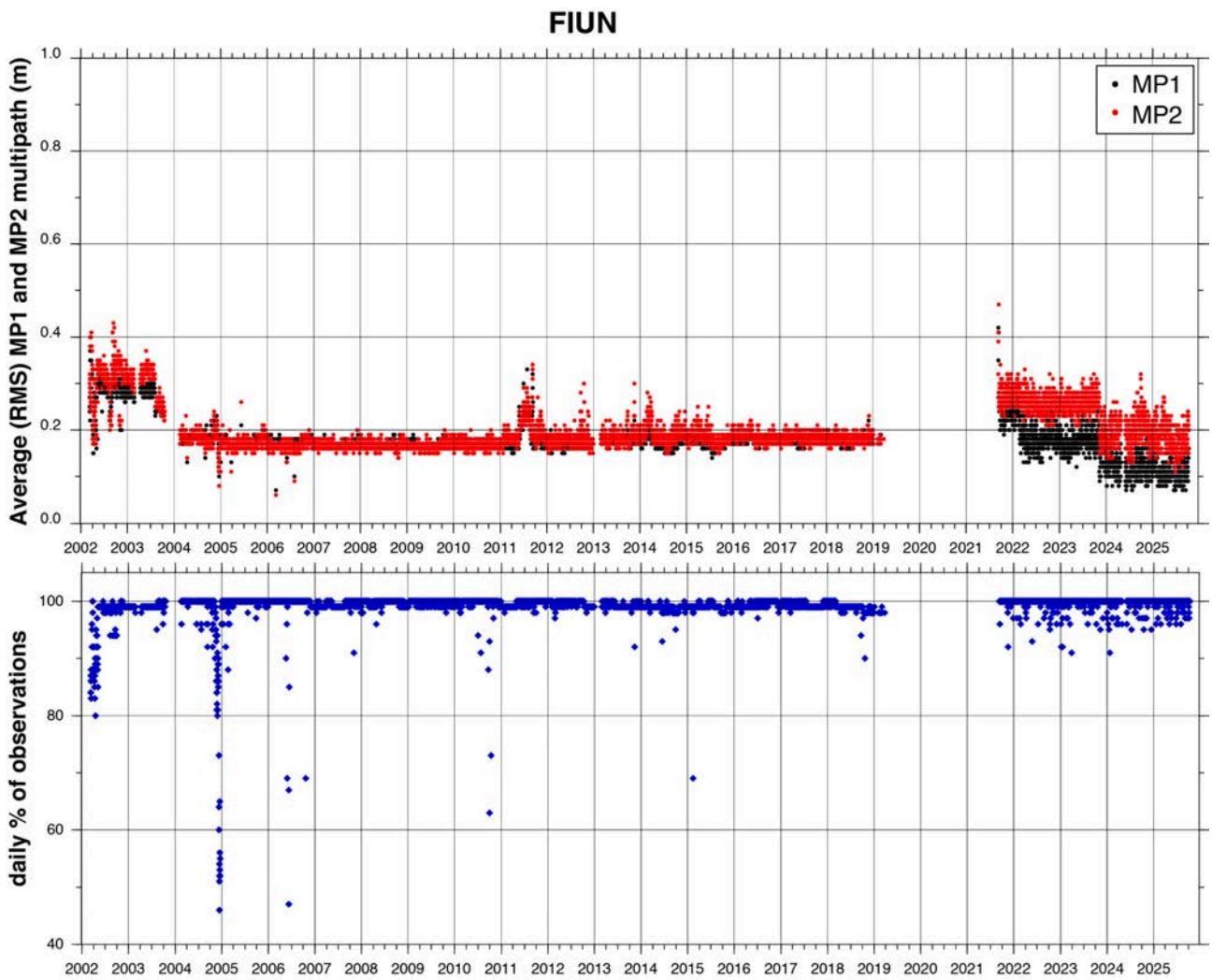


Figura B.8: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione FIUN in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

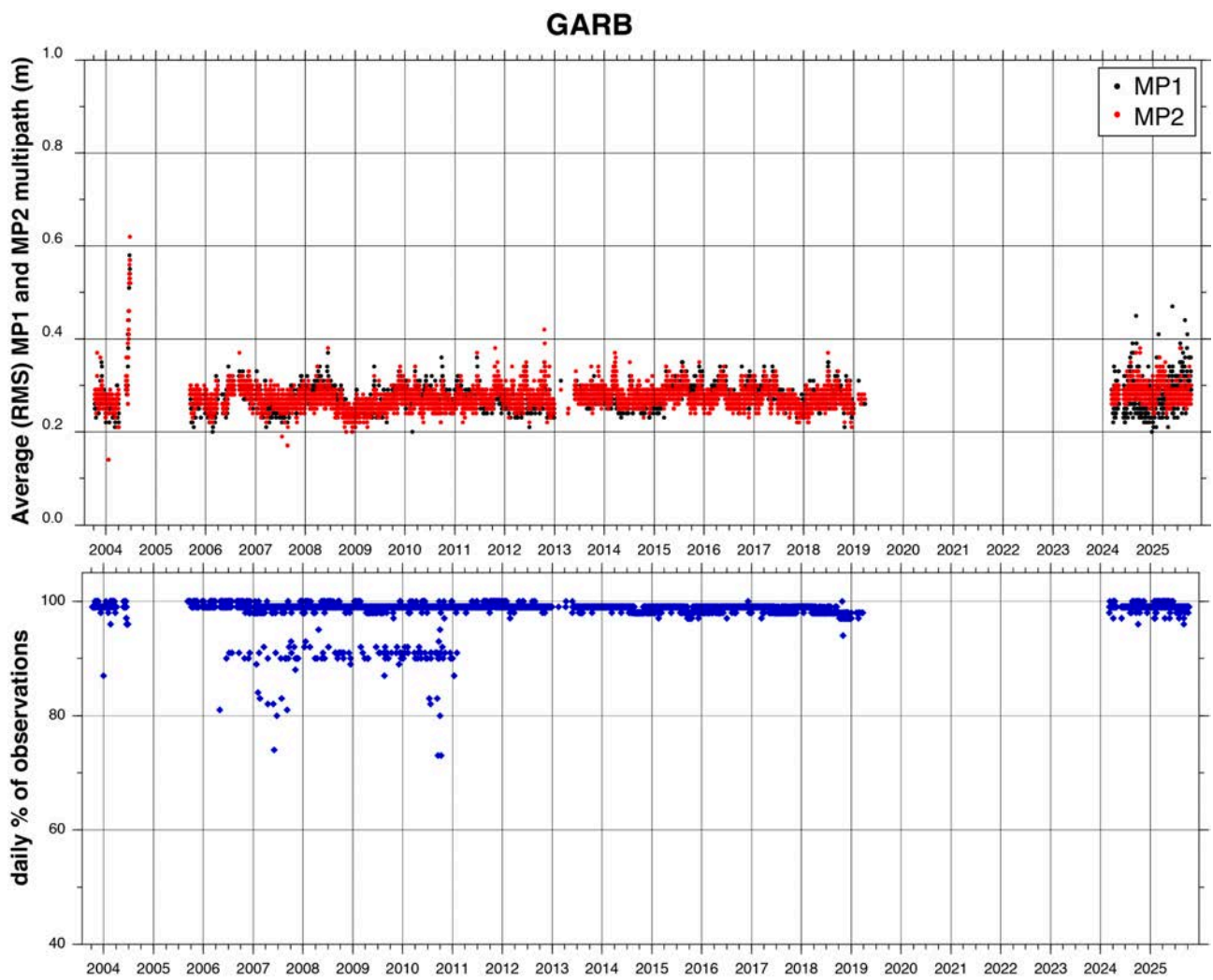


Figura B.9: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione GARB in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

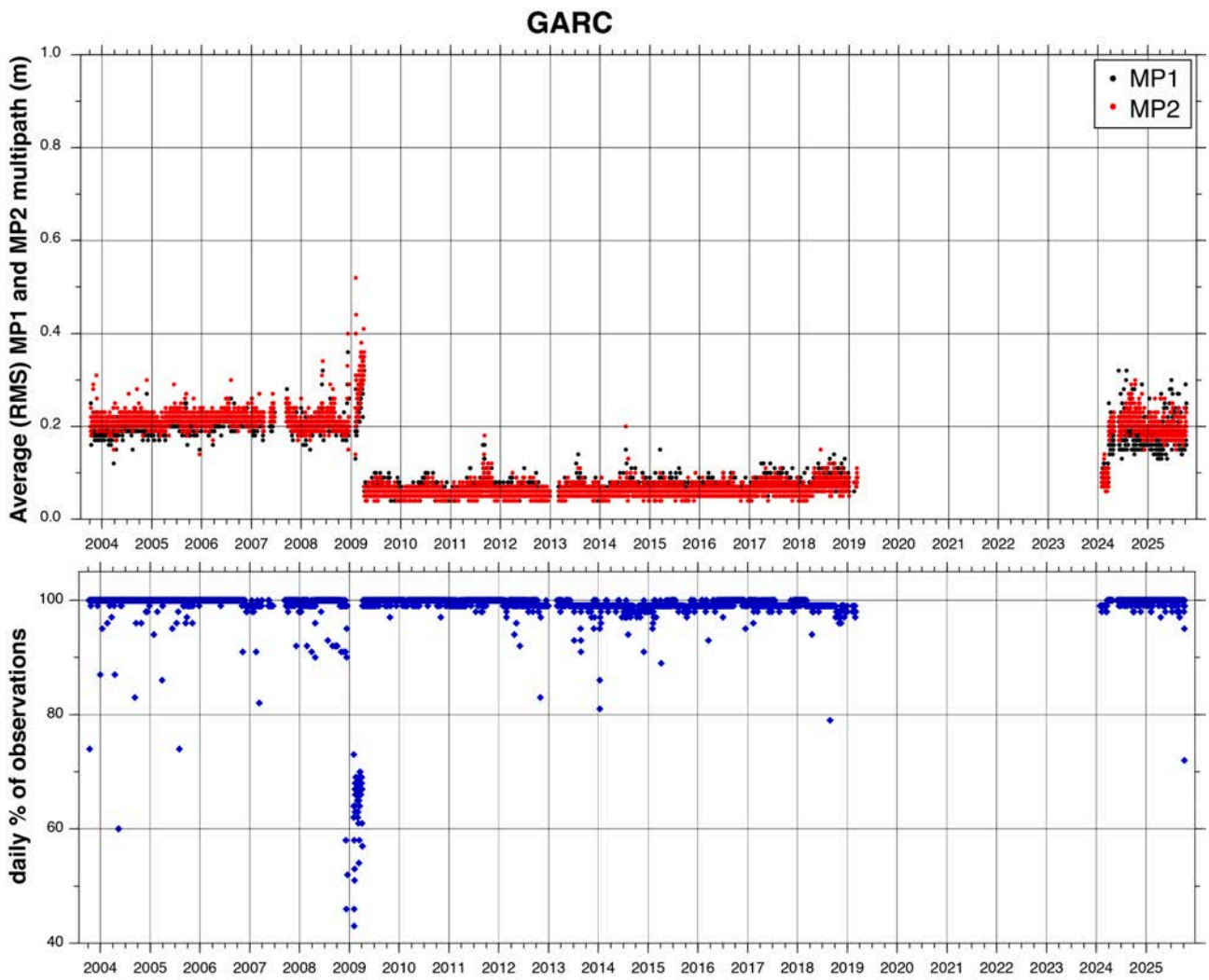


Figura B.10: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione GARC in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

