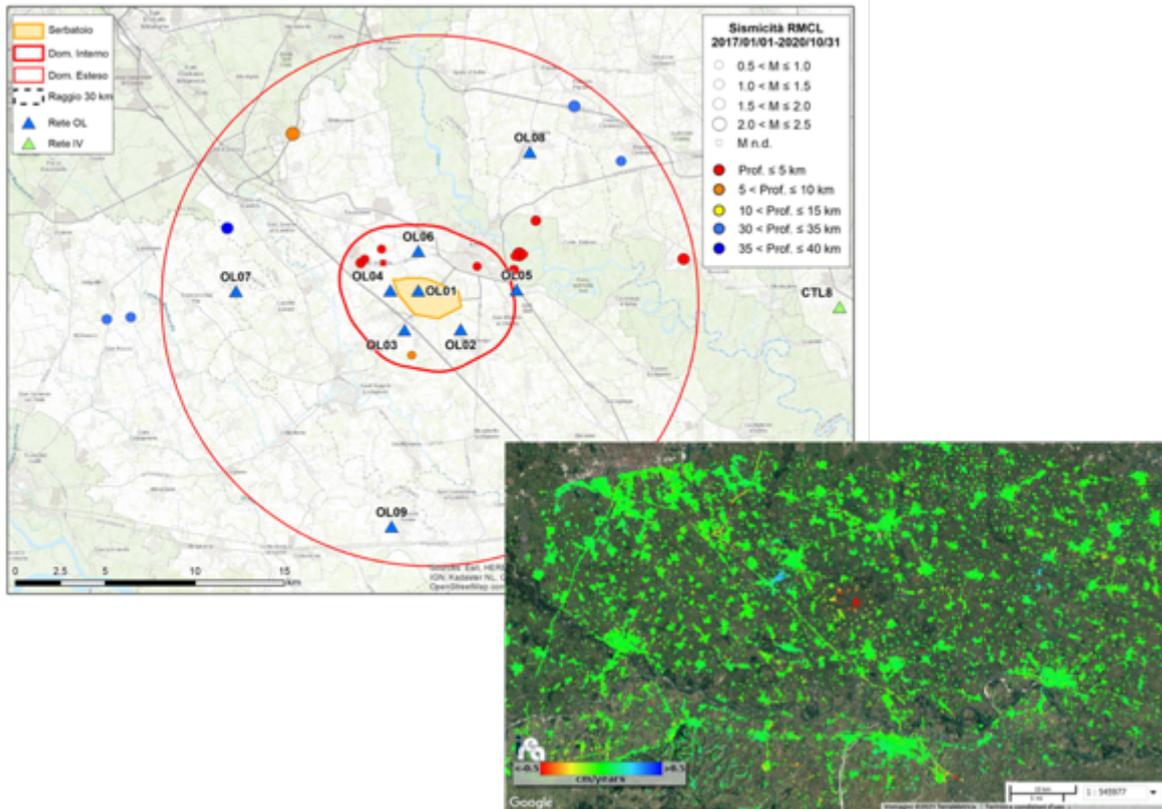




## CONCESSIONE DI STOCCAGGIO DI GAS NATURALE "CORNEGLIANO STOCCAGGIO"



## MONITORAGGIO SISMICO E DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

Anno di esercizio 2024 – Prima relazione semestrale

2024.1

### **Struttura Preposta al Monitoraggio:**

*Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale  
Centro di Ricerche Sismologiche (CRS) - OGS*

*Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)  
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – IREA-CNR*

Sgonico, 26 agosto 2024

*A cura di:*

*Mariangela Guidarelli<sup>1</sup>, Riccardo Lanari<sup>2</sup>, Paolo Bernardi<sup>1</sup>, Manuela Bonano<sup>2</sup>,  
Claudio De Luca<sup>2</sup>, Fabio Franceschinell<sup>1</sup>, Andrea Magrin<sup>1</sup>, Luca Moratto<sup>1</sup>, Laura  
Peruzza<sup>1</sup>, Marco Romanelli<sup>1</sup>, Maria Adelaide Romano<sup>1</sup>, Denis Sandron<sup>1</sup>, Marco  
Santulin<sup>1</sup>, Lavinia Tunini<sup>1</sup>, Giovanni Zeni<sup>2</sup>, Ivana Zinno<sup>2</sup>, David Zuliani<sup>1</sup>.*

<sup>1</sup>OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale  
Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)

<sup>2</sup>IREA-CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell’Ambiente (IREA)  
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Coordinatore della Struttura Preposta al Monitoraggio e responsabile scientifico  
per l’OGS: *Dott.ssa Mariangela Guidarelli*

Responsabile scientifico per l’IREA-CNR: *Dott. Ing. Riccardo Lanari*

Visto e approvato: Per l’OGS  
il Direttore del CRS  
*Prof. Matteo Picozzi*

Firmato digitalmente da

**MATTEO  
PICOZZI**

Per l’IREA-CNR  
il Direttore dell’IREA-CNR  
*Dott. Ing. Francesco Soldovieri*

Signature date and time:  
2024/09/09 12:43:43

## Indice

<b>INDICE</b> .....	III
<b>ELENCO DELLE ABBREVIAZIONI</b> .....	IV
<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	V
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	VIII
<b>SOMMARIO</b> .....	1
<b>1. MONITORAGGIO SISMICO</b> .....	2
<b>1.1 LA RETE DI MONITORAGGIO DI CORNEGLIANO LAUDENSE (RMCL)</b> .....	3
<b>1.2 OPERATIVITÀ DELLA RETE SISMICA</b> .....	9
<b>1.3 EVENTI RILEVATI DALLA RMCL E ATTIVITÀ DI STOCCAGGIO</b> .....	10
<b>2. MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI</b> .....	17
<b>2.1 ELABORAZIONE DEI DATI DELLA STAZIONE GNSS OL01</b> .....	18
<b>2.1.1 DATI ELABORATI</b> .....	18
<b>2.1.2 RISULTATI OTTENUTI</b> .....	20
<b>2.2 ANALISI INTERFEROMETRICA DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO RELATIVE AL PERIODO 2015-2024 (DATI SENTINEL-1)</b> .....	30
<b>2.2.1 ANALISI SBAS SENTINEL-1: ORBITE DISCENDENTI (PERIODO MARZO 2015 – APRILE 2024)</b> .....	32
<b>2.2.2 ANALISI SBAS SENTINEL-1: ORBITE ASCENDENTI (PERIODO MARZO 2015 – APRILE 2024)</b> .....	36
<b>2.2.4 ANALISI SBAS SENTINEL-1: UNO ZOOM SULL'AREA IN DEFORMAZIONE IN PROSSIMITÀ DEL SITO DI STOCCAGGIO DI CORNEGLIANO LAUDENSE.</b> .....	44
<b>3. CONCLUSIONI</b> .....	48
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	50
<b>APPENDICE A – DISPONIBILITÀ DEI DATI REGISTRATI DALLA RMCL</b> .....	53
<b>APPENDICE B – LISTA DEGLI EVENTI SISMICI RICONOSCIUTI NELL'INTERA AREA DI RILEVAZIONE</b> .....	57
<b>APPENDICE C – SERIE TEMPORALI DELLA RETE GNSS LODI NEL SISTEMA DI RIFERIMENTO ITRF14</b> .....	2
<b>APPENDICE D – STATISTICA DEGLI ACCESSI AL SITO DELLA RETE DI MONITORAGGIO DI CORNEGLIANO LAUDENSE</b> .....	9

## Elenco delle abbreviazioni

- AE Area Esterna di rilevazione della rete di monitoraggio
- BSI Bollettino Sismico Italiano
- CPTI15 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)
- CSI1.1 Catalogo della Sismicità Italiana (<https://csi.rm.ingv.it/>)
- DBMI15 Database Macrosismico Italiano (<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)
- DE Dominio Interno di rilevazione della rete di monitoraggio RMCL (MiSE-UNMIG, 2014)
- DI Dominio Esteso di rilevazione della rete di monitoraggio RMCL (MiSE-UNMIG, 2014)
- DInSAR Differential SAR Interferometry
- DISS Database delle Sorgenti Sismiche Italiane (<https://diss.ingv.it/>)
- EMSC European-Mediterranean Seismological Centre
- GAMIT/GLOBK suite di programmi sviluppato dal MIT per analizzare dati GPS, principalmente per studiare la deformazione della crosta terrestre
- GNSS Global Navigation Satellite System
- GPS Global Positioning System
- LOS Line of sight
- MiSE-UNMIG Ministero per lo sviluppo economico - Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse
- ML Magnitudo locale
- NHNM New High Noise Model (McNamara and Buland, 2004)
- NLNM New Low Noise Model (McNamara and Buland, 2004)
- PDF Probability Density Function
- PSD Power Spectral Density
- RMCL Rete di Monitoraggio di Corneigliano Laudense
- RSNC Rete Sismica Nazionale Centralizzata (gestita da INGV)
- RSNI Regional Seismic network of Northwest Italy (gestita dall'Università di Genova)
- SAR Synthetic Aperture Radar
- SBAS Small BAseLine Subset
- SPIN Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia

## Indice delle figure

**Figura 1** - Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee rosse indicano i perimetri del Dominio Interno (DI, linea spessa) e del Dominio Esteso (DE, linea sottile) di rilevazione. La linea tratteggiata indica la distanza di 30 km dal sito di stoccaggio e definisce l'Area Esterna. .... 4

**Figura 2** - Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana e nell'area Occidentale si riconoscono le stazioni di INGV e RSNI più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite dall'OGS nel periodo di tempo considerato, anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, oltre alle stazioni della Provincia Autonoma di Trento. Il rettangolo punteggiato di verde rappresenta l'area di riconoscimento dei terremoti regionali, indispensabile per evitare false identificazioni di eventi locali... 7

**Figura 3** - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2024, a distanza epicentrale  $\leq 30$  km dal sito di stoccaggio (a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione. .... 12

**Figura 4** - Forme d'onda registrate per l'evento ML2.6 del 25/2/2024 ore 10:32:42 avvenuto nell'Area Estesa. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu, le due componenti orizzontali rispettivamente in rosso (E-O) e verde (N-S)). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL08, OL05, OL06, OL10, OL01, OL02, OL04 e OL03. .... 14

**Figura 5** - (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard al giorno) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in entrata e uscita. (c) Volume complessivo del gas contenuto nel serbatoio naturale durante le attività dell'impianto, normalizzato al valore di volume massimo. I valori assoluti del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato commerciale sensibile e riservato. Continua alla pagina successiva..... 15

**Figura 6** - Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadramento di OL01. Queste stazioni sono CREA (Crema), CREM (Cremona), MIL2 (Milano), PAVI (Pavia). La posizione della stazione MILA, rimasta attiva fino al 8/2/2019, è indistinguibile da quella di MIL2 in questo grafico..... 19

**Figura 7** - Serie temporale di LODI (nel sistema di riferimento ETRF14) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. La retta interpolante sui grafici fornisce una stima di velocità con il relativo errore, visibile anche in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato). .... 23

**Figura 8** - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. .... 24

**Figura 9** - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. .... 25

**Figura 10** - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ETRF14. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. .... 26

- Figura 11** - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. .... 27
- Figura 12** - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. .... 28
- Figura 13** - Residui delle serie temporali Nord-Sud (dN), Est-Ovest (dE), Verticale (dU) delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. In colore sullo sfondo, i residui delle stazioni di riferimento: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2023). In viola, in primo piano, la stazione LODI a cui è stato tolto il trend delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per "agganciare" le serie temporali ed evidenziare, graficamente, l'anomalia di LODI abbiamo considerato come zero la media di LODI calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati). .... 29
- Figura 14** - Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti. .... 30
- Figura 15** - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire da Dicembre 2021. .... 33
- Figura 16** - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2024. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 17. .... 34
- Figura 17** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 16 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2024. .... 35
- Figura 18** - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire dal Dicembre 2021. .... 36
- Figura 19** - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2024. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 20. .... 37
- Figura 20** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 19 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).

L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2024..... 39

**Figura 21** - Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 23. .... 41

**Figura 22** - Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 24. .... 42

**Figura 23** - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 21 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente verticale dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). .... 43

**Figura 24** - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 22 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). .... 44

**Figura 25** - Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione. .... 45

**Figura 26.** Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione. .... 46

## **Indice delle Tabelle**

<b>Tabella 1</b> - Sommario delle stazioni della RMCL. Informazioni dettagliate si trovano nelle singole schede di stazione riportate nell' Appendice B della relazione di consegna della rete (Priolo et al., 2017). .....	3
<b>Tabella 2</b> - Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.....	5
<b>Tabella 3</b> - Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV, GU e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale Centralizzata gestita dall'INGV, alla Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale gestita dall'Università di Genova e alla Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale gestita da OGS.....	6
<b>Tabella 4</b> - Modello 1D utilizzato in questo studio per le localizzazioni degli eventi sismici. Le colonne indicano da sinistra a destra in successione: il numero di strato, la velocità $V_p$ , la profondità dello strato e il valore di $V_p/V_s$ .....	9
<b>Tabella 5</b> - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica e geodetica. ....	10
<b>Tabella 6</b> - Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, PAVI e del sito OL01. Tra settembre 2021 e gennaio 2022 le antenne e i ricevitori delle stazioni CREA, CREM, MIL2 e PAVI sono state sostituite. Qui sono riportati i modelli di antenna e ricevitore aggiornati; per i periodi precedenti si veda Priolo et al. (2021). ....	19
<b>Tabella 7</b> - Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF14 e ETRF14. Le stime ottenute per la stazione LODI sono indicate in grassetto e colore rosso. Si ricorda che la migliore accuratezza nella stima delle velocità che si può raggiungere, considerando serie temporali lunghe e monumentazione stabile, è di 0.2 mm/anno sulle componenti orizzontali e 0.5 mm/anno sulla verticale (Masson et al., 2019). .....	22
<b>Tabella 8</b> - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.....	31
<b>Tabella 9</b> - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati. ....	32

## Sommario

Il presente documento descrive le attività effettuate nel periodo 1/11/2023-30/4/2024 per l'esercizio del monitoraggio integrato svolto dall'OGS e dall'IREA-CNR presso la concessione di stoccaggio gas naturale denominata "Cornegliano Stoccaggio". Esso costituisce il primo rapporto previsto per l'anno di esercizio 2024, secondo contratto. L'attività di monitoraggio integrato è commissionata da Ital Gas Storage S.p.A. (che nel 2024 ha cambiato la ragione sociale in IGS S.p.A.) all'OGS e all'IREA-CNR con il Contratto dd. 27/1/2023 con cui viene disciplinato l'esercizio dell'infrastruttura di monitoraggio sismico e la gestione del sistema di monitoraggio integrato. L'infrastruttura di monitoraggio sismico di Cornegliano Laudense (di seguito denominata *Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense – RMCL*) e le procedure di acquisizione ed elaborazione dati sono quelle descritte nella relazione sulle attività iniziali datata 13/11/2018 (Priolo et al., 2018).

In sintesi, il presente rapporto è organizzato nel modo seguente:

- il Capitolo 1 descrive il **monitoraggio sismico**: (1.1) cenni sulle caratteristiche della rete e sulle procedure di identificazione e localizzazione degli eventi sismici; (1.2) lo stato di funzionamento della rete e del sistema di acquisizione dati; (1.3) risultati del monitoraggio sismico ottenuti per l'intero periodo di osservazione 1/1/2017-30/4/2024 con una descrizione della sismicità rilevata.
- il Capitolo 2 descrive il **monitoraggio delle deformazioni superficiali**. La prima parte del capitolo (Cap. 2.1) descrive la gestione della stazione GNSS OL01 e le elaborazioni svolte sui dati acquisiti dalla RETE LODI. La seconda parte (Cap. 2.2) descrive l'analisi interferometrica delle deformazioni del suolo completa fino alla data del 30/4/202.
- il Capitolo 3 contiene le **Conclusioni**.