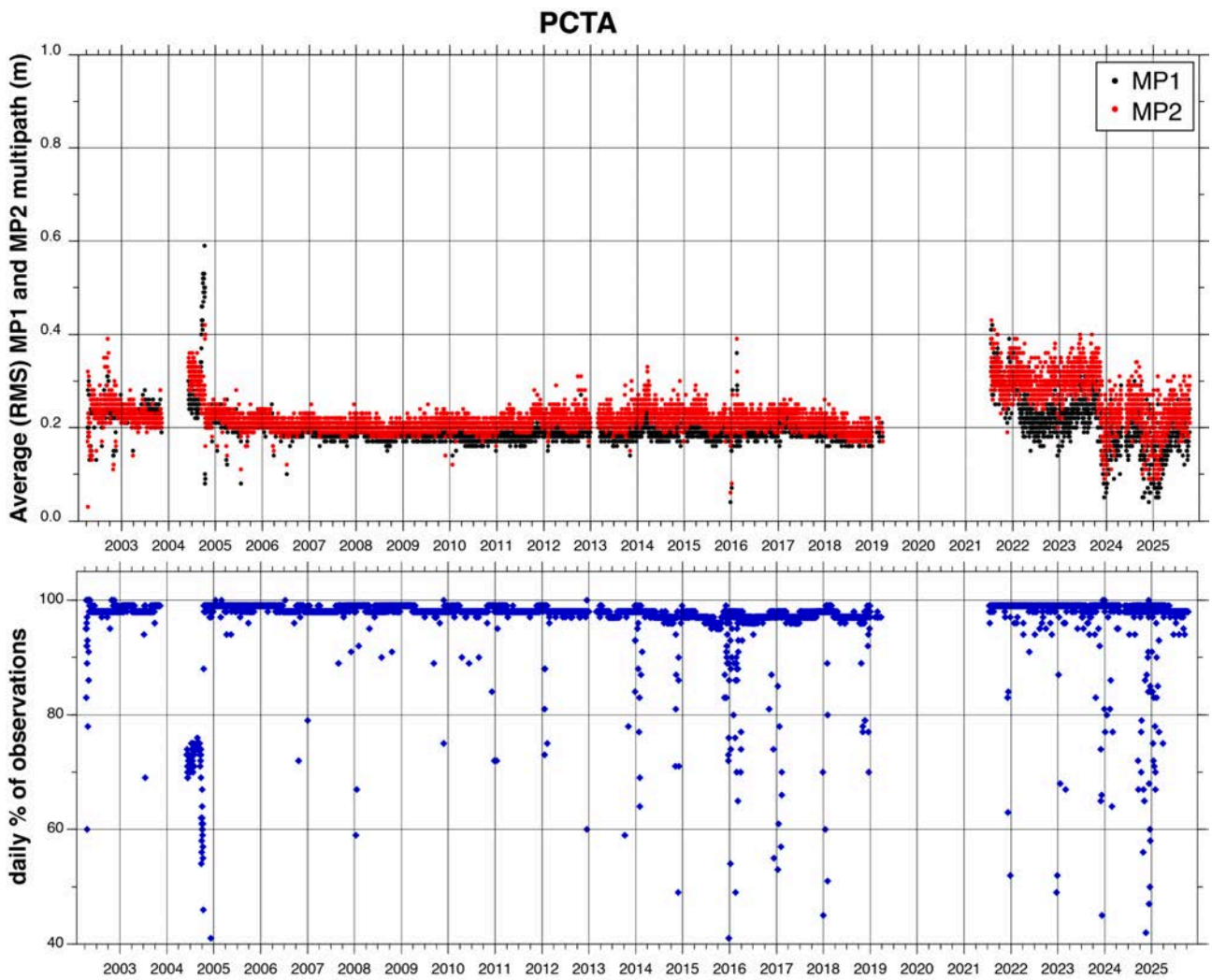


Figura B.11: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione PCTA in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

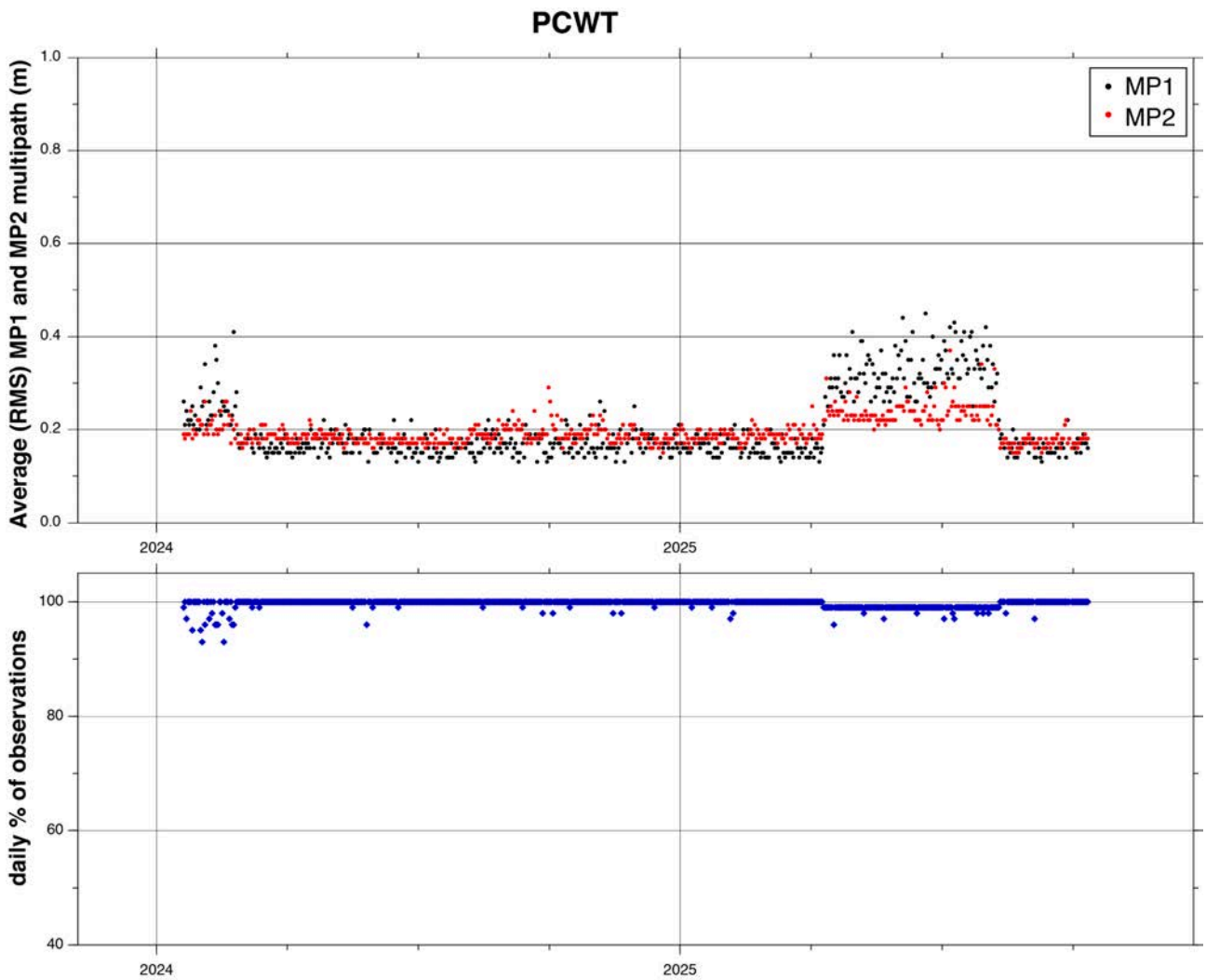


Figura B.12: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione PCWT in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

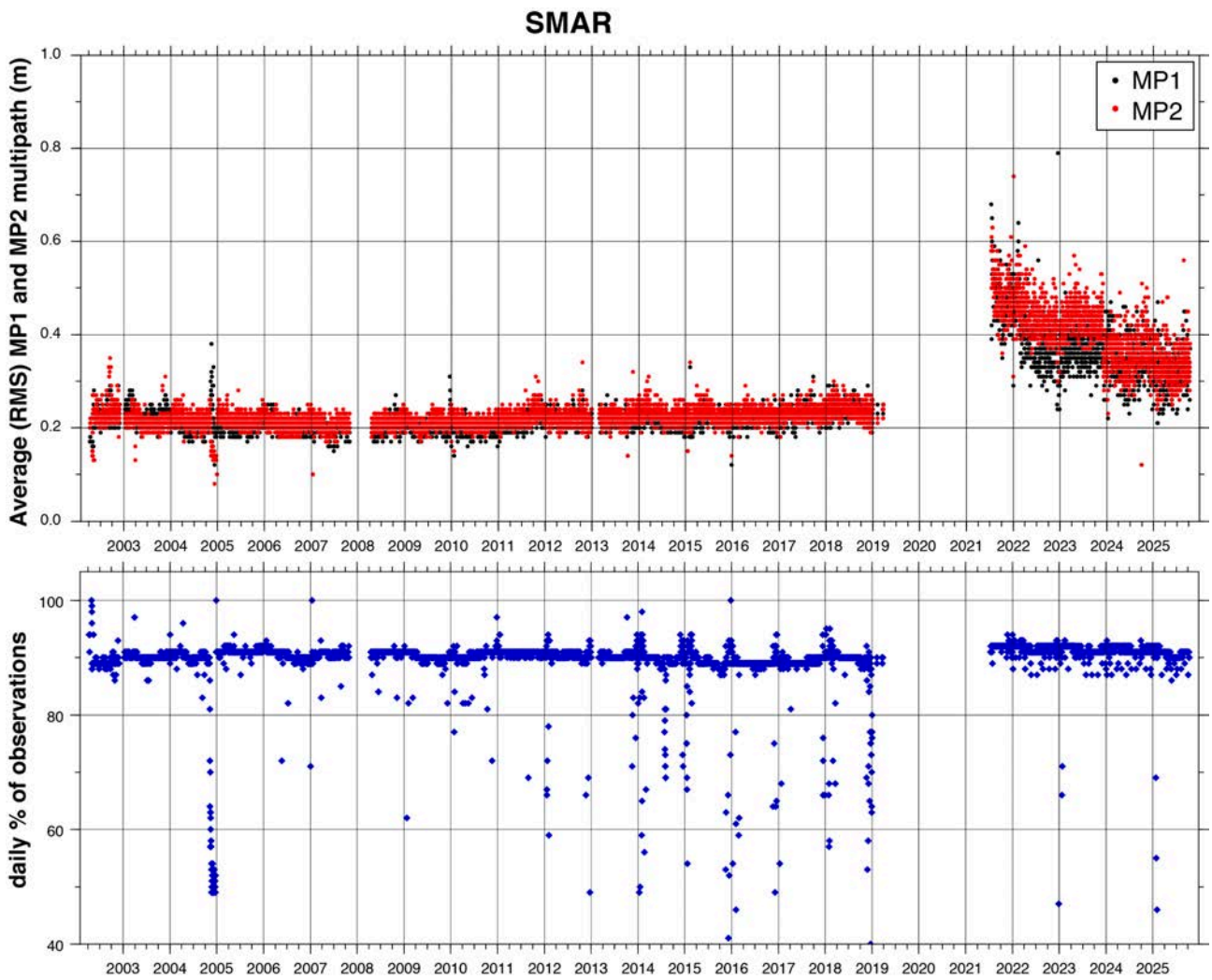


Figura B.13: Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione SMAR in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (pannello sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (pannello sotto).

Appendice C - Serie temporali di spostamento GPS

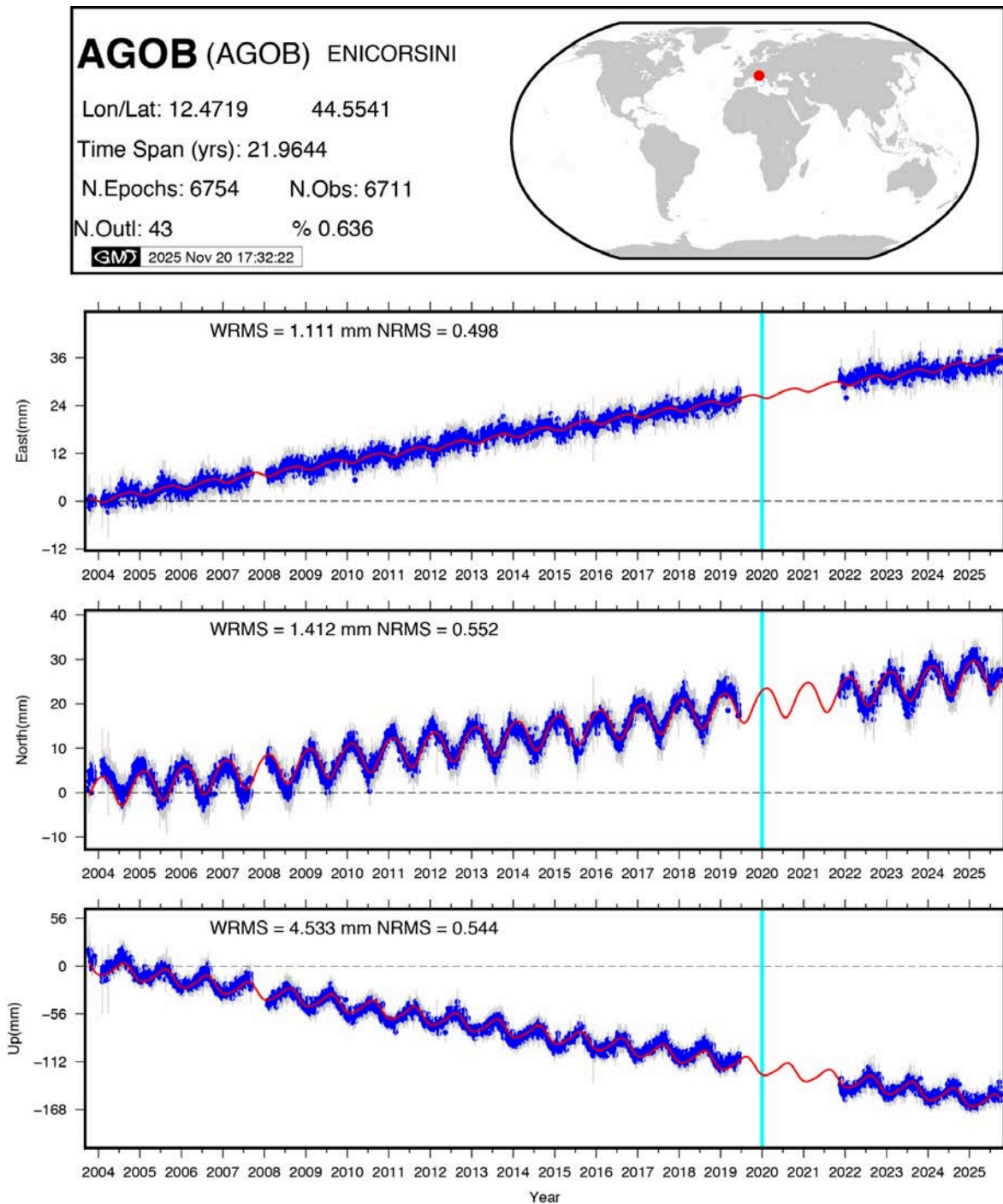


Figura C.1. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione AGOB nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in Igb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

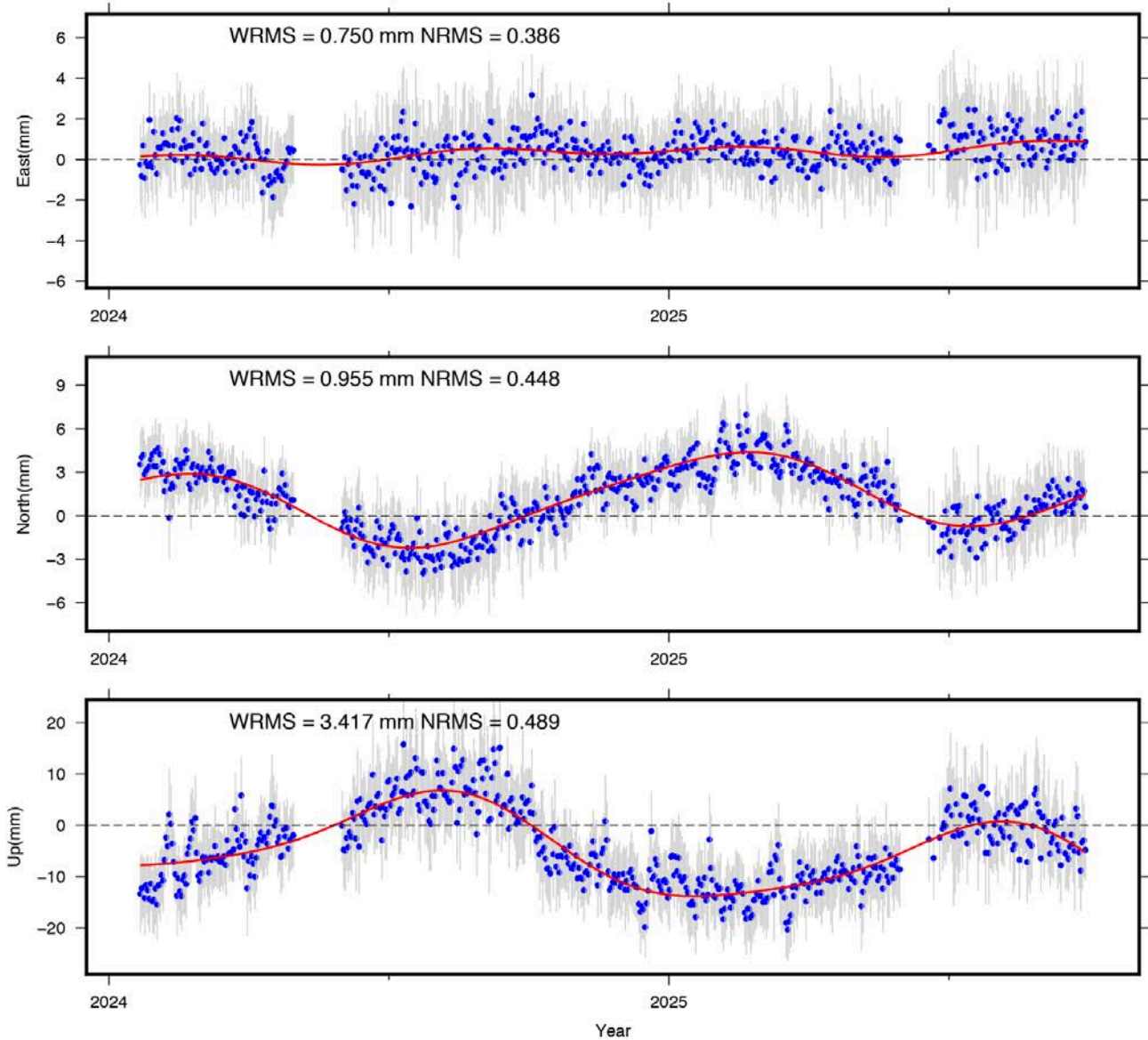
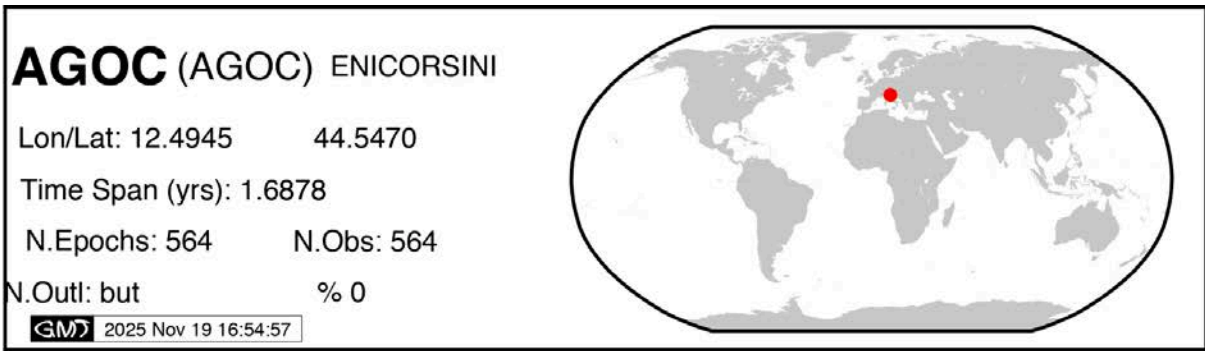


Figura C.2. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione AGOC nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

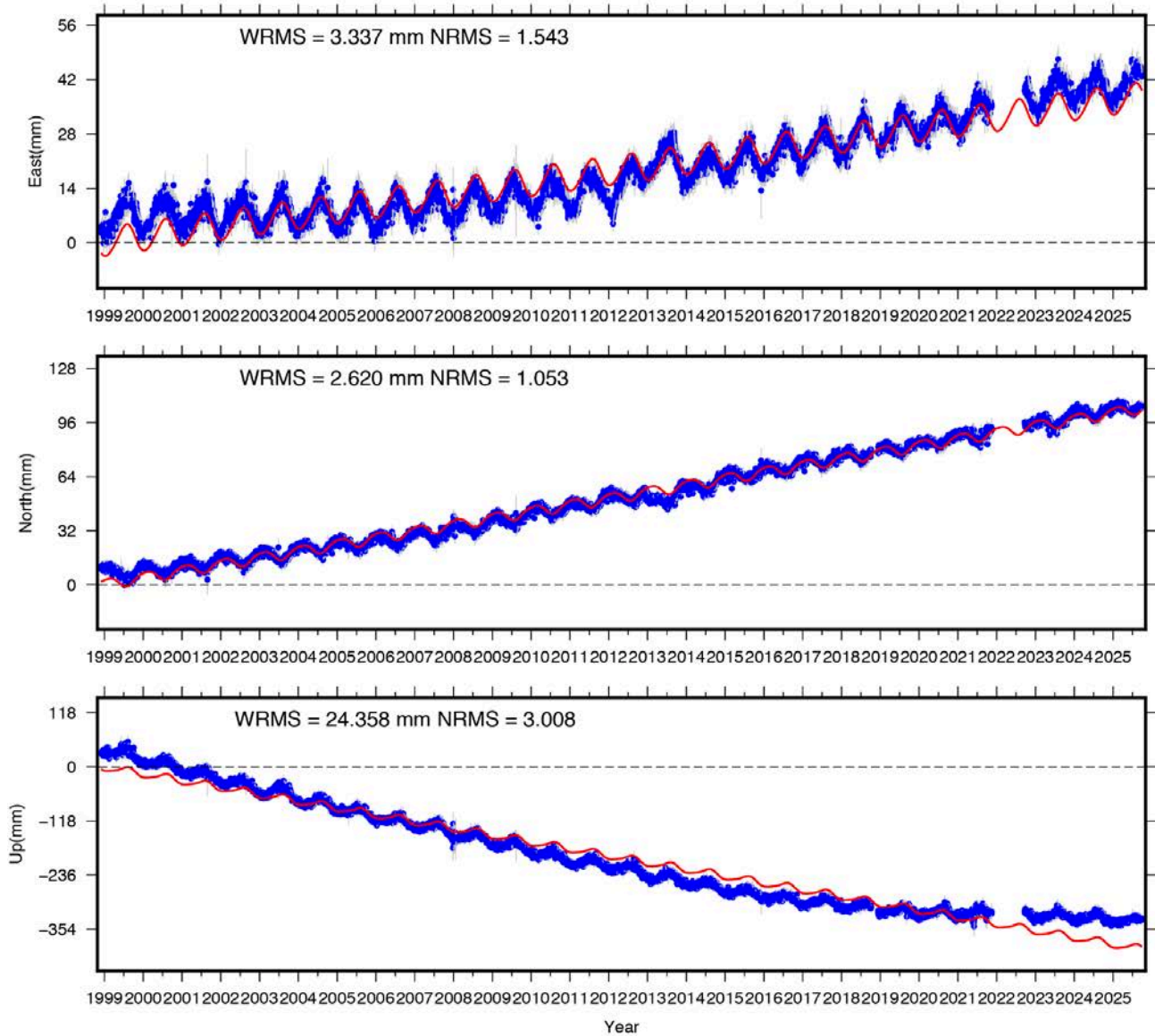


Figura C.3. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione ANGA nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