Le Appendici, alla fine del documento, riportano i seguenti contenuti:

- Appendice A: grafici dello stato di funzionamento della rete in formato tabellare;
- Appendice B: risultati del monitoraggio sismico;
- Appendice C: serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08.
- Appendice D: statistiche delle visite al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense.

Come detto, il presente rapporto è stato redatto dai ricercatori e tecnologi dell'OGS e dell'IREA-CNR. I Capitoli 1 e 2.1 sono stati redatti dall'OGS; il Capitolo 2.2 è stato scritto dall'IREA-CNR. Le conclusioni, al Capitolo 3, sono state scritte congiuntamente.

# 1. Monitoraggio sismico

## 1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)

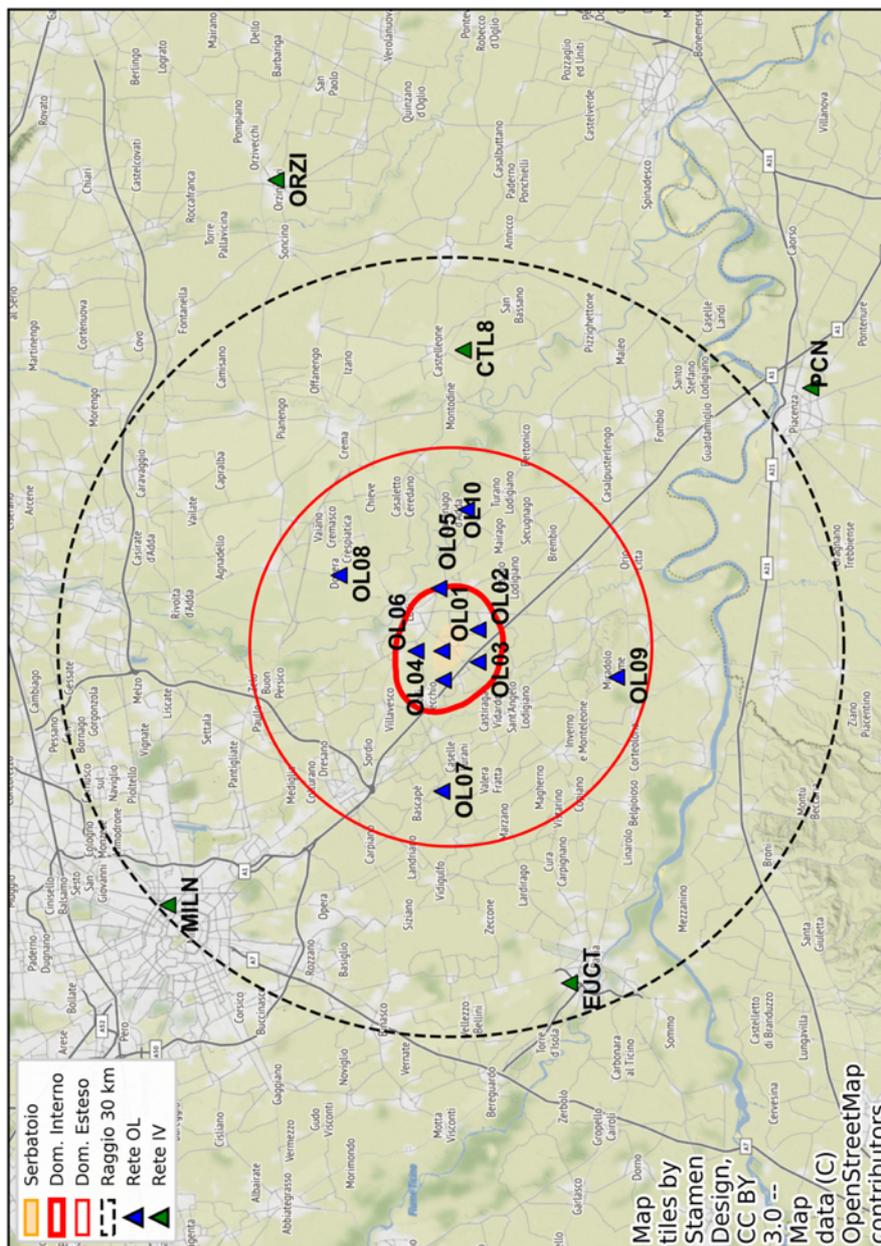
La RMCL è composta da dieci stazioni sismometriche e da una stazione geodetica GNSS permanente. Le stazioni sono indicate con la sigla OL01-OL10, in accordo al codice OL che è il codice internazionale di registrazione della RMCL. La [Tabella 1](#) ne riassume le principali informazioni, mentre la [Figura 1](#) mostra la mappa con la posizione delle stazioni. La data ufficiale di inizio operatività della RMCL è il giorno 1/1/2017.

La RMCL è integrata da alcune stazioni appartenenti alle reti regionali e alla rete nazionale gestite dall'OGS, dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e da altri Enti, che completano il perimetro esterno della RMCL a distanza di alcune decine di chilometri nelle varie direzioni. Le stazioni non gestite direttamente dall'OGS sono acquisite in modalità off-line.

Tutte le stazioni sismometriche della RMCL sono dotate di sismometro posto in pozzo, mediamente ad una profondità di 75 m, per ridurre i disturbi di carattere antropico e il rumore sismico che si propaga principalmente nello strato superficiale del suolo. La [Tabella 2](#) illustra la strumentazione con cui è equipaggiata la RMCL. I dati sono acquisiti con un campionamento di 200 Hz per i sismometri e di 100 Hz per gli accelerometri.

CODICE	LAT	LON	QUOTA (m s.l.m.)	NOME
<b>OL01</b>	45.291	9.464	72	<b>Cornegliano Laudense (Cluster A)</b>
<b>OL02</b>	45.266	9.485	71	<b>Massalengo</b>
<b>OL03</b>	45.266	9.453	70	<b>Cascina Castagna</b>
<b>OL04</b>	45.290	9.435	78	<b>Cascina Taietta</b>
<b>OL05</b>	45.293	9.526	75	<b>Cascina Cavigio</b>
<b>OL06</b>	45.309	9.464	77	<b>Cascina Bracca</b>
<b>OL07</b>	45.291	9.325	77	<b>Gugnano</b>
<b>OL08</b>	45.362	9.539	75	<b>Dovera</b>
<b>OL09</b>	45.170	9.438	70	<b>Miradolo</b>
<b>OL10</b>	45.274	9.604	67	<b>Cavenago d'Adda</b>

**Tabella 1** - Sommario delle stazioni della RMCL. Informazioni dettagliate si trovano nelle singole schede di stazione riportate nell' Appendice B della relazione di consegna della rete (Priolo et al., 2017).



**Figura 1** - Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee rosse indicano i perimetri del Dominio Interno (DI, linea spessa) e del Dominio Esteso (DE, linea sottile) di rilevazione. La linea tratteggiata indica la distanza di 30 km dal sito di stoccaggio e definisce l'Area Esterna.

<p><b>Acquisitore: Guralp-Minimus</b>                  Caratteristiche: 6 canali, 24 bit</p>		<p><b>Accelerometro: Guralp-Fortis</b>                  Componenti: 3                  Fondo scala: <math>\pm 2.0</math> g                  Banda: DC-200 Hz</p>	
<p><b>Sismometro da pozzo: Guralp-Radian</b>                  Componenti: 3                  Sensibilità: 2000 V/m/s                  Banda: 0.00833-200 Hz (120-0.05 s)</p>			

**Tabella 2** - Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.

Tutte le stazioni sono dotate di apparati di tele-trasmissione dei dati e antenne GPS per la sincronizzazione precisa del tempo. I dati acquisiti dalle stazioni vengono inviati al centro di acquisizione presso le sedi OGS di Sgonico (Trieste) e Udine.

I dati sismometrici acquisiti vengono archiviati in tempo reale in formato *mseed* sui dischi dei computer dedicati all'acquisizione e archiviati permanentemente su un'unità di archiviazione di rete (NAS di marca QNAP) con capacità complessiva di circa 50 TB e che è montata direttamente come file system dai sistemi di acquisizione ed elaborazione. La rete RMCL accumula approssimativamente 1.2 GB di dati al giorno, quindi circa 0.5 TB all'anno. Tutte le informazioni relative ai siti e alla strumentazione installata sono anche caricate nel database che gestisce i dati sismologici strumentali dell'OGS, denominato OASIS ([oasis.crs.inogs.it](http://oasis.crs.inogs.it)) e descritto in Priolo et al. (2012; 2015a).

Per migliorare la rilevazione e la localizzazione degli eventi sismici locali le stazioni della RMCL sono integrate da alcune stazioni della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC, codice IV) gestita da INGV ([Tabella 3](#)) e della Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale (RSNI) che fa capo al laboratorio di sismologia dell'Università di Genova. Dette stazioni sono acquisite in modalità off-line e quindi non entrano direttamente nel sistema di localizzazione in tempo reale. Inoltre, per discriminare più efficacemente gli eventi lontani, anche se di scarso interesse per l'area della concessione di stoccaggio, vengono utilizzate numerose stazioni appartenenti ad altre reti che operano nel Nord Italia, quali la Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale (codice OX) gestita da OGS anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia e la Rete Sismica del Trentino (ST) della Provincia Autonoma di Trento.

Per la rilevazione della sismicità di interesse per lo stoccaggio di Cornegliano Laudense sono state individuate due aree di riferimento che corrispondono ai domini di rilevazione indicati dagli ILG del MASE (MiSE-UNMIG, 2014). Il Dominio Interno (DI) circonda il serbatoio fino a una distanza di 3 km e il Dominio Esteso (DE) si allarga fino a 15 km

dal perimetro esterno del serbatoio. Le aree corrispondenti in superficie ai due domini sono mostrate con linee rosse in [Figura 1](#).

Code	Name	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Net Code
BALD	Monte Baldo (VR)	45.6830	10.8187	1911	OX
BOB	Bobbio (PC)	44.7679	9.4478	910	IV
CAPR	Capriolo (BS)	45.6372	9.9345	215	IV
CTL8	Castelleone (CR)	45.2763	9.7622	60	IV
EUCT	Pavia	46.1516	12.3630	598	IV
GORR	Gorreto (GE)	44.6071	9.2926	572	GU
GRAM	Graiana (PR)	44.4904	10.065	844	GU
MARN	Marana (VI)	45.6378	11.2099	785	OX
MERA	Merate (LC)	45.7054	9.4291	338	IV
MDI	Monte di Nese (BG)	45.7697	9.7160	954	IV
MILN	Milano	45.4803	9.2321	125	IV
MONC	Moncucco Torinese (AT)	45.0739	7.9271	480	IV
ORZI	Orzinuovi (BS)	45.4056	9.9307	83	IV
PCN	Piacenza	45.0353	9.7247	55	IV
PRMA	Parma	44.7637	10.3131	78	IV
QUIN	Quinzano d'Oglio (BS)	45.2982	10.0337	121	OX
ROTM	Rocchetta Tanaro (AT)	44.8493	8.3523	186	GU
SARZ	Sarezzano (AL)	44.8673	8.9136	266	IV
SATI	Passo dei Salati (AO)	45.8754	7.8685	2935	GU
TRAV	Traversella (TO)	45.5122	7.7461	973	GU
VARA	Monte Varagna (TN)	45.8260	10.8965	1735	OX
VARE	Varese (VA)	45.8677	8.7700	1219	IV

**Tabella 3** - Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV, GU e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale Centralizzata gestita dall'INGV, alla Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale gestita dall'Università di Genova e alla Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale gestita da OGS.

Le procedure di elaborazione dei dati di basso livello (intendendo con ciò le fasi di acquisizione dei dati dalle stazioni), di archiviazione dei *file* dei dati e di elaborazione per il riconoscimento automatico in tempo quasi-reale (*real-time*) della sismicità sono state già descritte nel rapporto di consegna della rete (Priolo et al., 2017). Qui descriveremo brevemente come si svolge l'analisi dei dati. Il dettaglio completo delle procedure e operazioni è descritto in Garbin e Priolo (2013) e Priolo et al. (2015b).

Le procedure di acquisizione, elaborazione e analisi dei dati sono basate sul sistema software *Antelope*<sup>®</sup> sviluppato da BRTT e completate con procedure e funzioni sviluppate dai ricercatori e tecnologi dell'OGS.

Ricordiamo che il sistema di elaborazione si divide in due parti:

- **real-time**, è la parte di elaborazione che comprende il riconoscimento e la localizzazione automatica degli eventi sismici con eventuale notifica di eventi locali al personale di reperibilità;



di interesse; se una o più di queste superano dei test di attendibilità, ne conferma la migliore.

Le operazioni svolte dai due rami di elaborazione si differenziano in funzione di obiettivi diversi. Il sistema real-time, in caso di evento con magnitudo superiore a una soglia prestabilita, esegue le procedure di notifica (invio del messaggio di allerta al personale reperibile, aggiornamento della tabella degli eventi in tempo reale sul sito web); il ramo off-line prosegue con operazioni mirate a qualificare in modo più accurato gli eventi rilevati. Per questo motivo i due rami di elaborazione utilizzano configurazioni diverse.

Per il ramo *off-line* l'obiettivo è quello di riconoscere la microsismicità e quindi di rilevare tutti gli eventi sismici nell'area studio nei limiti della capacità di rilevazione della rete. È in questa fase che vengono inserite all'interno del sistema le stazioni acquisite da altri enti e non disponibili in tempo reale. Gli strumenti di elaborazione vengono configurati per consentire l'identificazione dei segnali più deboli sfruttando al limite la sensibilità della rete; ciò tuttavia aumenta fortemente il carico computazionale e la rilevazione di falsi eventi a causa dei pochi *trigger* usati. Per questo motivo, a valle delle operazioni di detezione e associazione, è necessario l'intervento di un sismologo, che riconosce gli eventi veri e li discrimina da quelli falsi. Questa operazione è chiamata **tagging**. In pratica, in questa fase gli eventi di interesse per il monitoraggio sismico di Cornegliano Laudense vengono marcati in modo permanente nel sistema. Per gli eventi marcati vengono effettuate le seguenti operazioni specifiche:

- estrazione delle forme d'onda relative all'evento per tutte le stazioni;
- **picking** manuale, operazione con cui vengono rilevati dal sismologo i tempi di arrivo delle fasi P e, ove possibile, delle fasi S;
- **localizzazione**, utilizzando le fasi rilevate manualmente;
- stima della **magnitudo locale**.

Le localizzazioni fornite in uscita dal sistema di elaborazione e analisi sono ottenute con il metodo Hypoellipse (Lahr, 1984). Esso utilizza un modello 1D della crosta terrestre a strati piani paralleli, descritto in termini di velocità delle onde P ( $V_p$ ), spessore degli strati e rapporto tra le velocità delle onde sismiche P ed S ( $V_p/V_s$ ) in ogni strato. Il modello adottato ([Tabella 4](#)) rappresenta la geologia a scala sub-regionale, che è caratterizzata da una spessa copertura di depositi alluvionali sopra la base rocciosa; ciò si ripercuote in una variazione evidente nei primi due strati sia delle velocità  $V_p$  sia del rapporto  $V_p/V_s$ . Ricordiamo che il rapporto  $V_p/V_s$  influenza la profondità dell'ipocentro. Maggiori dettagli sono riportati nella relazione completa sulle attività iniziali (Priolo et al., 2018). Per quanto riguarda la magnitudo, viene calcolata la magnitudo locale (ML) con la formula di attenuazione di Bragato e Tonto (2005).

Le informazioni riguardanti la rete di monitoraggio sismico e le procedure adottate per il riconoscimento e la stima dei parametri degli eventi sismici sono riportate anche nel sito web all'indirizzo [rete-cornegliano.crs.ogs.it](http://rete-cornegliano.crs.ogs.it).