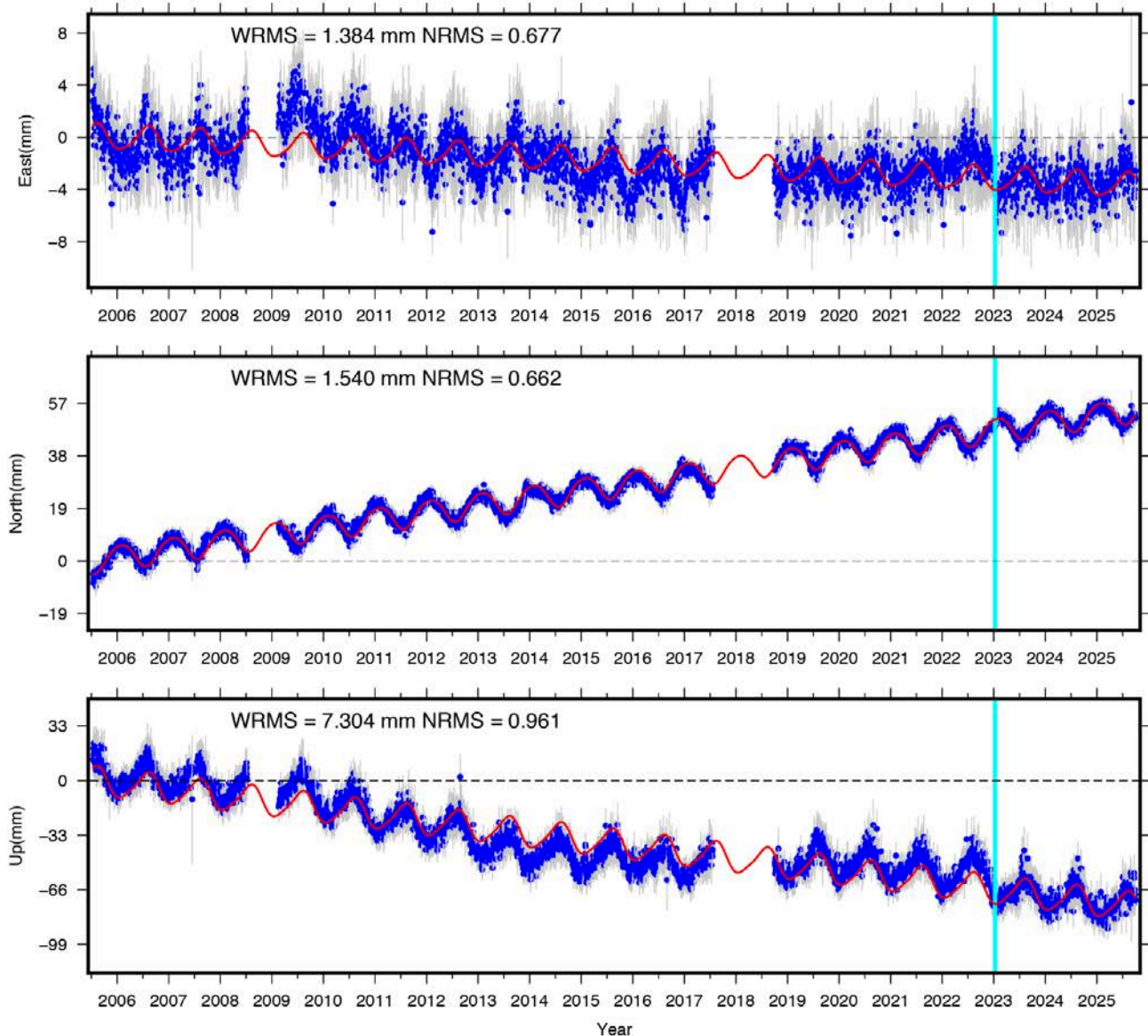


Figura C.4. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione ANTA nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGB20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

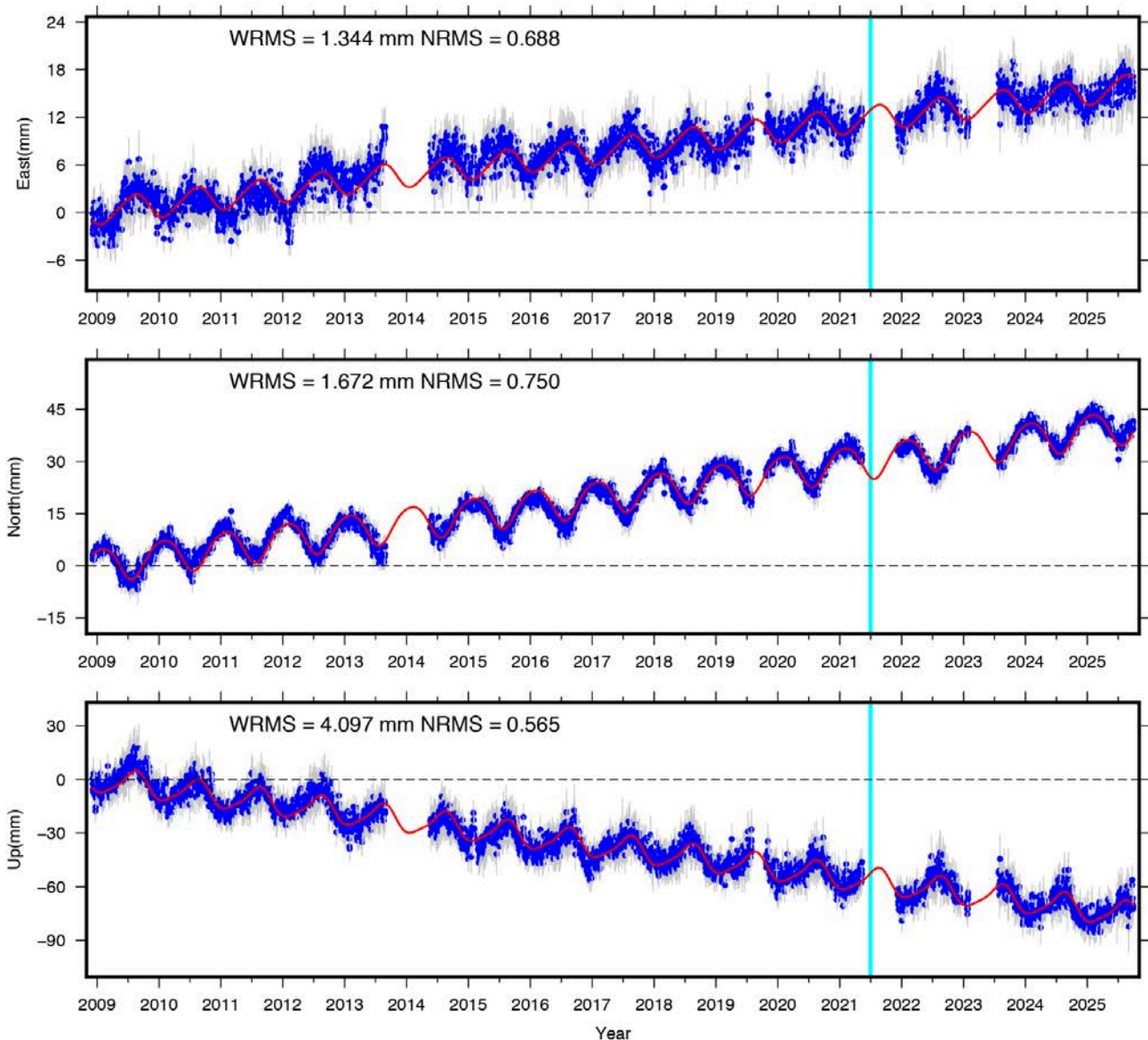
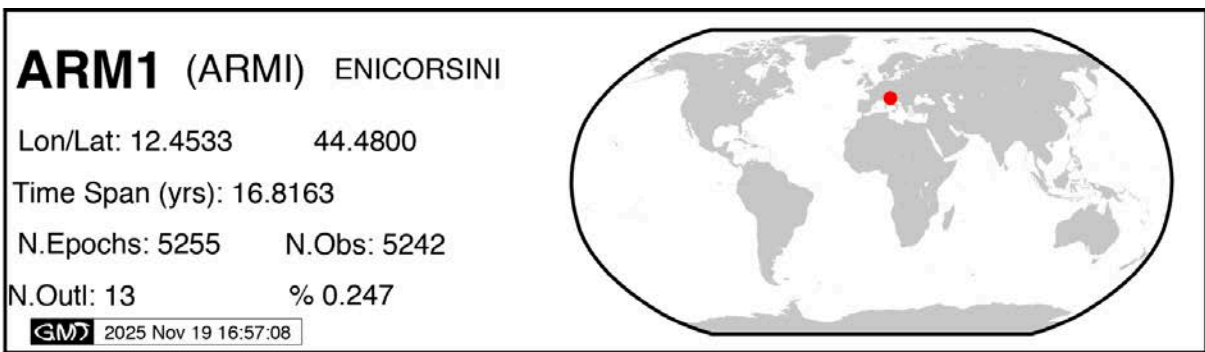


Figura C.5. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione ARMI nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

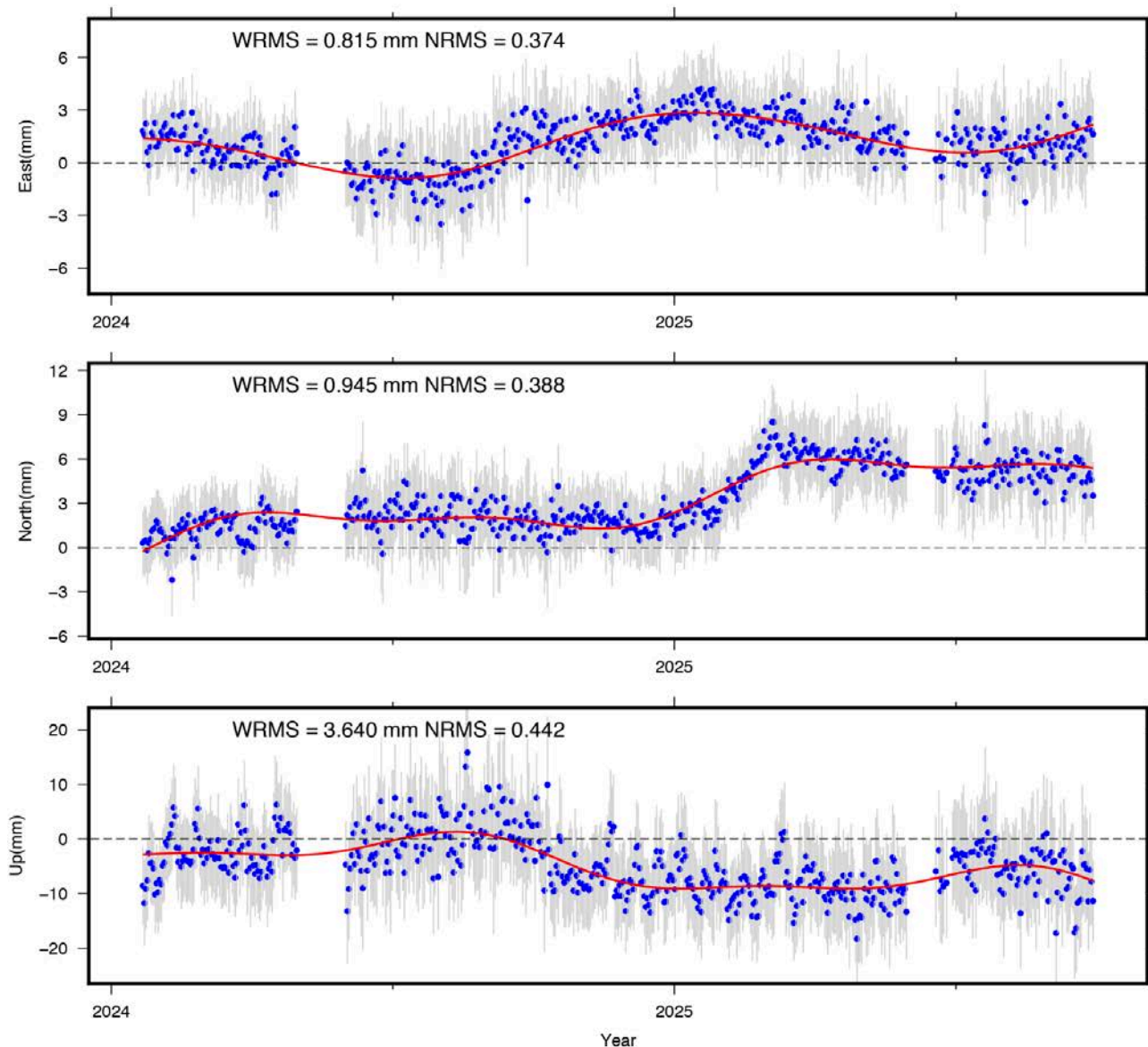
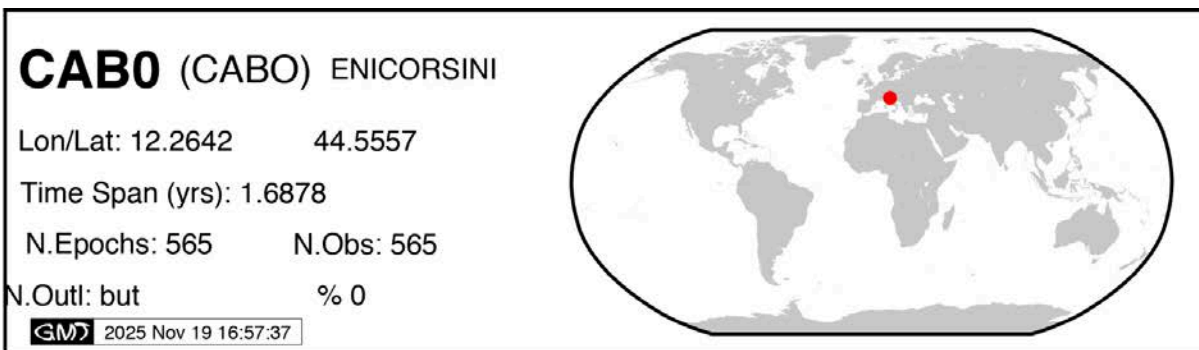