	Vp (km/s)	Profondità (km)	Vp/Vs [Hypoellipse]
1	2.35	0.0-1.4	2.38
2	3.5	1.4-3.0	1.85
3	5.0	3.0-6.0	1.78
4	6.0	6.0-12.0	1.78
5	6.7	12.0-35.0	1.78
6	7.5	> 35.0	1.78

**Tabella 4** - Modello 1D utilizzato in questo studio per le localizzazioni degli eventi sismici. Le colonne indicano da sinistra a destra in successione: il numero di strato, la velocità Vp, la profondità dello strato e il valore di Vp/Vs.

## 1.2 Operatività della rete sismica

Durante il periodo in esame (1/11/2023-30/04/2024) la rete ha svolto le funzioni di monitoraggio sismico previste. La strumentazione, il sistema di acquisizione, come pure quello di prima elaborazione e archiviazione dei dati hanno funzionato affidabilmente per la maggior parte del tempo.

La disponibilità dei dati acquisiti mese per mese, nel periodo considerato, è riassunta nelle tabelle riportate in Appendice A.

Per quanto riguarda l'esercizio delle stazioni, è stata regolarmente effettuata l'ordinaria manutenzione operata da remoto, mentre gli interventi in sito che hanno implicato delle variazioni di strumentazione o accessori sono stati riportati nella [Tabella 5](#). Non vengono riportati invece gli interventi di ordinario controllo e pulizia delle stazioni in regime di funzionamento regolare.

Circa i principali interventi in sito relativi alla strumentazione, sono da menzionare le seguenti attività. La componentistica accessoria di stazione ha richiesto diversi interventi, tra i quali la sostituzione di due regolatori di tensione, a causa di problematiche sull'ingresso del pannello fotovoltaico, probabile danno indotto da scarica elettrica; la sostituzione di un cavo dell'accelerometro, il cui connettore presentava evidenti difetti nella gommatura isolante, un problema dovuto in origine alla scarsa qualità del materiale che, in tempo relativamente breve, si è deteriorato. Abbiamo sviluppato il sistema di telecontrollo/relè, mediante installazione di una scheda di controllo remoto della LAN per l'acquisizione dei parametri di alimentazione – tensione e corrente di carica/scarica, controllo di temperatura e ventilazione, interruzione delle linee di alimentazione degli strumenti ed altro.

Tutte le stazioni sono state oggetto di periodica manutenzione del verde e controllo dello stato dell'armadio e della recinzione, più frequentemente -circa ogni 30gg- nel

periodo estivo, circa ogni due mesi nel periodo invernale. Da segnalare la ridotta accessibilità alla stazione OL01, nei pressi della centrale IGS, dovuta al frequente danneggiamento della stradina di bordo campo durante i lavori agricoli dei campi adiacenti.

Data	Stazione	Intervento
2023.11.13	OL09	Ripristino link relè, verifica stato batterie e connettori
2023.11.14	OL10	Installazione test del LAN controller
2023.11.14	OL06	Sostituzione cavo accelerometro
2023.11.23	OL05	Verifica componentistica per installazione LAN controller
2023.11.23	OL06	Sostituzione regolatore tensione, inserimento DC-DC
2023.11.24	OL05	Installazione LAN controller e sua sensoristica
2023.11.24	OL01	Controllo e aggiornamento fw GNSS
2023.11.24	OL10	Controllo e bloccaggio accelerometro Fortis
2024.01.15	OL08	Sostituzione batterie
2024.03.11	OL09	Verifica problematica di alimentazione, sost. batterie
2024.03.13	OL09	Sostituzione regolatore tensione, ripristino batterie

**Tabella 5** - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica e geodetica.

### 1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio

Nel periodo 1/11/2023-30/4/2024 la RMCL ha rilevato tre eventi sismici, dei quali uno localizzato nel Dominio Esterno e due nell'Area Estesa. L'evento sismico del 25/2/2024 di magnitudo 2.6, è stato localizzato ad una profondità di 28.5km. L'evento sismico del 7/3/2024 con una profondità, invece, di 29km è caratterizzato da una magnitudo pari a 2.2. Entrambi questi eventi si sono verificati nell'Area Estesa ad almeno 30 km dal serbatoio. Il terzo evento sismico, di magnitudo pari a 0.9 e con una profondità di 1.9 km, si è verificato il 26.4.2024 nel Dominio Esterno a circa 5 km dal serbatoio. Tale evento è localizzato nella stessa area nei dintorni di Lodi dove sono avvenuti eventi registrati negli anni di monitoraggio precedenti e associati verosimilmente a sorgenti poco profonde. Anche alla fine di questo semestre d'esercizio non si sono rilevate variazioni statisticamente significative nella sismicità durante le attività di stoccaggio.

In [Figura 5](#) riportiamo la mappa degli eventi sismici rilevati a partire dal 1/1/2017. La lista completa di tutti gli eventi rilevati a partire dal 1/1/2017 con i loro parametri è riportata nella Appendice B.

La [Figura 6](#) mostra, a titolo di esempio, i sismogrammi registrati dalla rete per l'evento ML 2.6 del 25/2/2024 ore 10:32:42 avvenuto nell'Area Estesa. La distanza epicentrale delle stazioni visualizzate è compresa tra 5 e 17 km.

La [Figura 7](#) mostra i dati medi dell'attività di stoccaggio del gas con un campionamento orario. I tre grafici rappresentano (a) la pressione media (unità in bar) misurata al collettore dei pozzi, (b) la portata (milioni di standard m<sup>3</sup> giorno) durante le attività dell'impianto e (c) il volume. I grafici sono aggiornati quotidianamente. I dati sono forniti da IGS. In ciascuno dei cluster A e B sono attivi 6 pozzi. Il pannello (c) della [Figura 7](#) mostra il volume complessivo del gas iniettato nel serbatoio. I valori numerici del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato sensibile commerciale, considerato riservato.



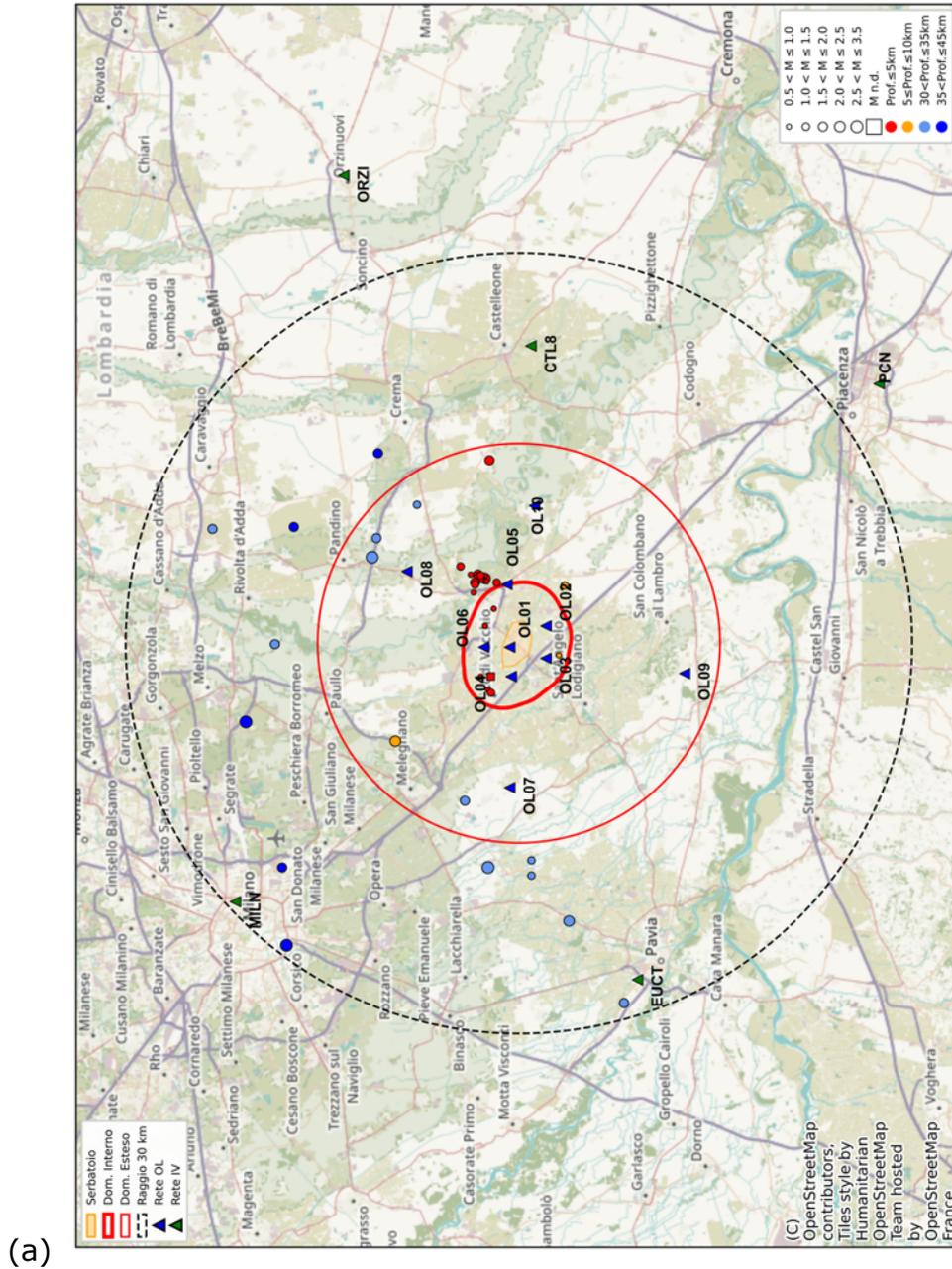
**OGS**

Istituto Nazionale  
di Oceanografia  
e di Geofisica  
Sperimentale

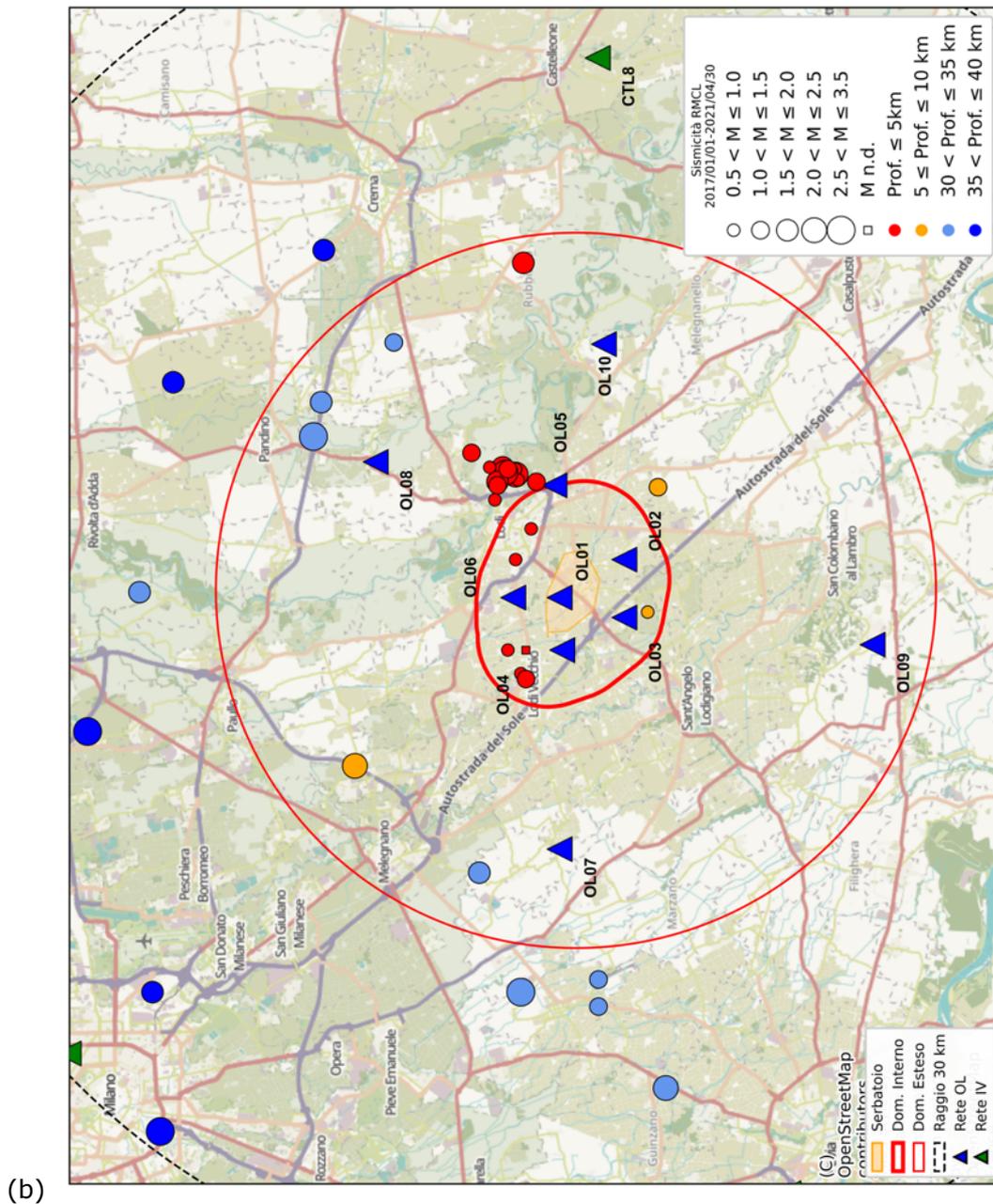


Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento  
elettromagnetico  
dell'ambiente



**Figura 3** - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2024, a distanza epicentrale  $\leq 30$  km dal sito di stoccaggio (a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione.