Figura C.6. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione CABO nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGB20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

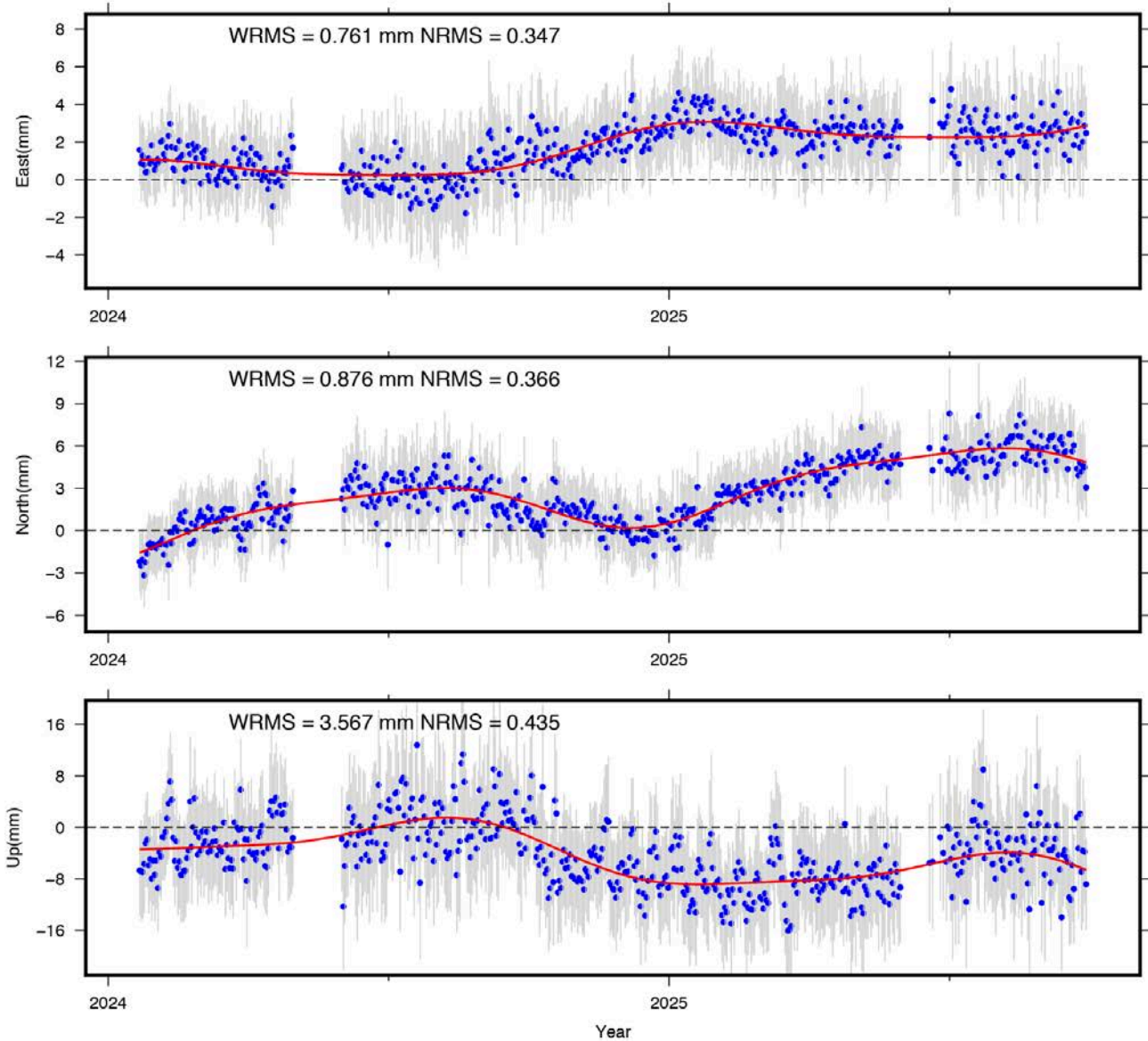
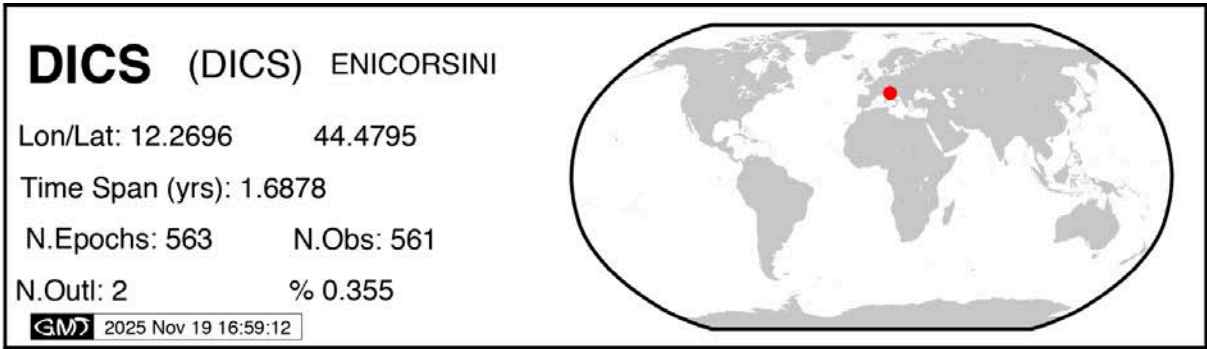


Figura C.7. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione DICS nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

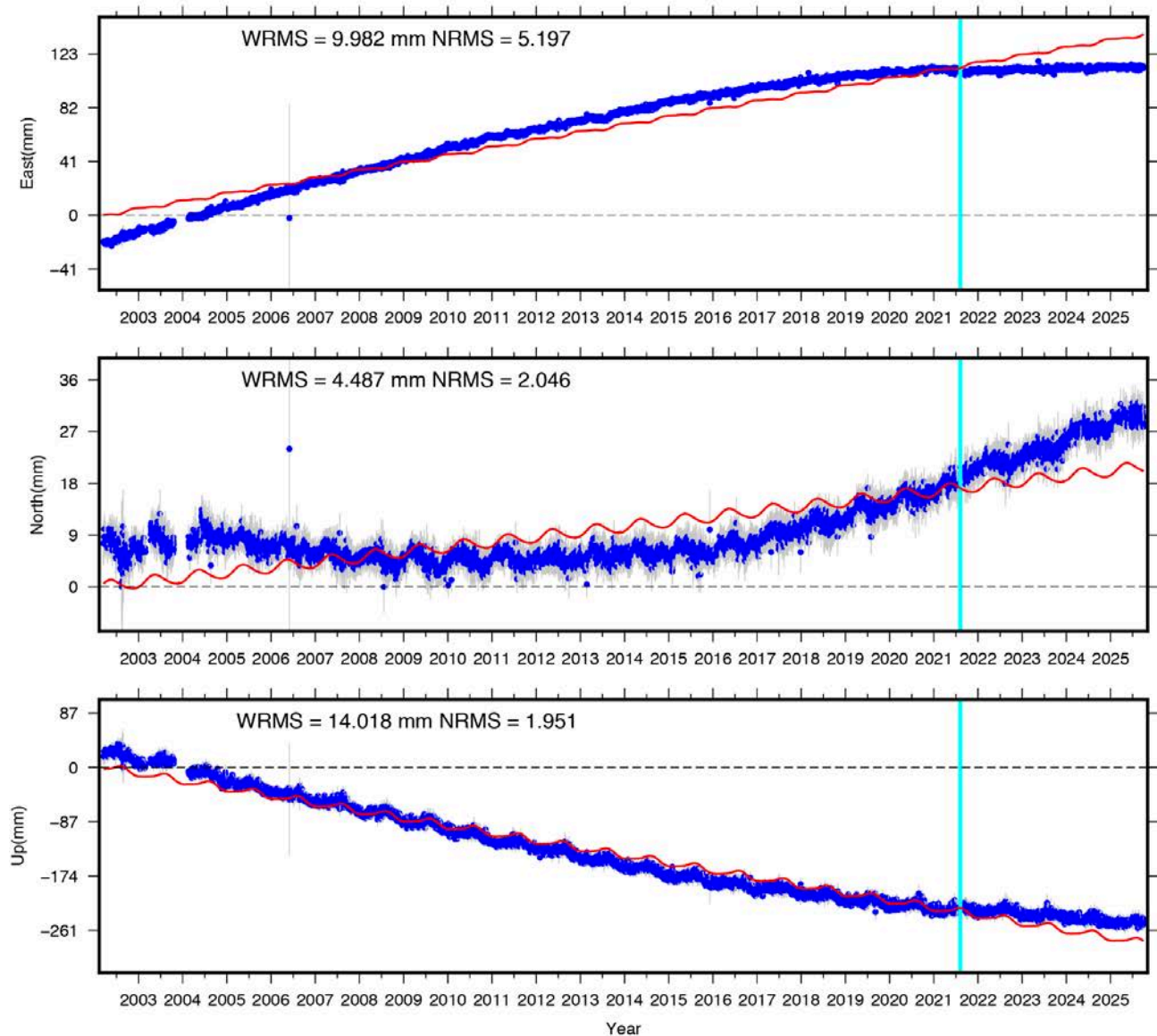
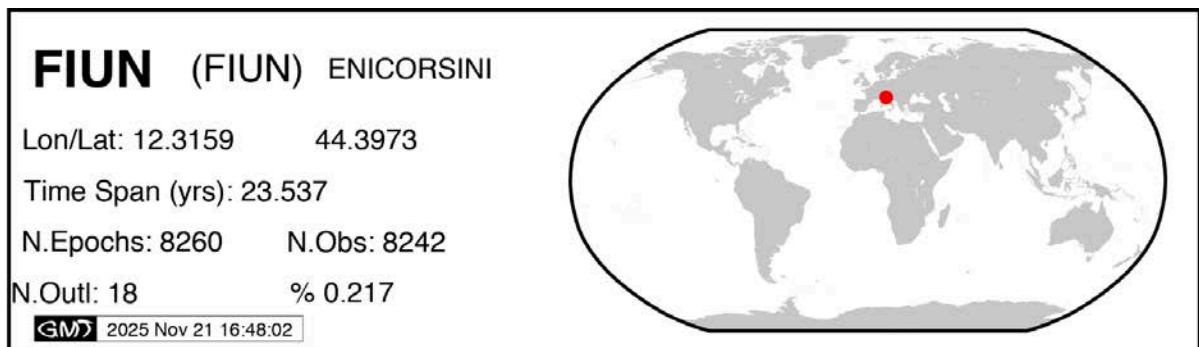


Figura C.8. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione FIUN nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