**Figura 5** – Continua dalla pagina precedente.



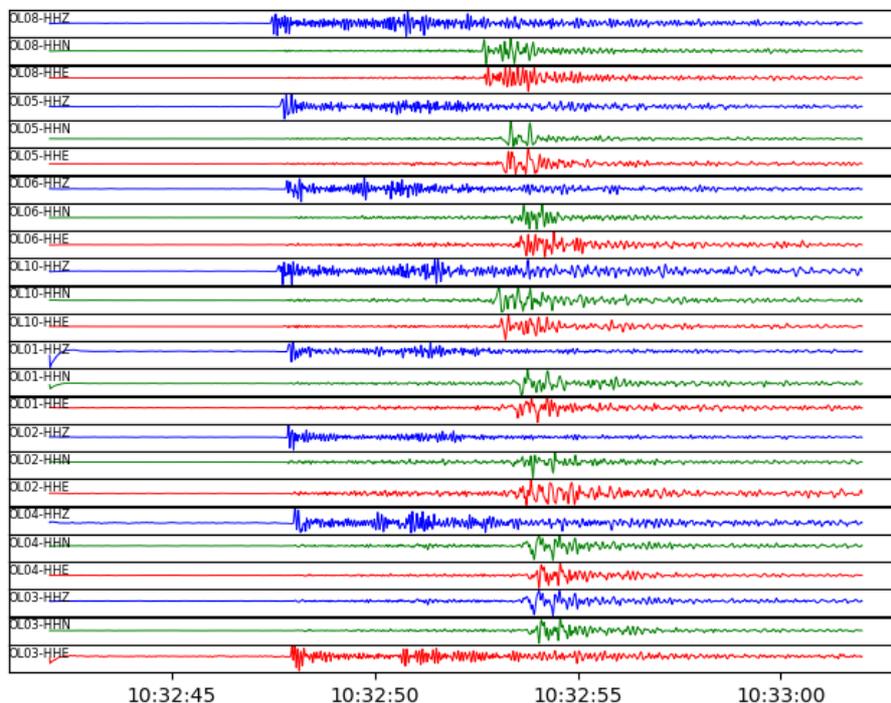
**OGS**

Istituto Nazionale  
di Oceanografia  
e di Geofisica  
Sperimentale



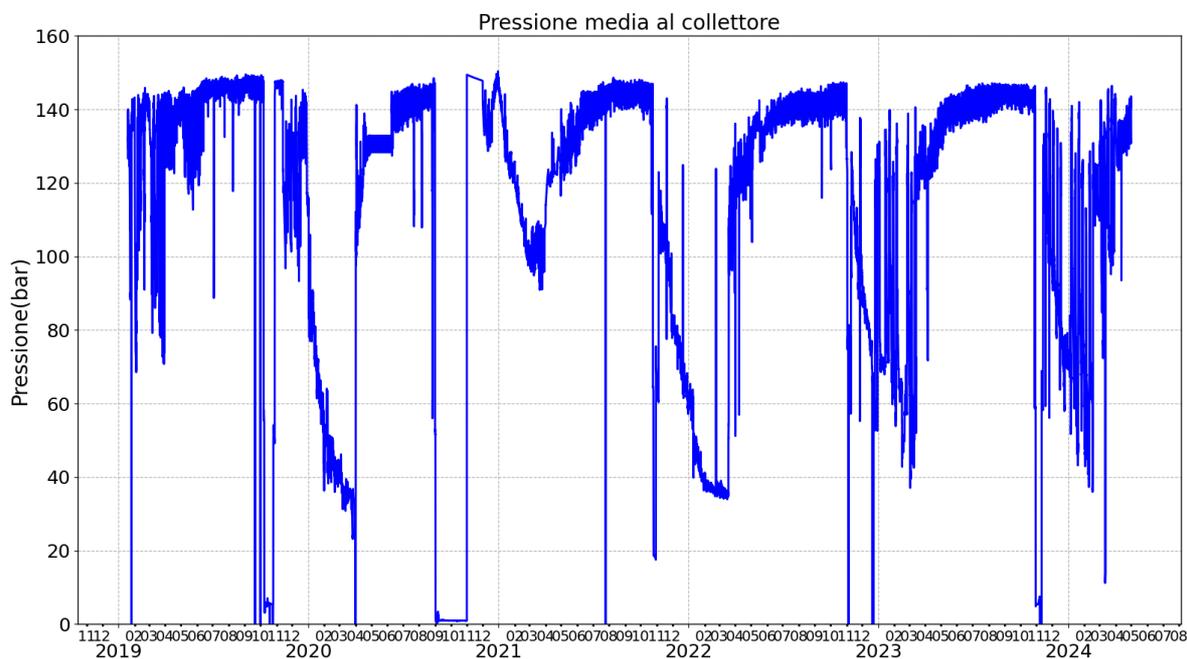
Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento  
elettromagnetico  
dell'ambiente

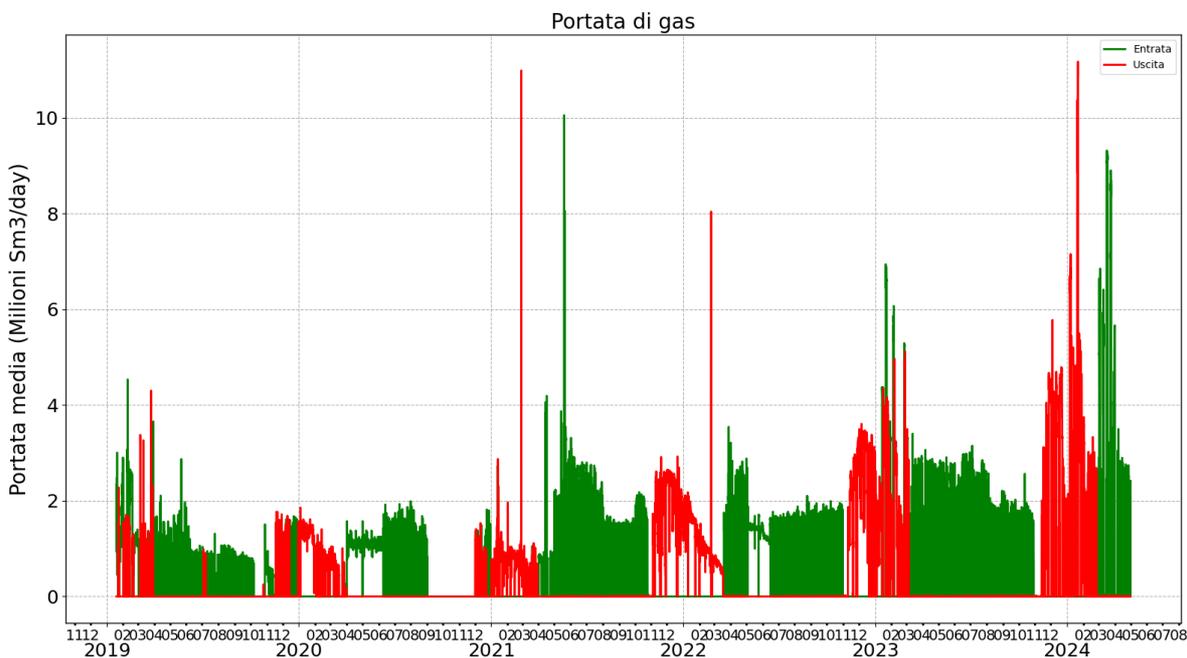


**Figura 4** - Forme d'onda registrate per l'evento ML2.6 del 25/2/2024 ore 10:32:42 avvenuto nell'Area Estesa. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu, le due componenti orizzontali rispettivamente in rosso (E-O) e verde (N-S)). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL08, OL05, OL06, OL10, OL01, OL02, OL04 e OL03.

(a)



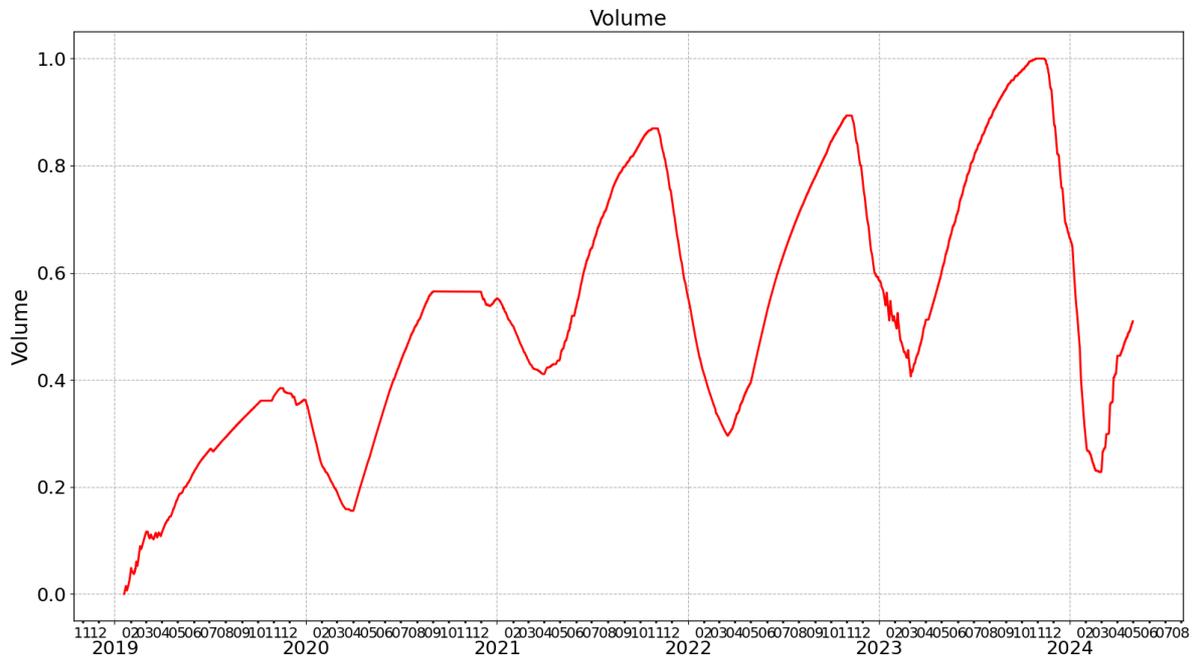
(b)



**Figura 5** – (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard al giorno) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in entrata e uscita. (c) Volume complessivo del gas contenuto nel serbatoio naturale durante le attività dell'impianto, normalizzato al valore di volume massimo. I valori assoluti del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato commerciale sensibile e riservato. Continua alla pagina successiva.



(c)



**Figura 5** – Continua dalla pagina precedente.

## **2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali**

## 2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01

Il periodo oggetto di questa relazione è 01/11/2023–30/4/2024.

Nel periodo 01/11/2023–30/4/2024, la stazione OL01, che fa parte della rete geodetica permanente FReDNet dell'OGS con il nome di LODI, ha fornito dati orari con campionamento a 1 s, dai quali si estrapolano dati giornalieri a 30 s per la successiva elaborazione. La stazione è dotata di un Topcon NETG5 in grado di tracciare le costellazioni GPS, GLONASS, Galileo, Beidou QZSS e SBAS (dispositivo multi-costellazione) e i segnali L1, L2 e L5 (dispositivo multifrequenza). Il nome della stazione è stato cambiato ufficialmente da "OL01" a "LODI" per essere conformi al nome ufficiale della stazione sui repository internazionali (ad esempio: <https://gnss-metadata.eu/>).

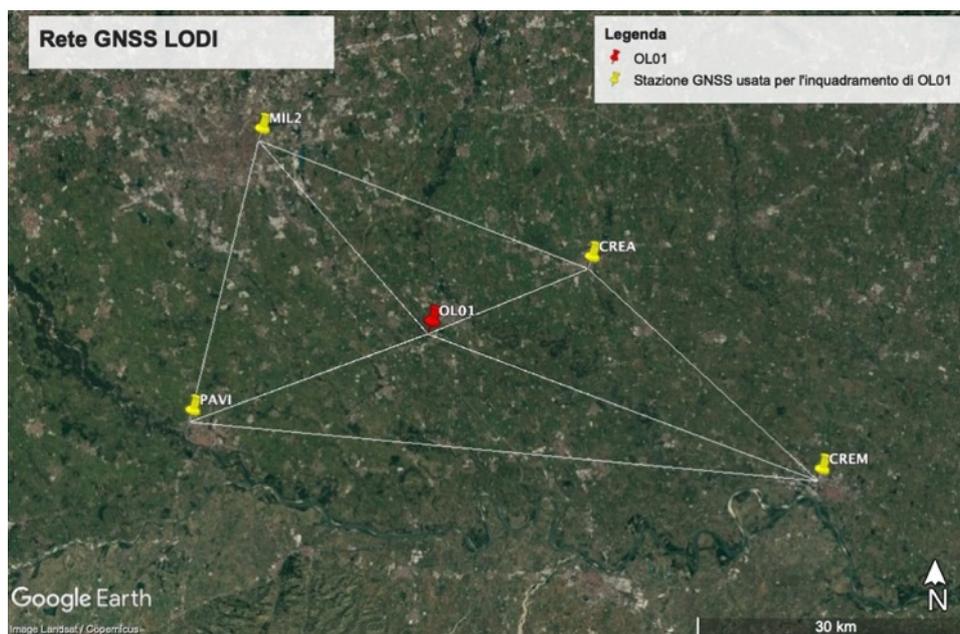
I dati registrati sono liberamente disponibili per operazioni di post-processing in formato standard RINEX (orari e giornalieri) sul FReDNet Data Center (FReDNet DC 2016) accessibile al link <https://frednet.crs.ogs.it/DOI/doi:10.6092/frednet> e, più in dettaglio, i dati relativi alla stazione LODI sono accessibili all'indirizzo [https://frednet.crs.ogs.it/frednet\\_data/stations/LODI/](https://frednet.crs.ogs.it/frednet_data/stations/LODI/).

### 2.1.1 Dati elaborati

La stazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*) LODI è ubicata vicino al "Cluster A" dell'impianto di Cornegliano Laudense, il quale ospita anche la stazione sismometrica. La stazione GNSS è operativa da fine ottobre 2016 ed è in grado di ricevere i segnali di sei sistemi satellitari di navigazione: GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, SBAS e BeiDou.

Il *dataset* della stazione LODI viene registrato in file di formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ed è disponibile in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane).

Poiché il nostro obiettivo è monitorare la potenziale deformazione dell'impianto di stoccaggio, abbiamo stabilito un sistema di riferimento locale utilizzando quattro stazioni del servizio di posizionamento satellitare GNSS interregionale SPIN3 (rete SPIN, <https://www.spingnss.it/>). Tale sistema comprende le stazioni CREA, CREM, MIL" (che sostituisce MILA dal 2019) e PAVI ([Figura 6](#) e [Tabella 6](#)). Tutte queste quattro stazioni di riferimento si trovano entro un raggio di 30 km da LODI e sono operative da più di un decennio. L'insieme di stazioni della rete locale e della stazione di LODI è chiamato con il nome di "Rete GNSS LODI".



**Figura 6** - Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadratura di OL01. Queste stazioni sono CREA (Crema), CREM (Cremona), MIL2 (Milano), PAVI (Pavia). La posizione della stazione MILA, rimasta attiva fino al 8/2/2019, è indistinguibile da quella di MIL2 in questo grafico.

SITE CODE	LOCALITA'	RICEVITORE	ANTENNA	LATITUDINE LONGITUDINE	QUOTA [m]
CREA	Crema	STONEX (GPS+GLO+GAL) SC2200	STXSA1200 STXR	45° 21' 15,592537" N 9° 41' 07,096872" E	129,818
CREM	Cremona	STONEX (GPS+GLO+GAL) SC2200	STXSA1200 STXR	45° 08' 47,927515" N 10° 00' 07,025904" E	102,733
MILA	Milano	TPS NET-G3 (GPS+GLO)	TPSCR3_GGD CONE	45°28'47,94818"N 9°13'45,62699"E	187,275
MIL2	Milano	STONEX (GPS+GLO+GAL) SC2200	STXSA1200 STXR	45° 28' 42,127070" N 9° 13' 45,166341" E	191,125
PAVI	Pavia	STONEX (GPS+GLO+GAL) SC2200	STXSA1200 STXR	45° 12' 10,732233" N 9° 08' 10,104212" E	143,638
<b>OL01</b>	<b>Cornegliano Laudense</b>	<b>TPS NET-G5 (GPS+GLO)</b>	<b>CR-G5 (TPSH)</b>	<b>45°17'28,17435"N 9°27'53,47318"E</b>	<b>121,254</b>

**Tabella 6** - Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, PAVI e del sito OL01. Tra settembre 2021 e gennaio 2022 le antenne e i ricevitori delle stazioni CREA, CREM, MIL2 e PAVI sono state sostituite. Qui sono riportati i modelli di antenna e ricevitore aggiornati; per i periodi precedenti si veda Priolo et al. (2021).

Per il calcolo delle serie temporali, a fianco della Rete GNSS LODI, sono state utilizzate più di 350 stazioni che coprono le regioni dell'Italia settentrionale e le aree circostanti. Di queste, più di 150 appartengono alla rete europea EUREF (<https://www.epncb.oma.be/>) e più di 30 appartengono alla rete IGS (<https://network.igs.org/>), e favoriscono il corretto agganciamento al sistema di riferimento internazionale.

Le osservazioni di LODI, così come quelli delle altre stazioni GNSS, sono state processate con il pacchetto software GAMIT/GLOBK versione 10.71 (Herring et al., 2018), sviluppato dal Massachusetts Institute of Technology ([web.mit.edu](http://web.mit.edu)), dall'Harvard University ([www.harvard.edu](http://www.harvard.edu)) e dallo Scripps Institution of Oceanography ([scripps.ucsd.edu](http://scripps.ucsd.edu)). Maggiori dettagli sulla procedura di elaborazione sono contenuti nella relazione precedente (Guidarelli et al., 2024) e in Tunini et al. (2024).

Le stime giornaliere delle coordinate e le serie temporali vengono calcolate secondo due diversi sistemi di riferimento:

- il sistema di riferimento globale ITRF14 (International Terrestrial Reference Frame 2014, Altamimi et al., 2016, <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2014/>), riferito al centro di massa della Terra con asse Z passante per l'asse terrestre e assi X e Y giacenti sul piano equatoriale. L'epoca di riferimento per le soluzioni dell'ITRF14 è il 2010;
- il sistema di riferimento europeo ETRF14 (Altamimi et al., 2017), che evidenzia i movimenti della crosta terrestre rispetto alla placca euroasiatica, considerata come un blocco fisso. In questo modo, la rappresentazione dello spostamento non risente del movimento delle grandi placche a livello globale, ma si riferisce alla sola placca europea, permettendo un'analisi dei movimenti tettonici a scala regionale e locale, di maggiore interesse in relazione all'attività di stoccaggio del gas.

In questa relazione l'intervallo di tempo considerato è 1/1/2017 - 30/04/2024.

## 2.1.2 Risultati ottenuti

I file RINEX di LODI registrati dal 1/1/2017 fino al 30/4/2024 sono 2241, così come le giornate elaborate. L'elaborazione dei dati ha infatti prodotto 2189 soluzioni per LODI, pari all'utilizzo del 97,7% dei dati iniziali.

In questa sezione, riportiamo le serie temporali stimate per ciascun sito della Rete GNSS LODI. Le serie temporali sono disponibili in due sistemi di riferimento diversi: quello europeo ETRF14 (Figure 7-12) e quello internazionale ITRF14 (Appendice B). Le stime di velocità sono stimate attraverso un fit lineare sull'intera serie temporali degli

spostamenti e quindi rappresentano un valore medio della velocità sull'intervallo considerato. I valori delle velocità sono abbastanza importanti e, ad esempio, per la componente orizzontale, si attestano su alcune decine di mm/anno per tutti i siti GNSS. Nel sistema ETRF14 (Altamimi et al., 2017), gli spostamenti delle placche vengono stimati rispetto al blocco europeo (o Eurasia), per cui a ciascun sito della rete è sottratto il moto medio della placca europea. Nel sistema ETRF14 quindi le velocità sul piano orizzontale sono nettamente ridotte rispetto a quelle in ITRF14 e sono dell'ordine di alcuni mm/anno. I grafici delle serie temporali consentono un'analisi più dettagliata del comportamento di ciascuna stazione GNSS; in tal modo si ha una stima del movimento della stazione sia prima che dopo l'inizio dell'attività di stoccaggio.

Confrontando le serie temporali delle stazioni della Rete GNSS LODI, si nota che queste hanno un andamento congruente tra i sistemi ITRF14 (Figure in Appendice B) e ETRF14 (Figure 7-12). La stazione LODI presenta uno spostamento marcato verso Nord-Ovest e verso l'alto, presente già nelle precedenti relazioni (Guidarelli et al., 2022; Priolo et al. 2022).

La [Tabella 7](#) mostra le velocità stimate dal fit delle serie temporali con l'algoritmo `real_sigma` (Floyd e Herring, 2019), che consente di tenere conto delle correlazioni temporali nei dati, considerando l'intero periodo di disponibilità dei dati. Nel sistema di riferimento ITRF, le velocità stimate nelle componenti orizzontali sono simili (variano di meno di 2 mm/anno) per tutte le stazioni GNSS, con valori dai 16,1 mm/anno di MIL2 ai 17,8 mm/anno di LODI in direzione Nord, e dai 19,7 mm/anno di LODI ai 20,9 mm/anno di CREM in direzione Est. Nella direzione verticale, il range di variazione fra le stazioni è di meno di 4 mm/anno, con valori che vanno da -1,3 mm/anno di MIL2 ai 2,4 mm/anno di LODI. La componente verticale della stazione di MIL2 è quella che registra la maggiore differenza rispetto ai valori della relazione precedente. Ad ogni modo, considerate le incertezze proprie delle stime di velocità delle stazioni GNSS, i valori di spostamento stimati risultano sostanzialmente coerenti con quelli della relazione precedente.

Nel riferimento europeo (ETRF14), come indicato nella [Tabella 7](#), i valori di velocità stimati nelle componenti orizzontali sono compresi, nella direzione Nord, fra 0,3 mm/anno (MIL2) e 2,0 mm/anno (LODI), e fra -0,7 mm/anno (LODI) e 0,3 (CREM) mm/anno nella direzione Est. Anche in questo caso i valori risultano coerenti con quelli della relazione precedente.

Ad ogni modo, in entrambi i sistemi di riferimento è evidente che le velocità medie di LODI si discostano sistematicamente da quelle delle altre stazioni.



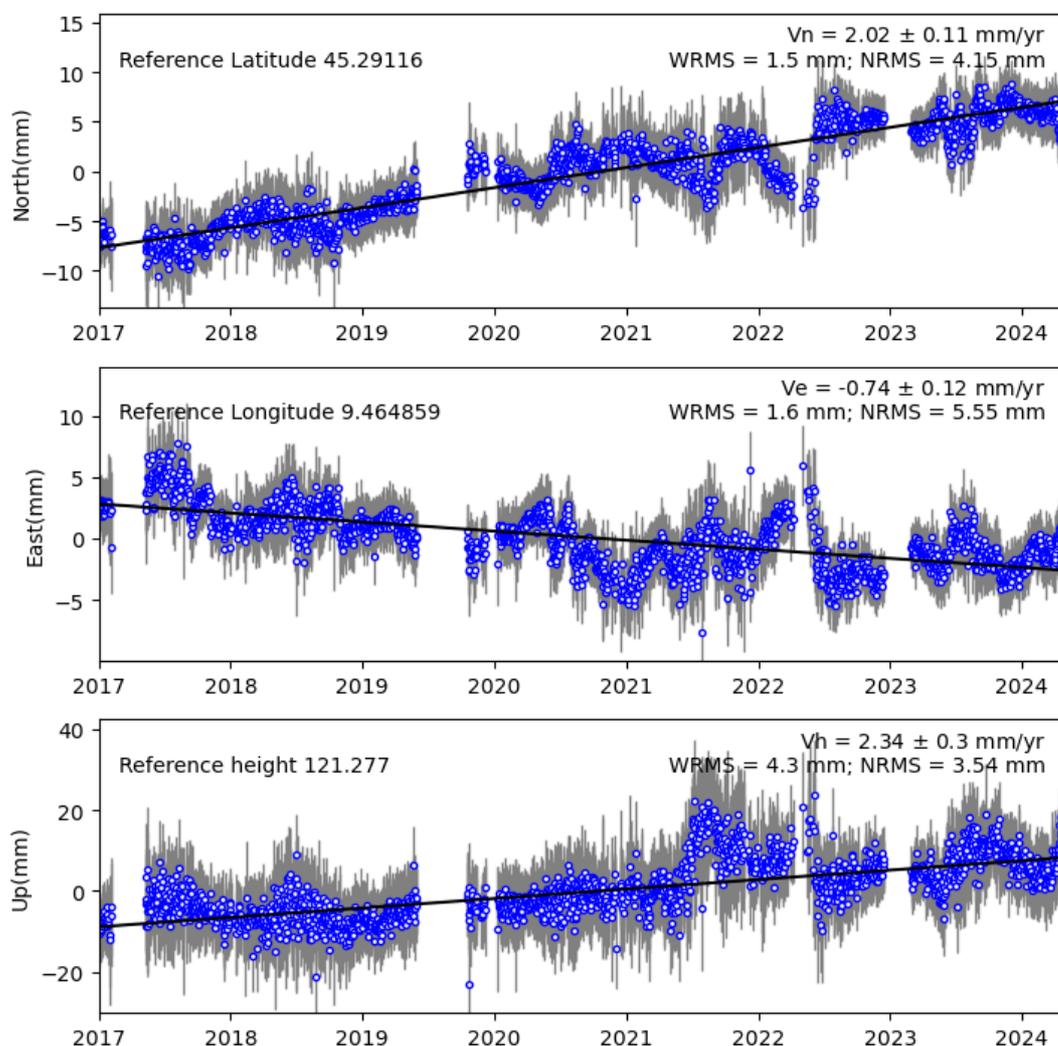
	ITRF04			ETRF14		
	Vel. Nord [mm/anno]	Vel. Est [mm/anno]	Vel. Up [mm/anno]	Vel. Nord [mm/anno]	Vel. Est [mm/anno]	Vel. Up [mm/anno]
<b>LODI</b>	<b>17,8</b>	<b>19,8</b>	<b>2,4</b>	<b>2,0</b>	<b>-0,7</b>	<b>2,3</b>
CREA	16,3	20,7	-0,3	0,5	0,1	-0,4
CREM	16,7	20,9	-0,6	0,9	0,3	-0,6
MILA	16,2	20,3	0,7	0,4	-0,1	0,6
MIL2	16,1	20,0	-1,3	0,3	-0,4	-1,3
PAVI	16,4	20,2	-0,6	0,5	-0,2	-0,7

**Tabella 7** - Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF14 e ETRF14. Le stime ottenute per la stazione LODI sono indicate in grassetto e colore rosso. Si ricorda che la migliore accuratezza nella stima delle velocità che si può raggiungere, considerando serie temporali lunghe e monumentazione stabile, è di 0.2 mm/anno sulle componenti orizzontali e 0.5 mm/anno sulla verticale (Masson et al., 2019).

Come nelle relazioni precedenti, è stato analizzato l'andamento dei residui di LODI rispetto al trend tettonico medio delle stazioni di riferimento per mettere in luce eventuali anomalie locali sulla stazione LODI che potessero essere messe in relazione con lo stoccaggio di gas nel serbatoio. Ipotizzando che il moto delle stazioni attorno a LODI, ovvero delle stazioni CREA, CREM, PAVI, MILA e MIL2, sia rappresentativo del trend tettonico della zona, abbiamo stimato il trend di queste stazioni, ne abbiamo calcolato la media, e l'abbiamo sottratta alla serie temporale di LODI, giorno per giorno nelle tre componenti. In questo modo, il segnale residuo su LODI rappresenta il comportamento locale della stazione stessa. Il risultato è riportato in [Figura 13](#). Dalla figura si può notare che continua a emergere, come già riscontrato nelle relazioni precedenti, il discostamento della stazione di LODI rispetto alle stazioni circostanti, evidenziando uno spostamento orizzontale in direzione Nord-Ovest e verticale verso l'alto a partire dal 2019, e che continua anche nel 2024.

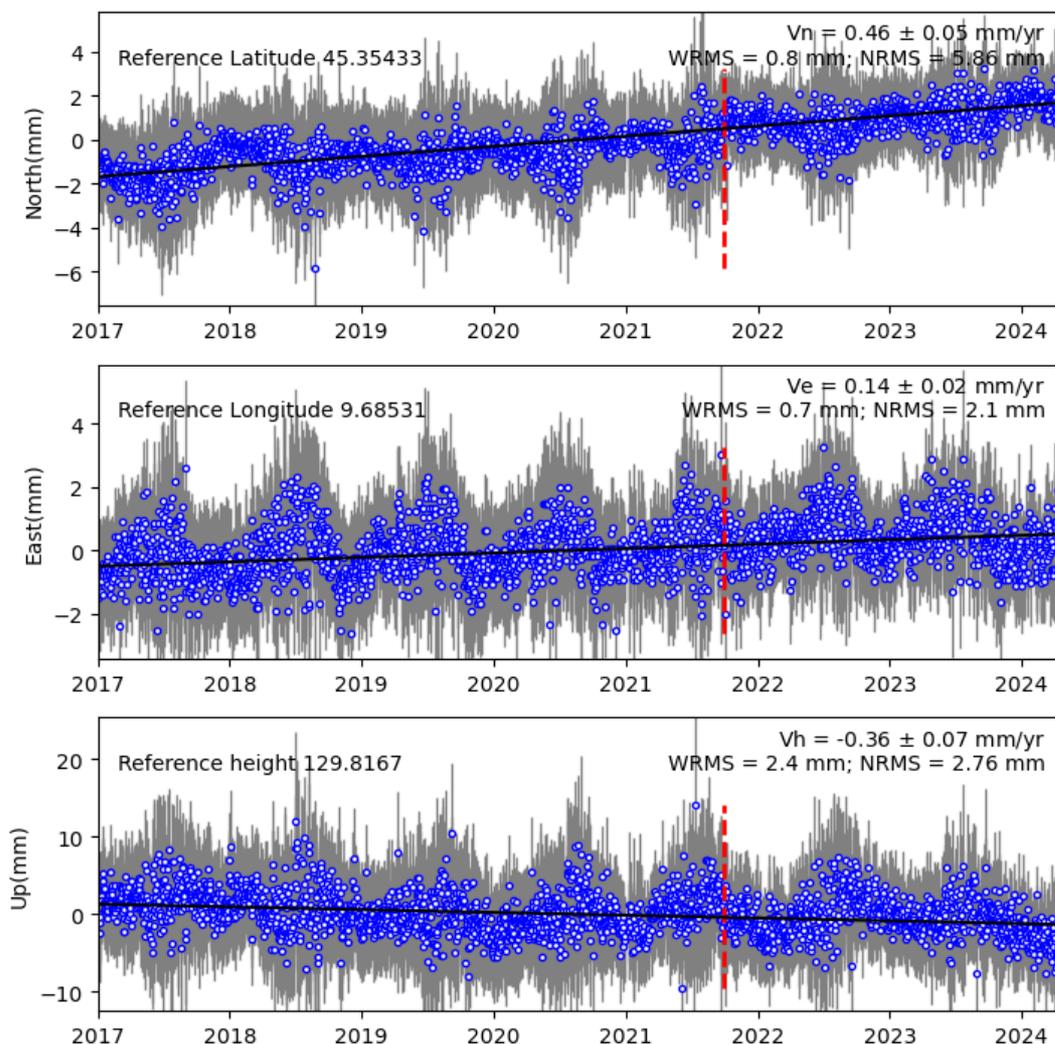
Infine, si fa presente che, allo scopo di irrobustire il monitoraggio geodetico del sito di Cornegliano stoccaggio, a fianco della stazione LODI è stata installata una nuova stazione geodetica denominata LOZ1, dotata di ricevitore dual-frequency u-blox ZED-F9P e antenna Tallysman TW3742. Antenna e ricevitore sono entrambi a basso-cost, ma hanno dimostrato risultati performanti in un recente esperimento condotto in Friuli Venezia Giulia (Tunini et al., 2022). In Appendice E sono mostrati i primi risultati di confronto tra le stazioni di LODI e LOZ1.