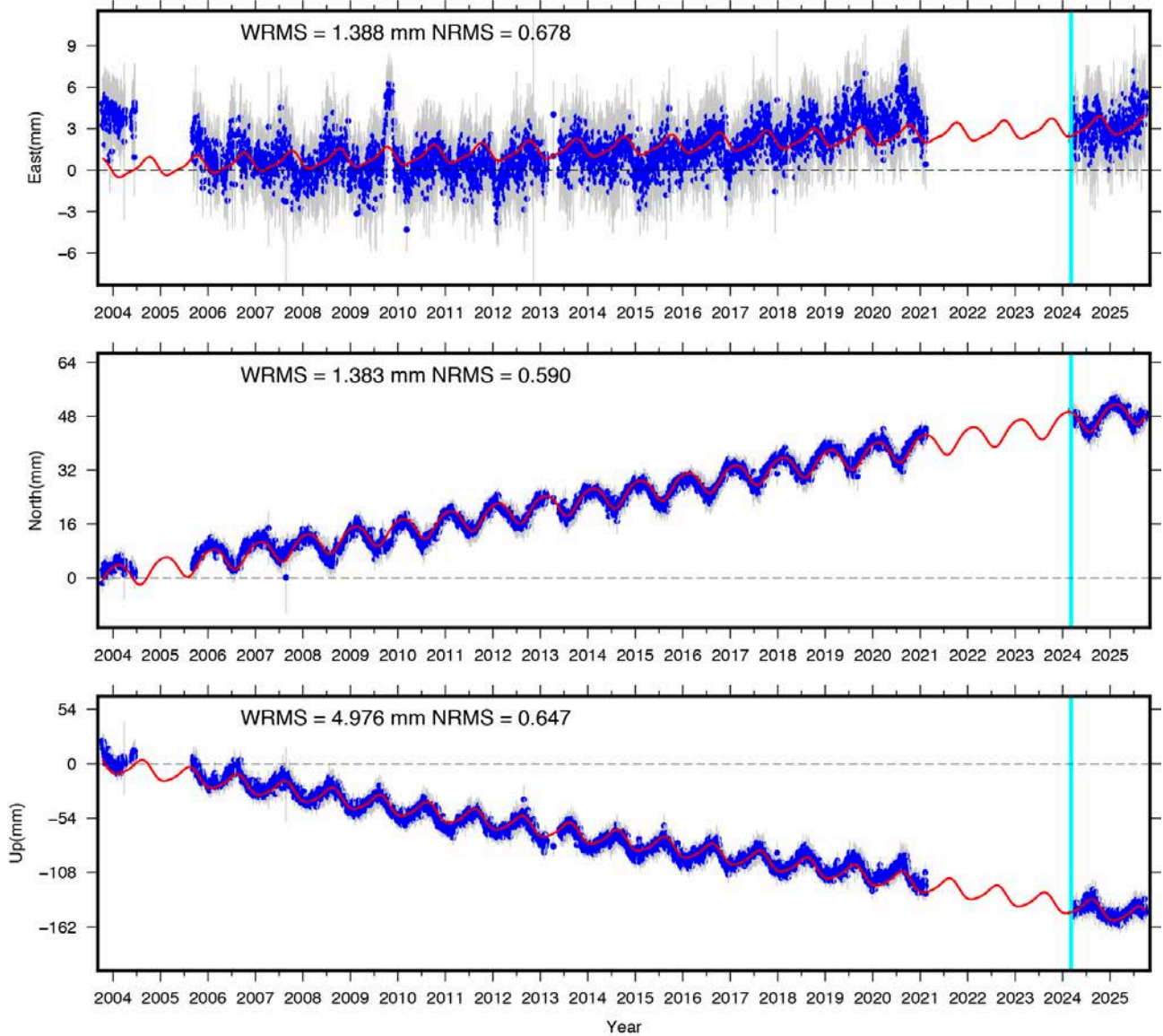
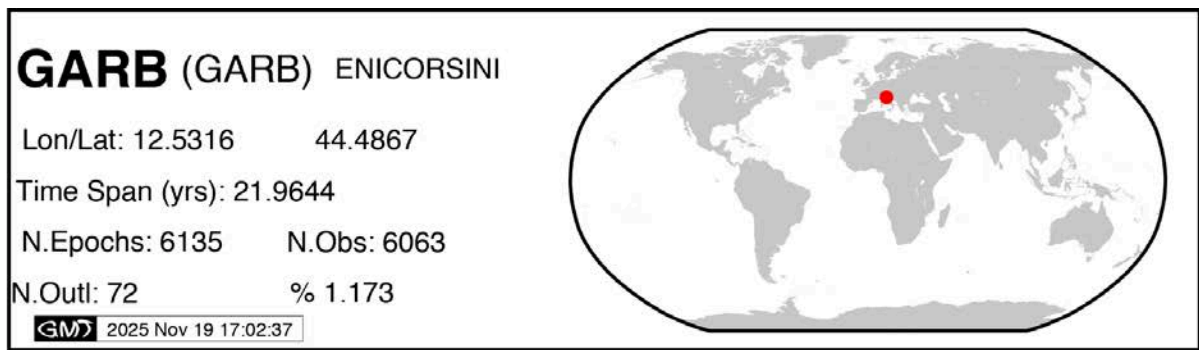


Figura C.9. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione GARB nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGB20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

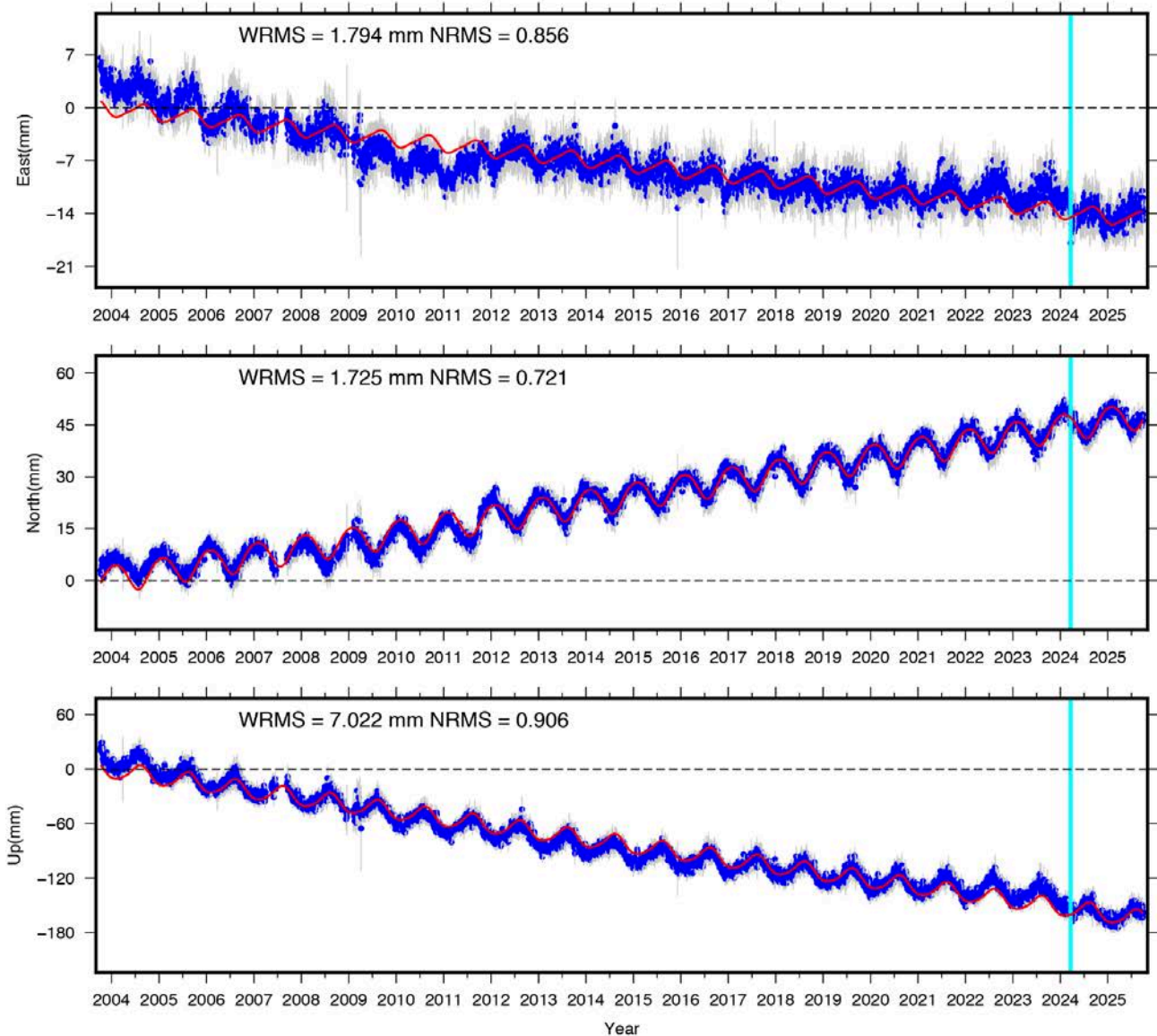


Figura C.10. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione GARC nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in Igb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

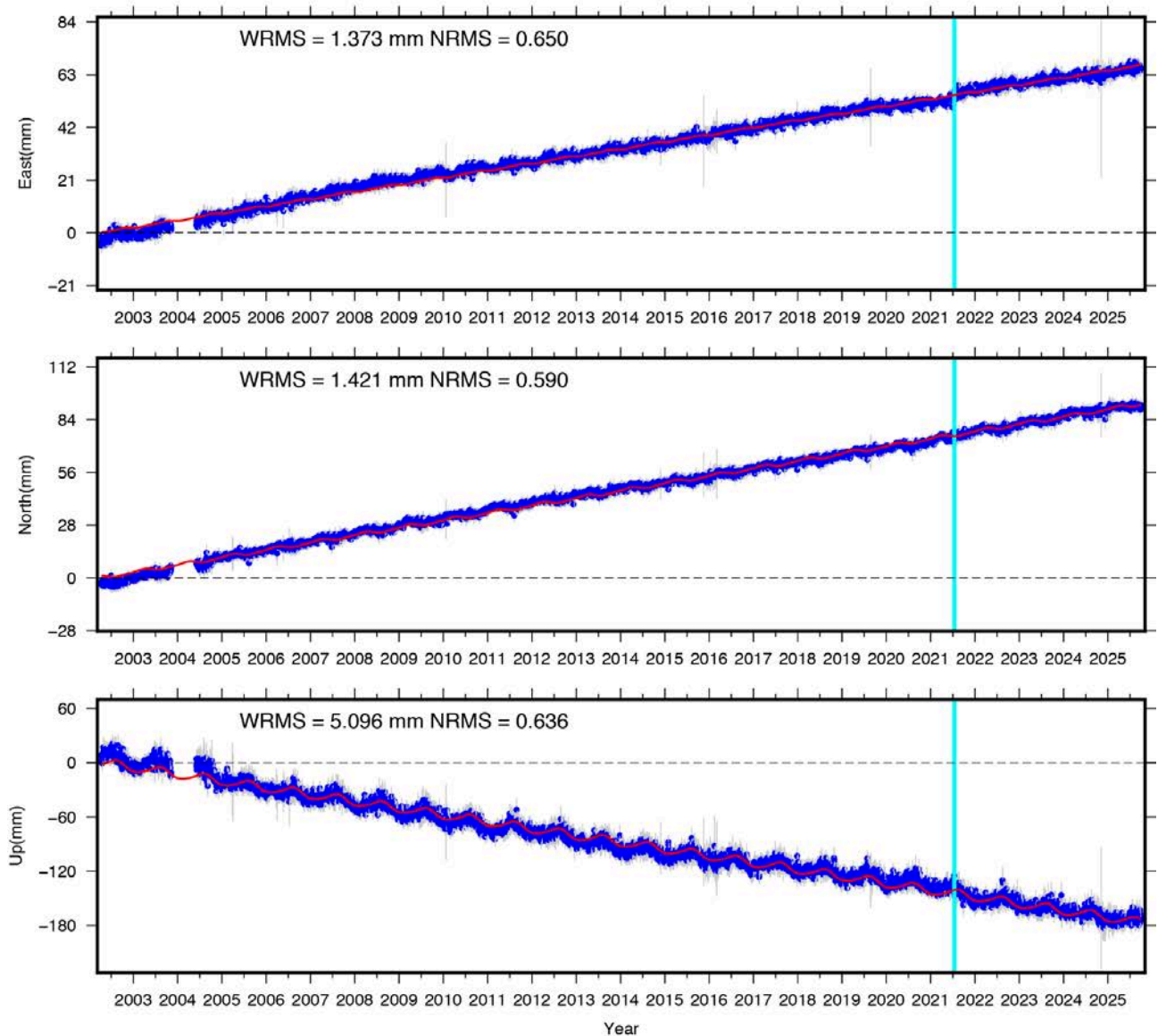
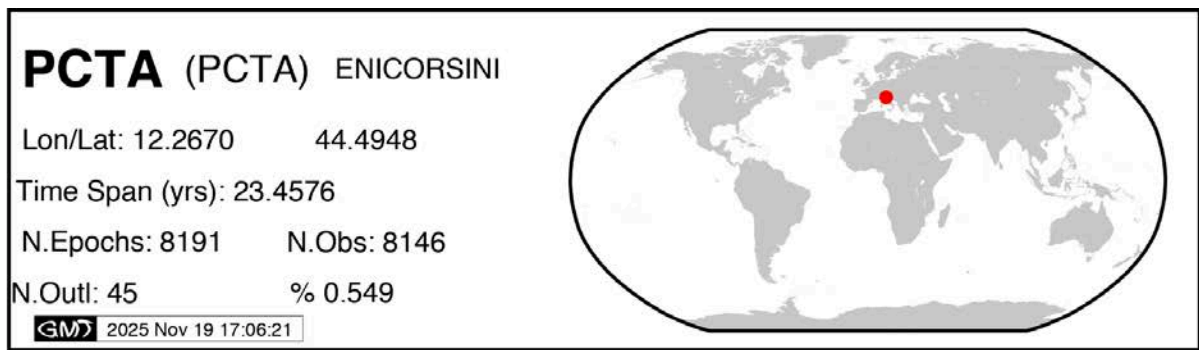