## LODI



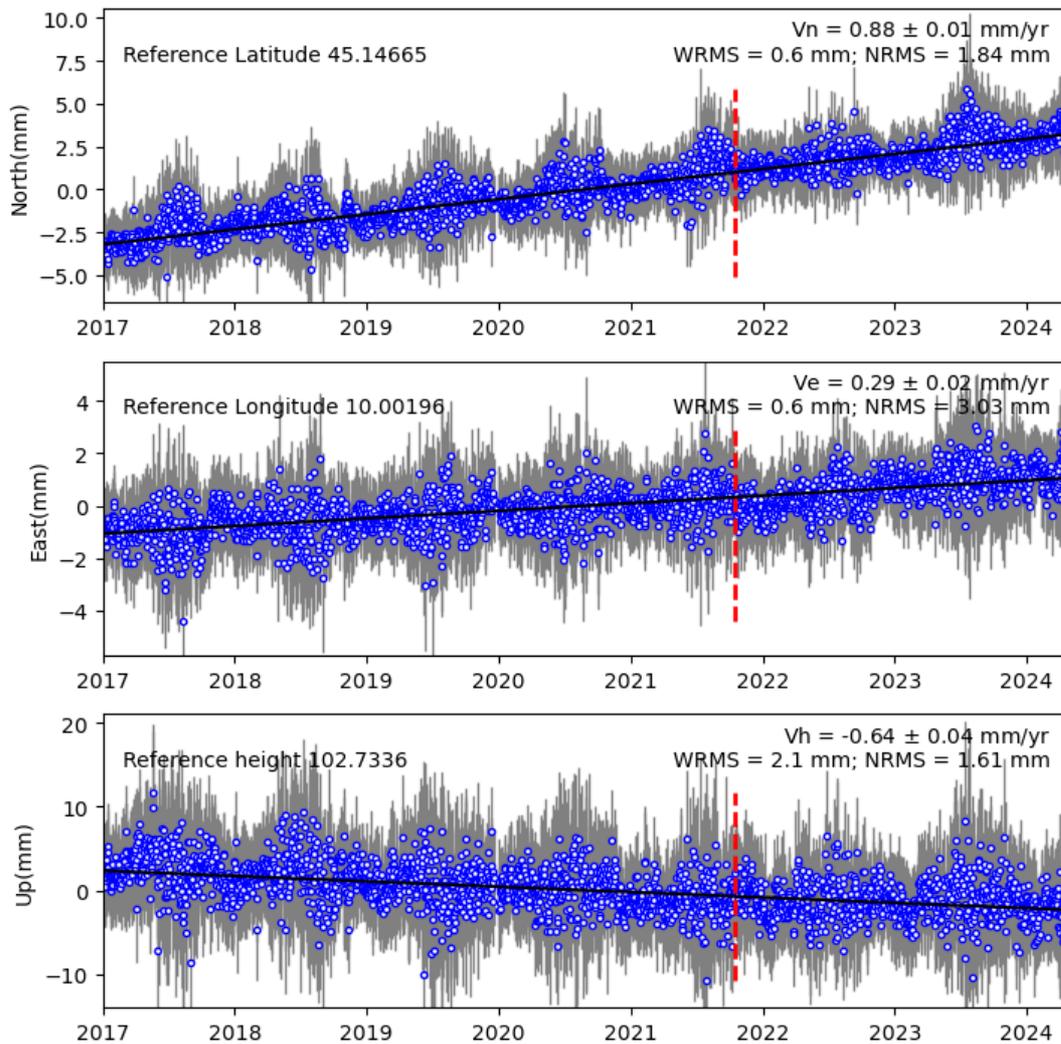
**Figura 7** - Serie temporale di LODI (nel sistema di riferimento ETRF14) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. La retta interpolante sui grafici fornisce una stima di velocità con il relativo errore, visibile anche in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).

### CREA



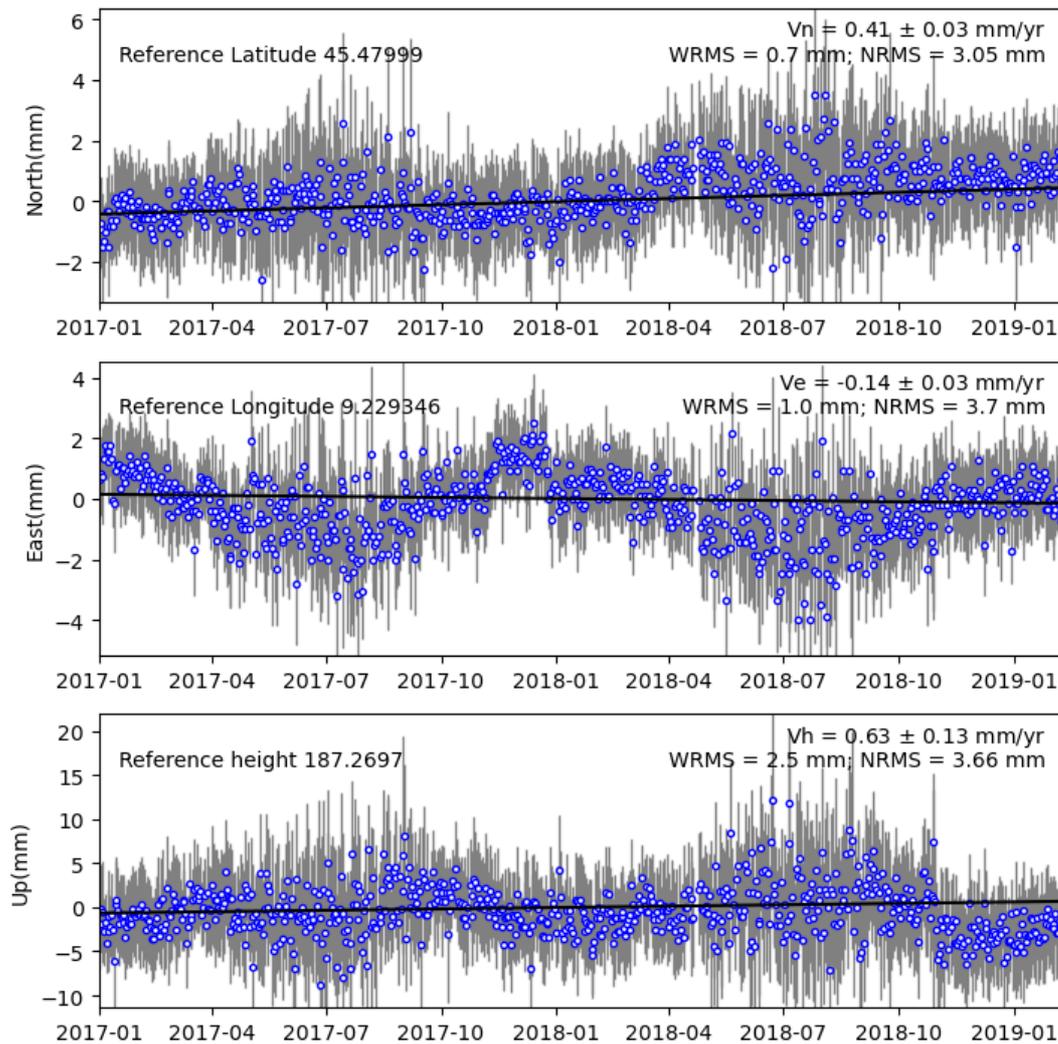
**Figura 8** - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

## CREM



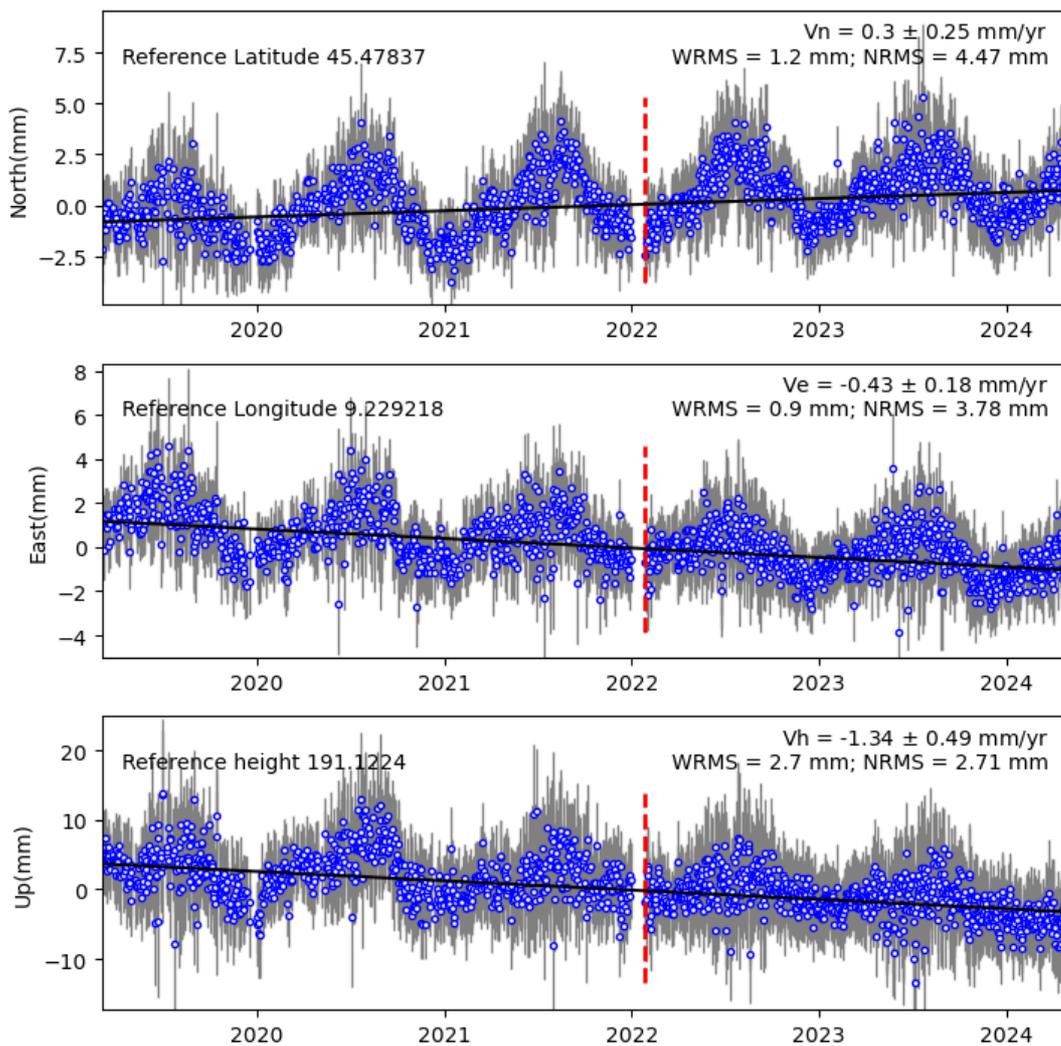
**Figura 9** - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

## MILA



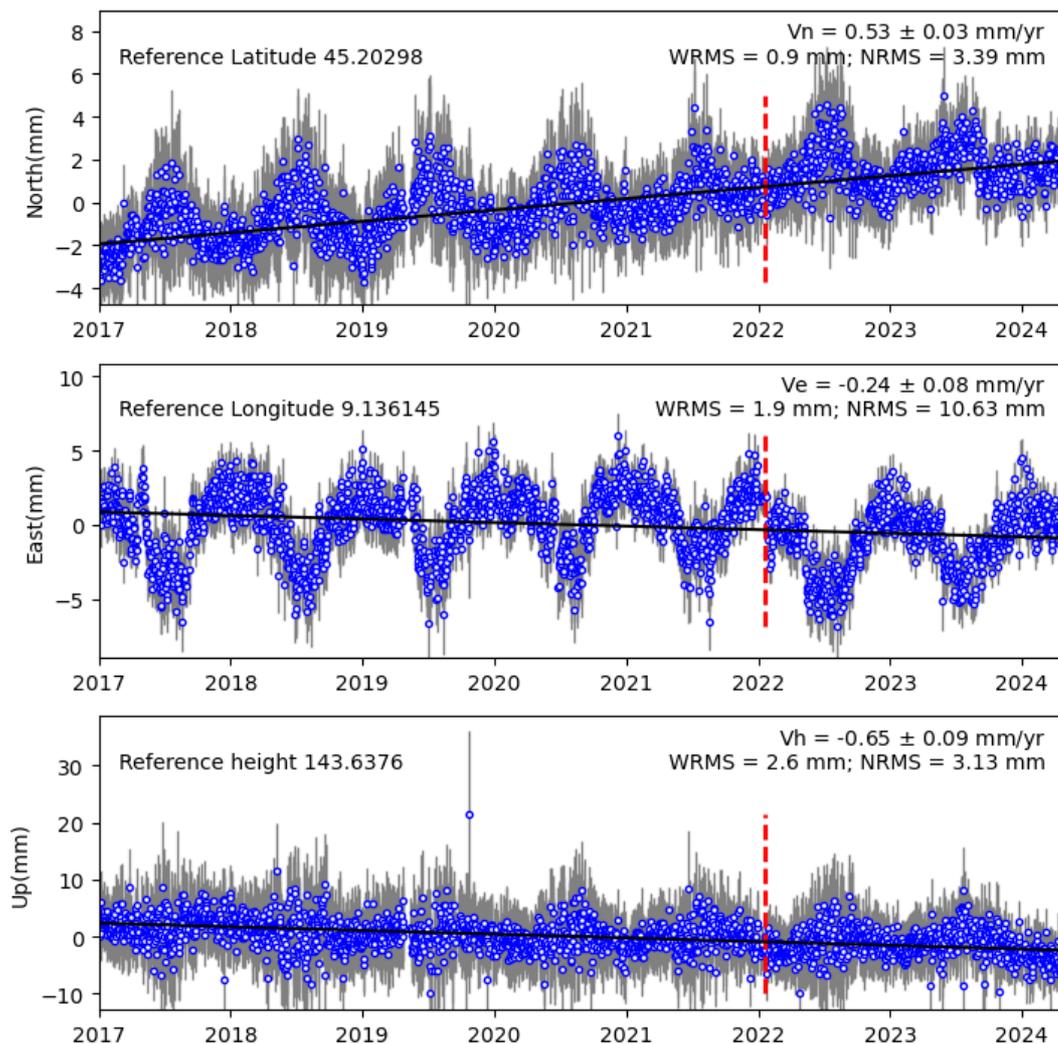
**Figura 10** - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ETRF14. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

## MIL2

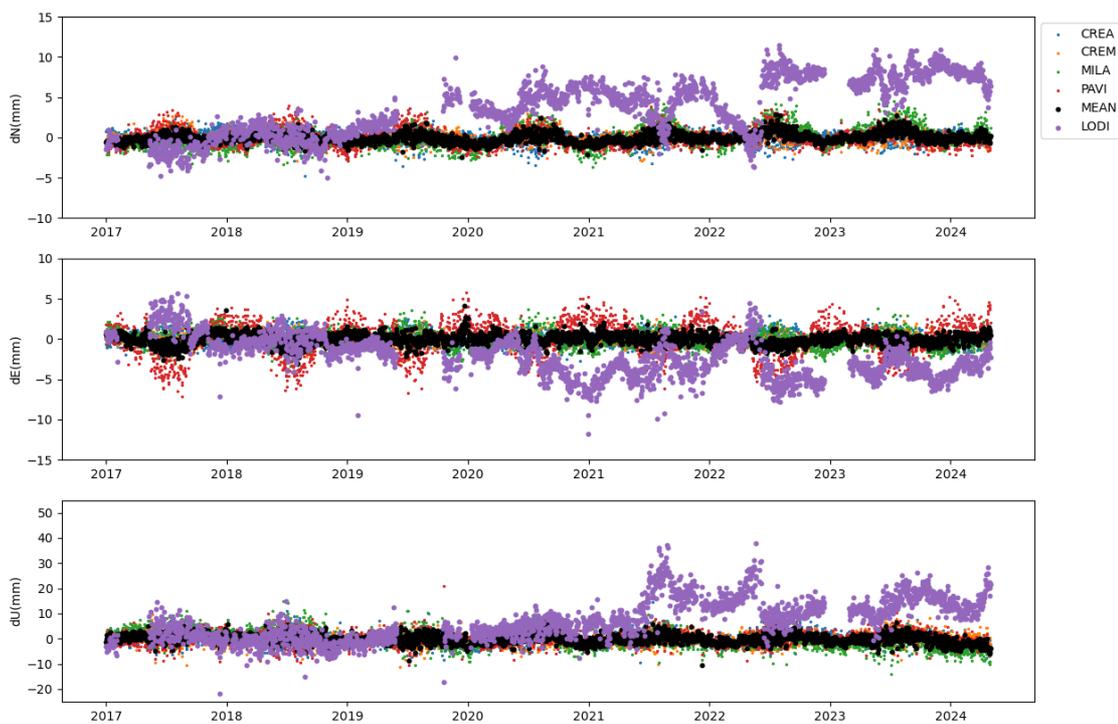


**Figura 11** - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

## PAVI



**Figura 12** - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).



**Figura 13** - Residui delle serie temporali Nord-Sud ( $dN$ ), Est-Ovest ( $dE$ ), Verticale ( $dU$ ) delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. In colore sullo sfondo, i residui delle stazioni di riferimento: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2023). In viola, in primo piano, la stazione LODI a cui è stato tolto il trend delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per "agganciare" le serie temporali ed evidenziare, graficamente, l'anomalia di LODI abbiamo considerato come zero la media di LODI calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati).