Figura C.11. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione PCTA nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

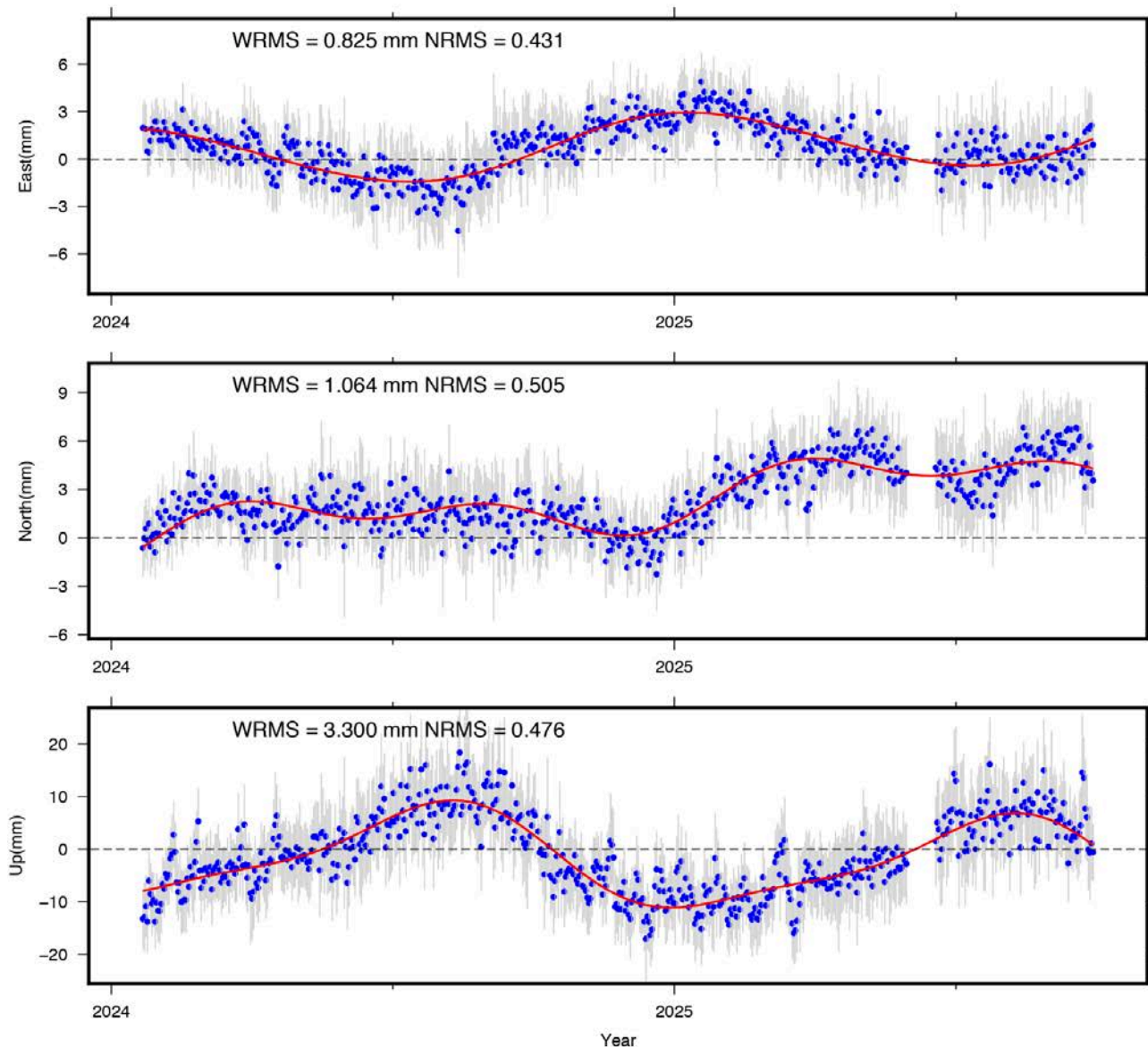
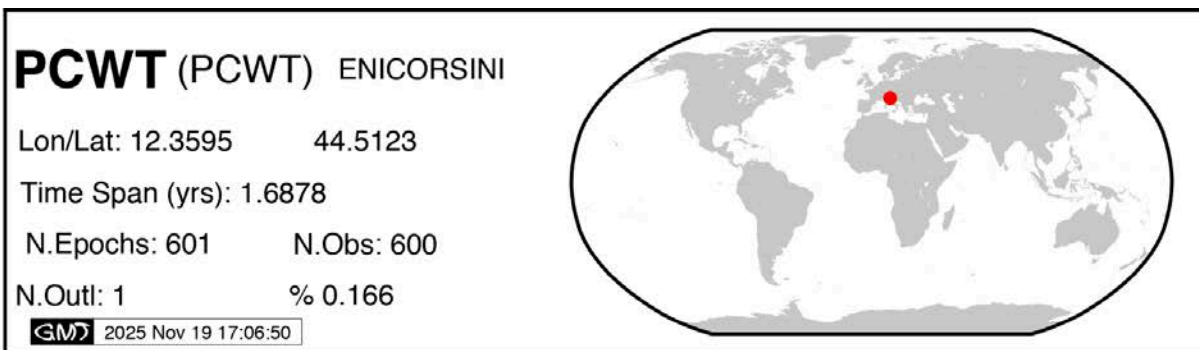


Figura C.12. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione PCWT nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in Igb20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

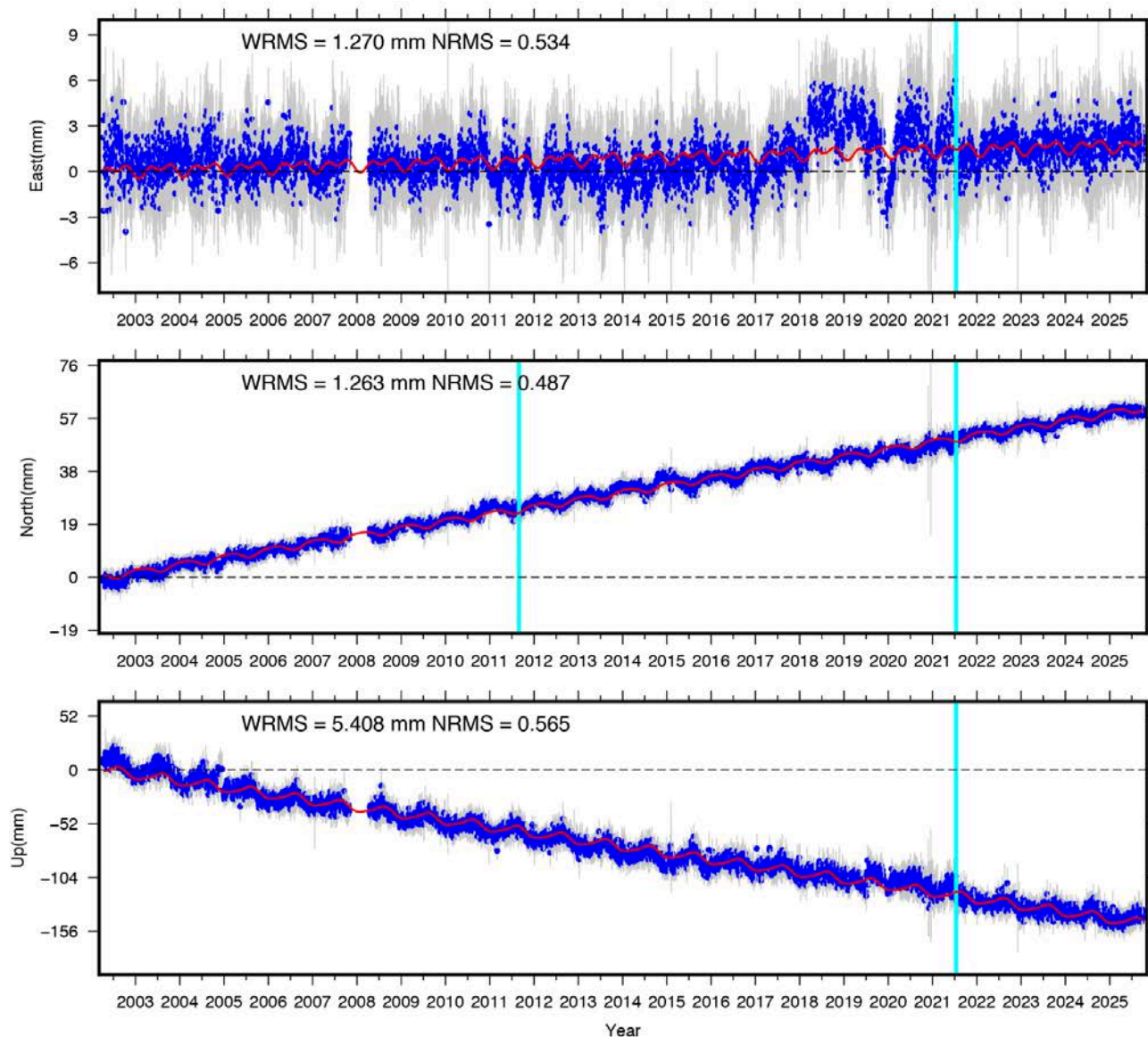


Figura C.13. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione SMAR nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGB20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento (corretto nella serie temporale) dovuto ad un cambio strumentale.