**OGS**

Istituto Nazionale  
di Oceanografia  
e di Geofisica  
Sperimentale

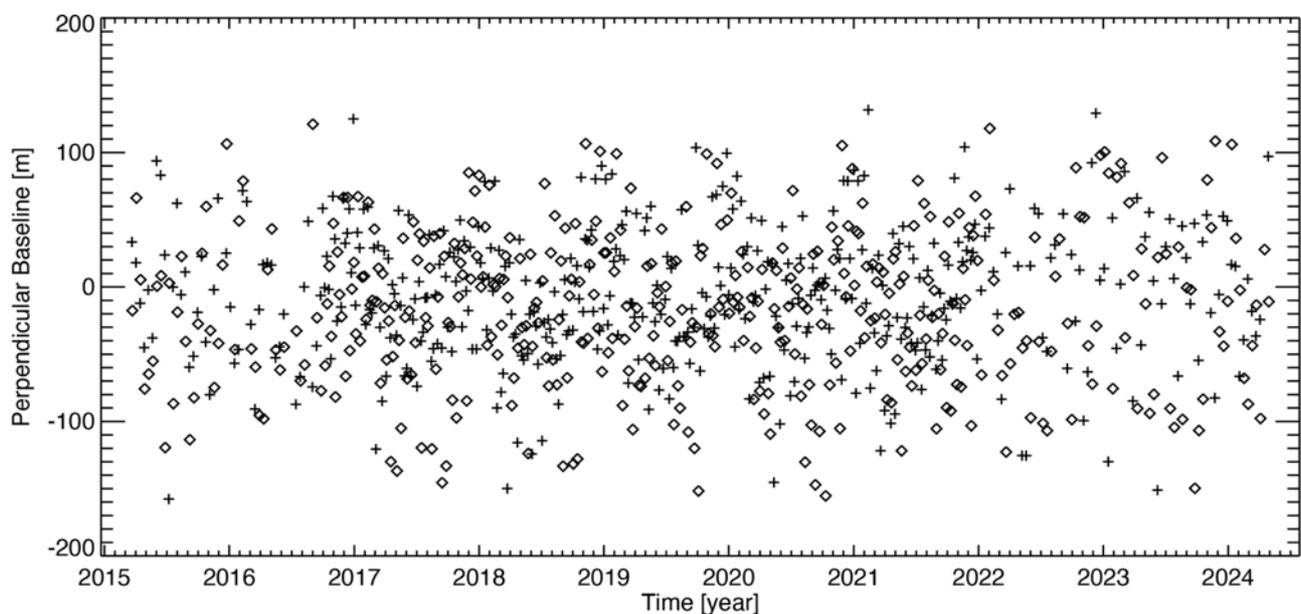


Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento  
elettromagnetico  
dell'ambiente

## 2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2024 (dati SENTINEL-1)

L'analisi interferometrica mediante la tecnica SBAS-DInSAR è stata effettuata utilizzando i dati Sentinel-1 (S-1) relativi all'area di interesse e corrispondenti a 429 immagini acquisite lungo orbite discendenti e 418 lungo orbite ascendenti, relative al periodo marzo 2015 – aprile 2024; in [Figura 14](#) è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 3080 e 3011 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.



**Figura 14** - Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.

Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato il DEM SRTM dell'area con uno spacing di circa 30 m (1 arcsec). Sia gli interferogrammi differenziali, sia le successive mappe e serie temporali di deformazione hanno una risoluzione spaziale di

circa 30 m x 30 m, ottenuta a valle di un'operazione di multilooking, e sono stati rappresentati sulla stessa griglia del DEM utilizzato per l'elaborazione. L'estensione spaziale dell'area analizzata è di circa 190 km x 70 km. È stata inoltre effettuata una validazione dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS rese disponibili da OGS.

Sia per l'elaborazione discendente, sia per quella ascendente è stato scelto come punto di riferimento (anche detto punto d'aggancio) un pixel nell'area urbana di Pavia nei pressi della corrispondente stazione GPS che, come testimoniato dalle relative misure GPS, risulta non essere affetto da deformazione. Si segnala inoltre che, combinando opportunamente i risultati ottenuti dai dati S-1 acquisiti dalle orbite discendenti e ascendenti, sono state generate sia le mappe, sia le serie temporali di deformazione delle componenti verticale ed Est-Ovest degli spostamenti rilevati.

Nei paragrafi seguenti si descrivono nel dettaglio i risultati delle analisi interferometriche effettuate utilizzando i dati discendenti e ascendenti (paragrafi 2.2.1 e 2.2.2 rispettivamente) e quelli relativi alla loro combinazione (2.2.3).

Si sottolinea che tutti i risultati mostrati fanno riferimento all'area comune ed ai pixel comuni alle analisi effettuate sui dati acquisiti dalle orbite discendenti ed ascendenti da parte dei satelliti Sentinel-1A (S-1A) e Sentinel-1B (S-1B) che compongono la costellazione. In proposito, si segnala che, a partire dal dicembre 2021, non sono più disponibili i dati acquisiti dal sensore Sentinel-1B che non è più operativo a causa di un malfunzionamento, pertanto il tempo di rivisita della costellazione è aumentato da 6 a 12 giorni. Sentinel-1B dovrebbe essere sostituito da Sentinel-1C, il cui lancio è previsto nel corso del 2024. Si fa inoltre presente che, al fine di minimizzare quanto più possibile eventuali effetti di decorrelazione o rumorosità presenti nei risultati, ai prodotti interferometrici finali è stata applicata una soglia di coerenza pari a 0.9. In Tabella 8 sono indicate le principali caratteristiche comuni ai due dataset S-1 utilizzati, mentre in Tabella 9 sono riportati i dettagli di ciascun dataset (numero di acquisizioni e interferogrammi considerati, e il corrispondente intervallo temporale).

Lunghezza d'onda	5.56 cm
Risoluzione spaziale nominale	~ 20 m x 4 m
Risoluzione spaziale dei risultati interferometrici	~ 30 m x 30 m
Estensione spaziale	~190 km x 70 km
Periodo di osservazione	marzo 2015 – aprile 2024

**Tabella 8** - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-27/04/2024	429	3080

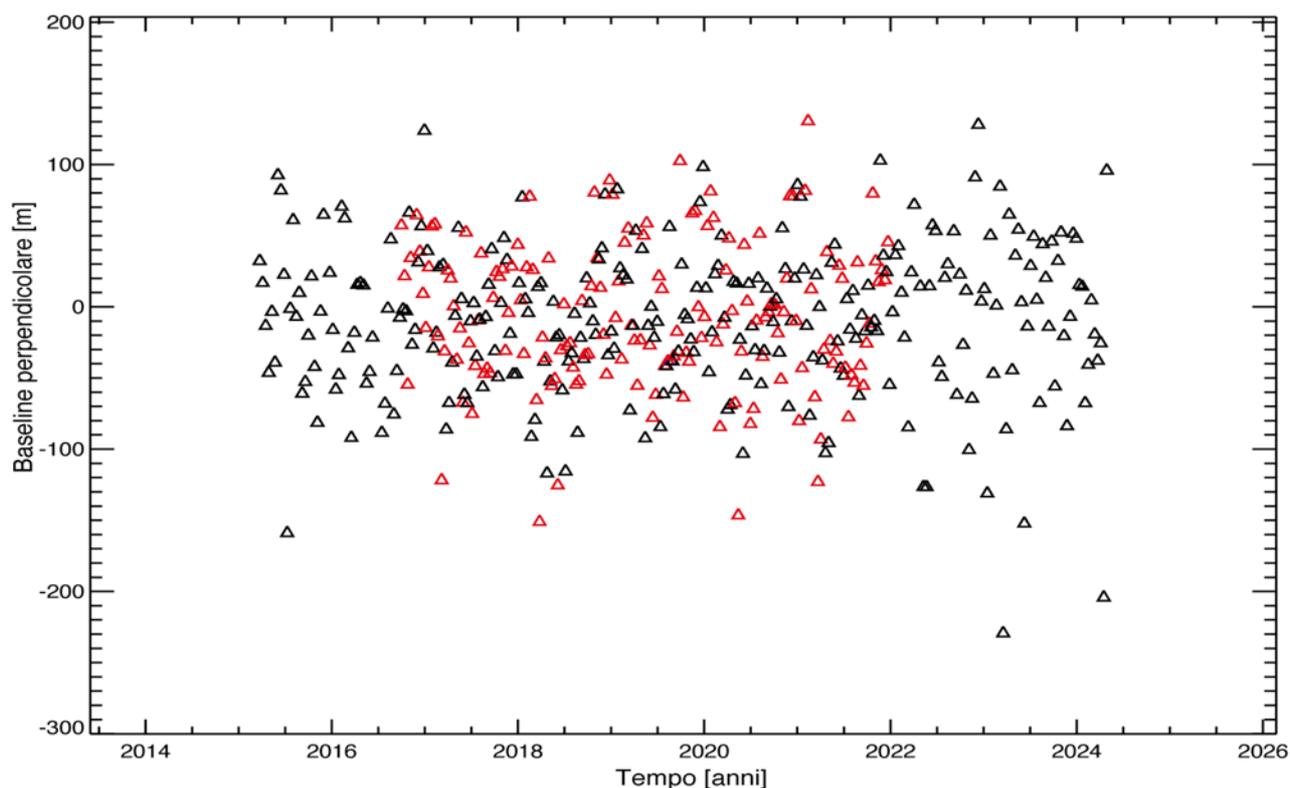
Ascendente	23/03/2015-28/04/2024	418	3011
------------	-----------------------	-----	------

**Tabella 9** - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati.

## 2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2024)

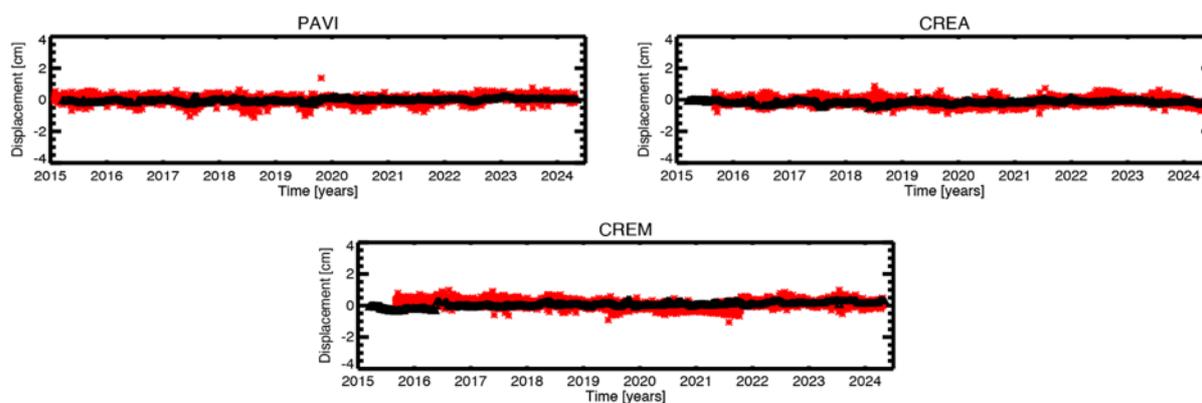
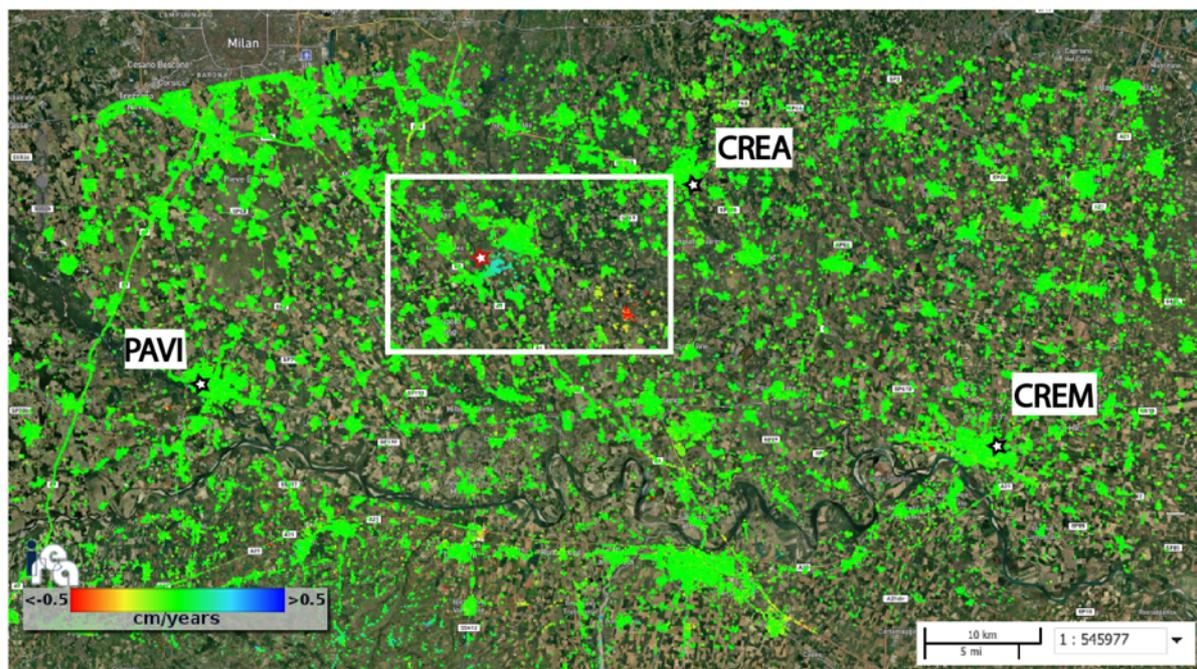
L'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 lungo orbite discendenti (track 168). In particolare, sono stati utilizzati 429 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – aprile 2024 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 15](#); grazie ad essi sono stati generati 3080 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in [Figura 16](#), dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione, proiettata lungo la linea di vista del sensore, di seguito indicata come Line of Sight (LOS), e sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione non può essere considerata affidabile, non sono mostrati.



**Figura 15** - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire da Dicembre 2021.

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GPS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in [Figura 16](#) sono evidenziate le posizioni delle tre stazioni GPS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline nere) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina rossa nel riquadro bianco indica la posizione del sito di stoccaggio.