Bibliografia

1. Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Collilieux, X., Chanard, K., & Barnéoud, J. (2023). ITRF2020 plate motion model. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL106373. <https://doi.org/10.1029/2023GL106373>
2. Argnani, A. (1998). Structural elements of the Adriatic foreland and their relationships with the front of the Apennine fold-and-thrust belt. *Memorie della Societa Geologica Italiana*, 52, 647–654
3. Aster, R., B. Borchers, & C. Thurber (2012). *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Academic Press, 359 ppgg.
4. Bertello F., Fantoni R., Franciosi R., Gatti V., Ghielmi M., Pugliese A. (2010): From thrust-and-fold belt to foreland: hydrocarbon occurrences in Italy. In Vining B.A. & Pickering S.C. Eds.: *Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers - Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference*, 113 - 126.
5. Bevis, M., & Brown, A. (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal of Geodesy*, 88(3), 283–311. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0685-5>
6. Blewitt, G., and Lavallée, D. (2002). Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity. *J. Geophys. Res.* 107 (B7), 9–1. doi:10.1029/2001JB000570
7. Carannante, S., D'Alema, E., Augliera, P., and Franceschina, G. (2020). Improvement of Microseismic Monitoring at the Gas Storage Concession “Minerbio Stocaggio” (Bologna, Northern Italy). *J. Seismol.* 24, 967–977. doi:10.1007/s10950-019-09879-2
8. Cessaro, R. K. (1994). Sources of primary and secondary microseisms, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, no. 1, 142–148, doi: 10.1785/BSSA0840010142.
9. Comunicato Eni-Snam (2024): Eni e Snam avviano Ravenna CCS, primo progetto di cattura e stoccaggio della CO₂ in Italia. San Donato Milanese, 3/9/2024. Disponibile al link: <https://www.snam.it/it/media/news-e-comunicati-stampa/comunicati-stampa/2024/eni-e-snam-avviano-ravenna-cs-in-italia.html> (Ultimo accesso: 22/10/2025).
10. Daley, T.M., Miller, D.E., Dodds, K., Cook, P. & Freifeld, B.M., (2015). Field testing of modular borehole monitoring with simultaneous distributed acoustic sensing and geophone vertical seismic profiles at Citronelle, Alabama, *Geophys. Prospect.*, 64(5), 1318–1334.
11. Daley, T.M. et al., 2013. Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (das) for subsurface seismic monitoring, *Leading Edge*, 32(6), 699–706.
12. Decreto Ministeriale del 26 gennaio 2023. Disponibile sul BUIG del 31 gennaio 2023 al link: <https://unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/67-1.pdf> (Ultimo accesso: 22/10/2025).
13. Distributed Acoustic Sensing (DAS) Data in Borehole Installations, *Seismol. Res. Lett.* 96, 1703–1718, doi: 10.1785/0220240292.
14. Figlioli A, Vitale G, Taroni M, D'Alessandro A. Tremors—A Software App for the Analysis of the Completeness Magnitude. *Geosciences*. 2024; 14(6):149. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060149>
15. 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. *Mar. Pet. Geol.*, 42, 50–81.
16. Gibbons J.D. (1985): *Nonparametric Statistical Inference*. Ed. M. Dekker, 408 pp.
17. Harris, C.R., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature* 585, 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
18. Hartog, A., & Kader, K. (2012). U.S. Patent Application No. 13/221,280.
19. Jousset, P., et al., 2022. Fibre optic distributed acoustic sensing of volcanic events, *Nat. Commun.*, 13(1), 1753.
20. Karrenbach, M., Cole, S., Ridge, A., Boone, K., Kahn, D., Rich, J., Silver, K. & Langton, D., 2019. Fiber-optic distributed acoustic sensing of microseismicity, strain and temperature during hydraulic fracturing, *Geophysics*, 84(1), D11–D23.
21. Karrenbach, M., Kahn, D., Cole, S., Ridge, A., Boone, K., Rich, J., Silver, K. & Langton, D., (2017). Hydraulic-fracturing-induced strain and microseismic using in situ distributed fiber-optic sensing, *Leading Edge*, 36(10), 837–844.
22. Klaasen, S., Paitz, P., Lindner, N., Dettmer, J. & Fichtner, A., (2021). Distributed acoustic sensing in volcano-glacial environments-mount meager, british columbia, *J. geophys. Res.: Solid Earth*, 126(11), e2021JB022358.

23. Korres, G., et al. (2023). Mediterranean Sea Waves Analysis and Forecast (Copernicus Marine Service MED-Waves, MEDWAM4 system) (Version 1) [Data set]. Copernicus Marine Service (CMS), <https://doi.org/10.25423/CMCC/>
24. Krischer, L., et al. (2015) ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem Computational Science & Discovery, 8(1), 014003. DOI: 10.1088/1749-4699/8/1/014003
25. Lellouch, A., Lindsey, N. J., Ellsworth, W. L. & Biondi, B. L., 2020. Comparison between distributed acoustic sensing and geophones: downhole microseismic monitoring of the forge geothermal experiment, *Seismol. Soc. Am.*, 91(6), 3256–3268.
26. Lellouch, A., Schultz, R., Lindsey, N. J., Biondi, B. & Ellsworth, W. L., 2021. Low-magnitude seismicity with a downhole distributed acoustic sensing array—examples from the forge geothermal experiment, *J. geophys. Res.:Solid Earth*, 126(1), e2020JB020462.
27. Lellouch, A. & Biondi, B. L., 2021. Seismic applications of downhole das, *Sensors*, 21(9), 2897.
28. Li, Z., Shen, Z., Yang, Y., Williams, E., Wang, X. & Zhan, Z., 2021. Rapid response to the 2019 ridgecrest earthquake with distributed acoustic sensing, *AGU Adv.*, 2(2), e2021AV000395.
29. Lindsey, Nathaniel J., et al. «Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields». *Geophysical Research Letters*, vol. 44, fasc. 23, dicembre 2017. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1002/2017GL075722>.
30. Malagnini, L., Herrmann, R. B., Munafò, I., Buttinelli, M., Anselmi, M., Akinci, A., et al. (2012). The 2012 Ferrara Seismic Sequence: Regional Crustal Structure, Earthquake Sources, and Seismic hazard. *Geophys. Res. Lett.* 39, a-n. doi:10.1029/2012GL053214
31. Marzorati S., Cattaneo M. (2016): Stima automatica della magnitudo minima rilevabile dalla rete sismica ReSIICO, *Quaderni di Geofisica*, Anno 2016, 136, pp.21
32. MATLAB version: 9.13.0 (R2022b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2022.
33. McNamara, D., and R. Buland (2004). Ambient noise levels in the Continental United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 94, 1517–1527, doi: 10.1785/012003001.
34. Moser, T. J., et al. (1992). Hypocenter Determination in Strongly Heterogeneous Earth Models Using the Shortest Path Method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 97, fasc. B5, pp. 6563–72. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1029/91JB03176>.
35. Munafò Irene, L. Malagnini, L. Chiaraluce; On the Relationship between M_w and M_L for Small Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2016; 106 (5): 2402–2408. doi: <https://doi.org/10.1785/0120160130>
36. Pecci, D., S. Cesca, P. Niemz, K. Pankow, G. Carelli, and F. Grigoli (2024). Noise Analysis of
37. Peterson J.R. (1993): Observations and modeling of seismic background noise Open-File Report 93-322. <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
38. Pezzo, G., Petracchini, L., Devoti, R., Maffucci, R., Anderlini, L., Antoncicchi, I., et al. (2020). Active fold-thrust belt to foreland transition in northern Adria, Italy, tracked by seismic reflection profiles and GPS offshore data. *Tectonics*, 39, e2020TC006425. <https://doi.org/10.1029/2020TC006425>
39. Polcari, M., Secreti, V., Anderlini, L., Albano, M., Palano, M., Serpelloni, E., Stramondo, S., Trasatti, E., Pezzo, G. (2022): Multi-technique geodetic detection of onshore and offshore subsidence along the Upper Adriatic Sea coasts. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 108, 102756, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102756>
40. Postpischl D., (1985). Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980. Progetto Finalizzato Geodinamica. *Quaderni de La Ricerca Scientifica*, n. 114, vol. 2B
41. Relazione conclusiva DICAM (2024): Supervisione di campagna, controllo delle misure, certificazione di qualità, omogeneizzazione dei dati e calcolo della nuova rete di livellazione geometrica, di 250 Km lineari circa, opportunamente progettata per il monitoraggio della costa adriatica, tra le Valli di Comacchio e Cervia, durante l'esecuzione del progetto pilota Eni CCS.
42. Report Eni (2024): Eni a Ravenna - Report locale di sostenibilità. Disponibile al link: <https://www.eni.com/content/dam/enicom/documents/ita/sostenibilita/2024/local-report/Eni-Local-Report-Ravenna-2024.pdf> (Ultimo accesso: 22/10/2025).
43. Rossi, C., F. Grigoli, P. Gasperini, S. Gandolfi, C. Cocorullo, T. Gukov, and P. Macini (2023). Seismic noise reduction as a function of depth recorded by a vertical array installed in a 285-m-deep borehole at a gas storage field in northern Italy, *Seismol. Res. Lett.* 94, no. 4, 1925–1935, doi: 10.1785/0220220337.

44. Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A., (2022). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>
45. Schorlemmer, D., F. Mele, and W. Marzocchi (2010), A completeness analysis of the National Seismic Network of Italy, *J. Geophys. Res.*, 115, B04308, doi:10.1029/2008JB006097.
46. Serpelloni, E., Cavaliere, A., Martelli, L., Pintori, F., Anderlini, L., Borghi, A., Randazzo, D., Bruni, S., Devoti, R., Perfetti, P., Cacciaguerra, S. (2022). Surface Velocities and Strain-Rates in the Euro-Mediterranean Region From Massive GPS Data Processing. *Front. Earth Sci.* 10:907897. doi: 10.3389/feart.2022.907897
47. Shinohara, Masanao, et al. «Performance of Seismic Observation by Distributed Acoustic Sensing Technology Using a Seafloor Cable Off Sanriku, Japan». *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, aprile 2022, p. 844506. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.844506>.
48. Teatini, P., M. Ferronato, G. Gambolati, and M. Gonella (2006), Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend, *Water Resour. Res.*, 42, W01406, doi:10.1029/2005WR004242.
49. Vannoli, P., Basili, R., & Valensise, G. (2004). New geomorphic evidence for anticlinal growth driven by blind-thrust faulting along the northern Marche coastal belt (central Italy). *Journal of Seismology*, 8(3), 297–312. <https://doi.org/10.1023/B:JOSE.0000038456.00574.e3>
50. Vassallo, M., Satriano, C., & Lomax, A. (2012). Automatic picker developments and optimization: A strategy for improving the performances of automatic phase pickers. *Seismological Research Letters*, 83(3), 541.
51. Virtanen, P., et al.. (2020) SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
52. Virtanpelli, C., Mallinson D., 2015. High-frequency seismic noise generated from breaking shallow water ocean waves and the link to time-variable sea states, *Geophys. Res. Lett.*, 42(20), 8563–8569. 10.1002/2015GL066126
53. Wang, X., Zhan, Z., Williams, E. F., Herráez, M. G., Martins, H. F. & Karrenbach, M., 2021. Ground vibrations recorded by fiber-optic cables reveal traffic response to covid-19 lockdown measures in Pasadena, California, *Commun. Earth Environ.*, 2(1), 160.
54. Webster, P., Wall, J., Perkins, C. & Molenaar, M., 2013. Microseismic detection using distributed acoustic sensing, in 2013 SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2459–2463
55. Welch, P. D. (1967). The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms (PDF), *IEEE Trans. on Audio and Electroacoustics*, AU-15 (2): 70–73,, doi:10.1109/TAU.1967.1161901
56. Wessel, P., et al. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
57. Willis, M.E., et al. (2021). Important Aspects of Acquiring Distributed Acoustic Sensing (DAS) Data for Geoscientists. In *Distributed Acoustic Sensing in Geophysics: Methods and Applications*. Chap. 2, <https://doi.org/10.1002/9781119521808.ch2>
58. Zaccarelli L, Anselmi M, Vassallo M, Munafò I, Faenza L, Sandri L, Garcia A, Polcari M, Pezzo G, Serpelloni E, Anderlini L, Errico M, Molinari I, Zerbinato G and Morelli A (2021) Practical Issues in Monitoring a Hydrocarbon Cultivation Activity in Italy: The Pilot Project at the Cavone Oil Field. *Front. Earth Sci.* 9:685300. doi: 10.3389/feart.2021.685300
59. Zeng, X., Bao, F., Thurber, C. H., Lin, R., Wang, S., Song, Z. & Han, L., 2022. Turning a telecom fiber-optic cable into an ultradense seismic array for rapid postearthquake response in an urban area, *Seismol. Soc. Am.*, 93(2A), 853–865.
60. Zhan, Zhongwen. «Distributed Acoustic Sensing Turns Fiber-Optic Cables into Sensitive Seismic Antennas». *Seismological Research Letters*, vol. 91, fasc. 1, gennaio 2020, pp. 1–15. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1785/0220190112>.