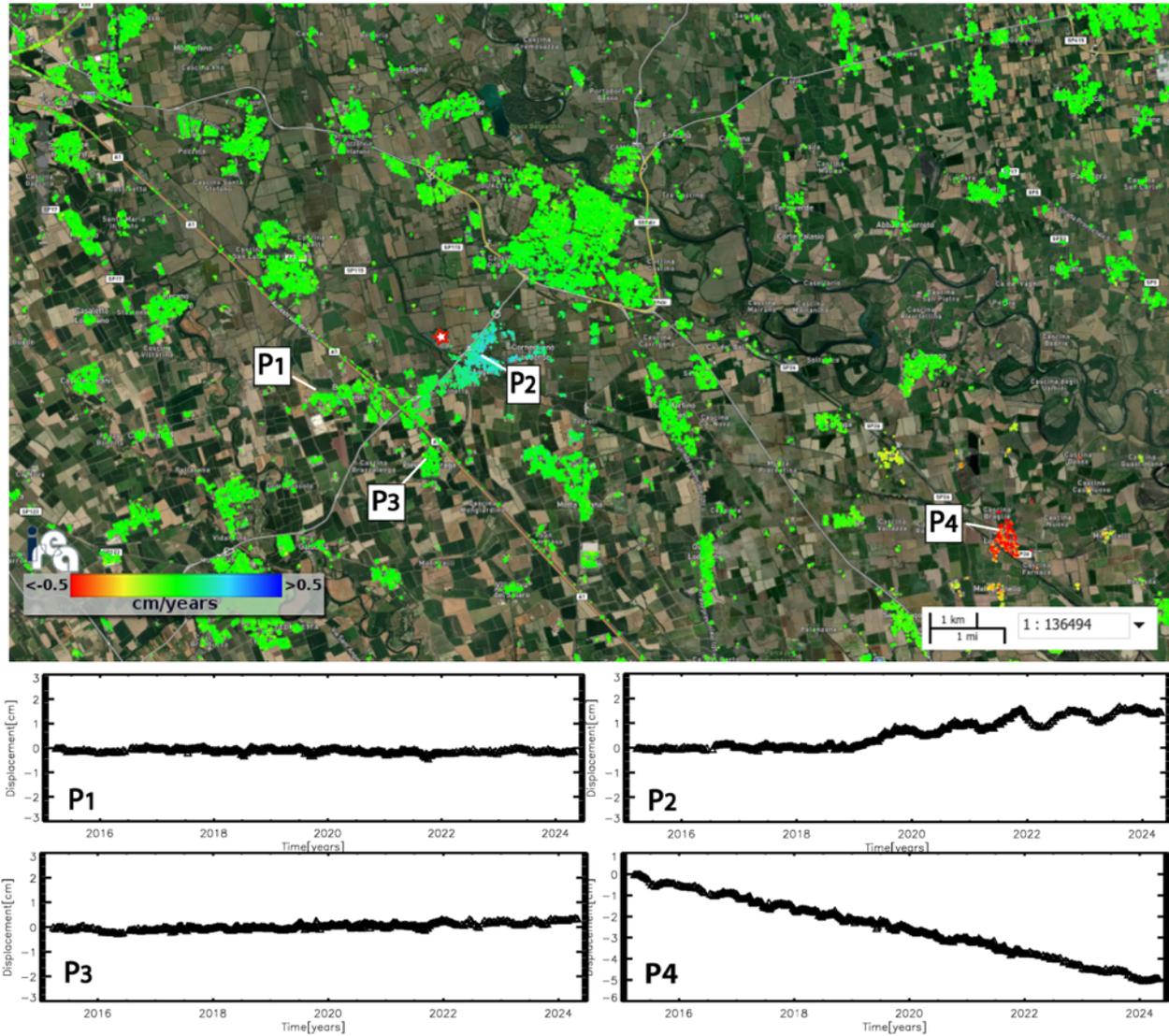
**Figura 16** - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2024. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 17](#).

Come si evince dai grafici in [Figura 16](#), i confronti tra le misure radar DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo; ciò è anche testimoniato dai valori delle deviazioni standard delle differenze tra le due misure di deformazione, il cui valor medio è inferiore a 0.3 cm. Tale valore è consistente, se non migliore, rispetto alla stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In [Figura 17](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di [Figura 16](#) relativa all'area di interesse. Si riportano, inoltre, alcuni grafici che mostrano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati a Ovest di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 in [Figura 17](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in [Figura 17](#)).

L'analisi effettuata evidenzia che nelle aree identificate dai punti P1 e P3 non si rilevano deformazioni significative (superiori a qualche mm/anno). Nella zona circostante il punto P2, invece, si nota un trend di sollevamento del suolo (avvicinamento al sensore lungo la sua linea di vista) a partire dall'inizio del 2019, periodo in cui sono iniziate le attività di stoccaggio, con un andamento oscillante, che raggiunge un'escursione massima di circa 2 cm. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza delle attività di stoccaggio di gas in serbatoi sotterranei depleti anche in Lombardia (Teatini et al, 2011; Zhou et al, 2019). Tale trend deformativo è analizzato con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.4.

È inoltre chiaramente identificabile un effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, che conferma quanto emerso dalle precedenti analisi, con un trend di deformazione sostanzialmente lineare con un tasso che varia da 0.5 cm/anno a 1 cm/anno.

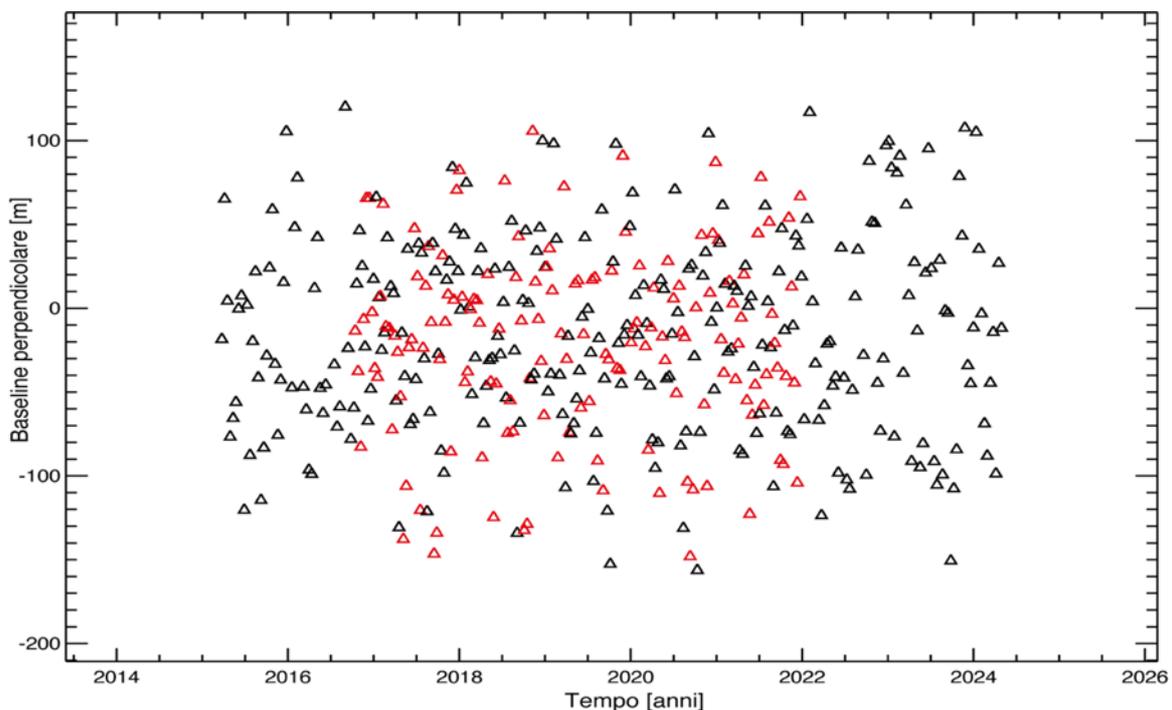


**Figura 17** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 16](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2024.

## 2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2024)

Come detto, l'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 nel periodo marzo 2015 – aprile 2024 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, sono stati utilizzati 418 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 18](#), con i quali sono stati generati 3011 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

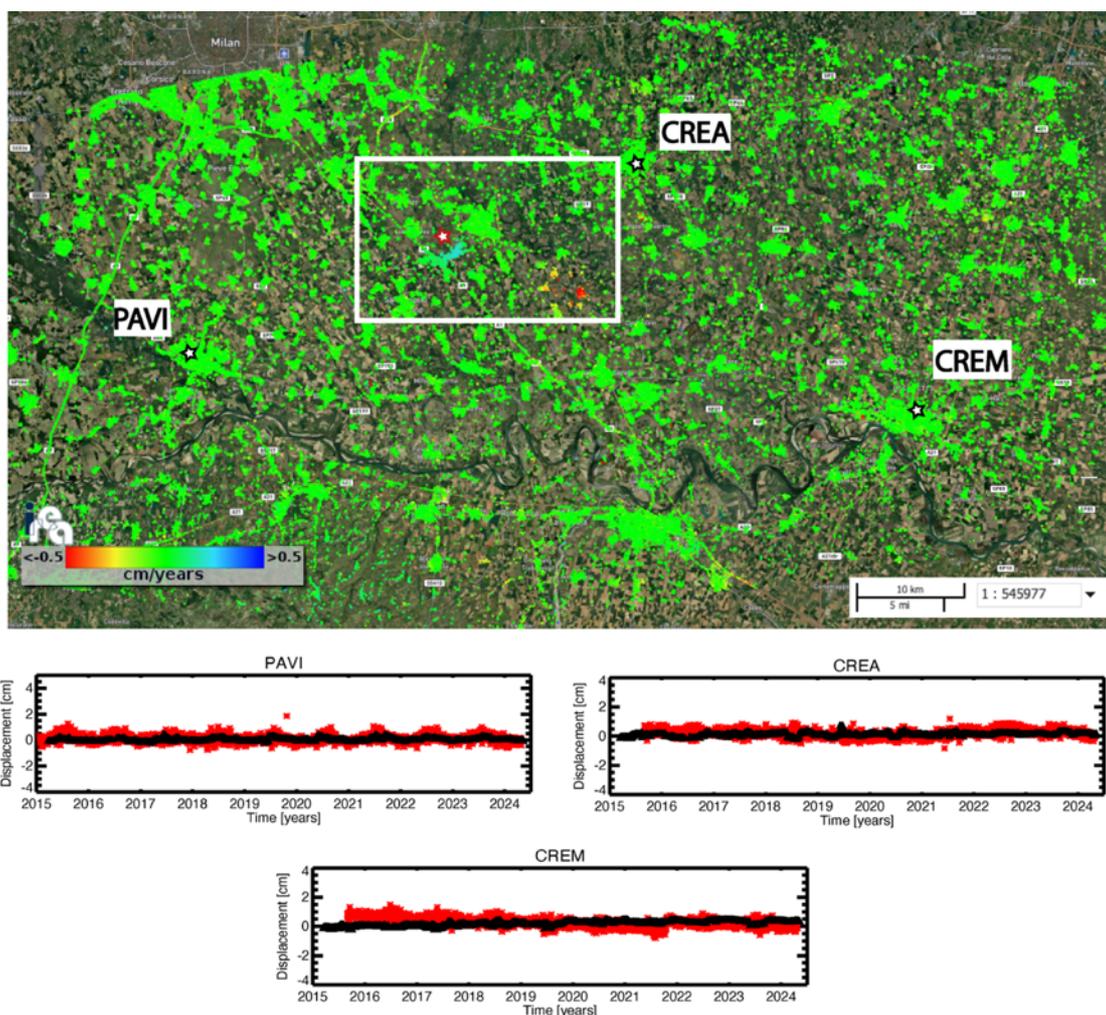
I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in [Figura 19](#), dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione in LOS sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione non può essere considerata affidabile, non sono mostrati.



**Figura 18** - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire dal Dicembre 2021.

Analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, anche le serie temporali DInSAR generate dal dataset relativo alle orbite ascendenti sono state confrontate con le

corrispondenti serie GPS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in [Figura 19](#) sono rappresentate le 3 stazioni GPS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline nere) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina rossa nel riquadro bianco indica la posizione del sito di stoccaggio.

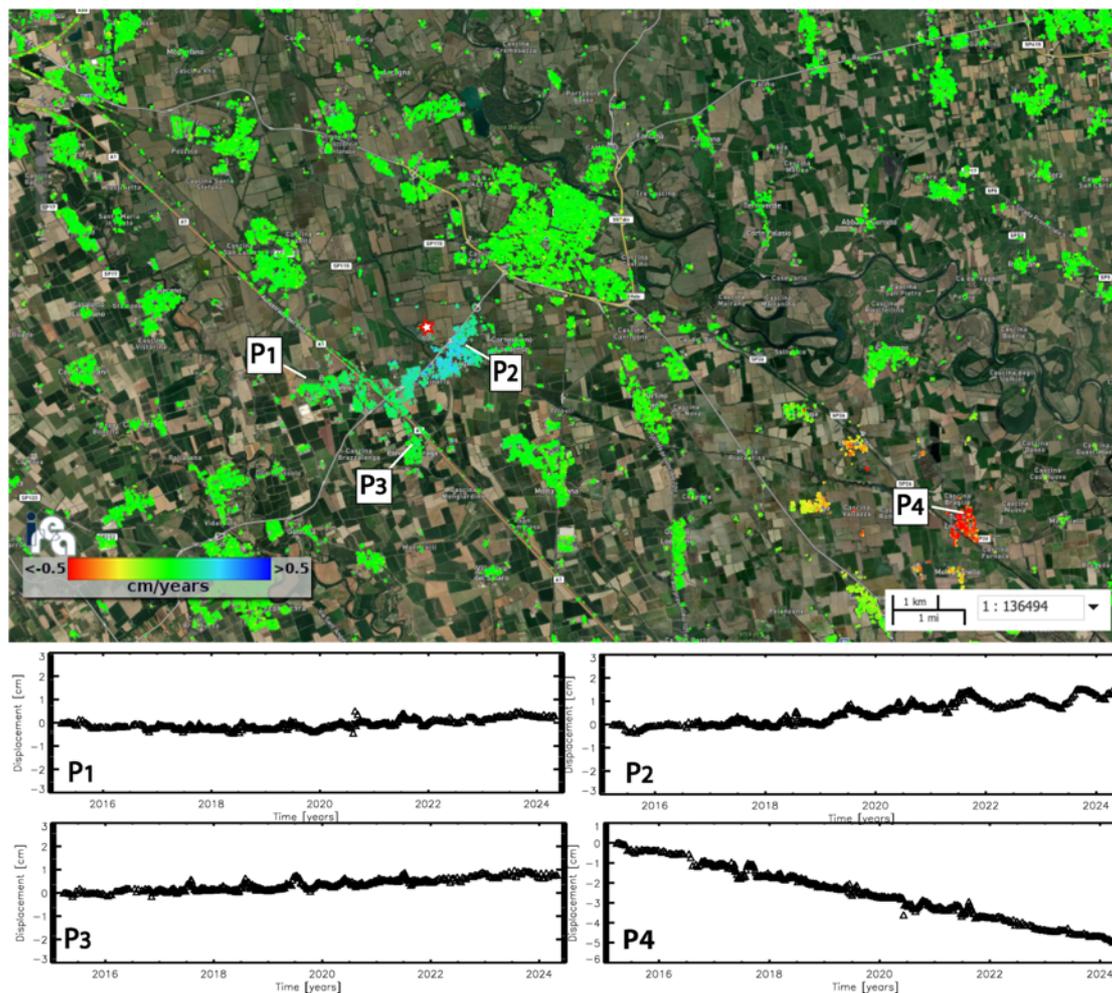


**Figura 19** - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2024. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 20](#).

Come si evince dai grafici in [Figura 19](#), i confronti tra le misure DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo, come anche testimoniato dai valori ottenuti delle deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento, il cui valor medio è inferiore a 0.4 cm. Tale deviazione standard è consistente con la stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In [Figura 20](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di [Figura 19](#) sull'area di interesse. Si riportano, inoltre, alcuni grafici che mostrano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 di [Figura 20](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 di [Figura 20](#)).

L'analisi effettuata evidenzia che nelle aree identificate dai punti P1 e P3 si rilevano lievi deformazioni, con un trend di leggero sollevamento, inferiori al cm/anno. Nella zona circostante il punto P2, invece, si nota un trend di sollevamento del suolo (avvicinamento al sensore lungo la sua linea di vista) a partire dall'inizio del 2019, periodo in cui sono iniziate le attività di stoccaggio, con un andamento oscillante, che raggiunge un'escursione massima di circa 2 cm. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza di attività di stoccaggio di gas anche in Lombardia (Teatini et al, 2011; Zhou et al, 2019). Tale trend deformativo è analizzato con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.4. È inoltre chiaramente identificabile un effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, che mostra, in continuità con le analisi storiche effettuate con ERS-1/2 ed ENVISAT, un trend di deformazione sostanzialmente lineare con un tasso che varia da 0.5 cm/anno a 1 cm/anno.

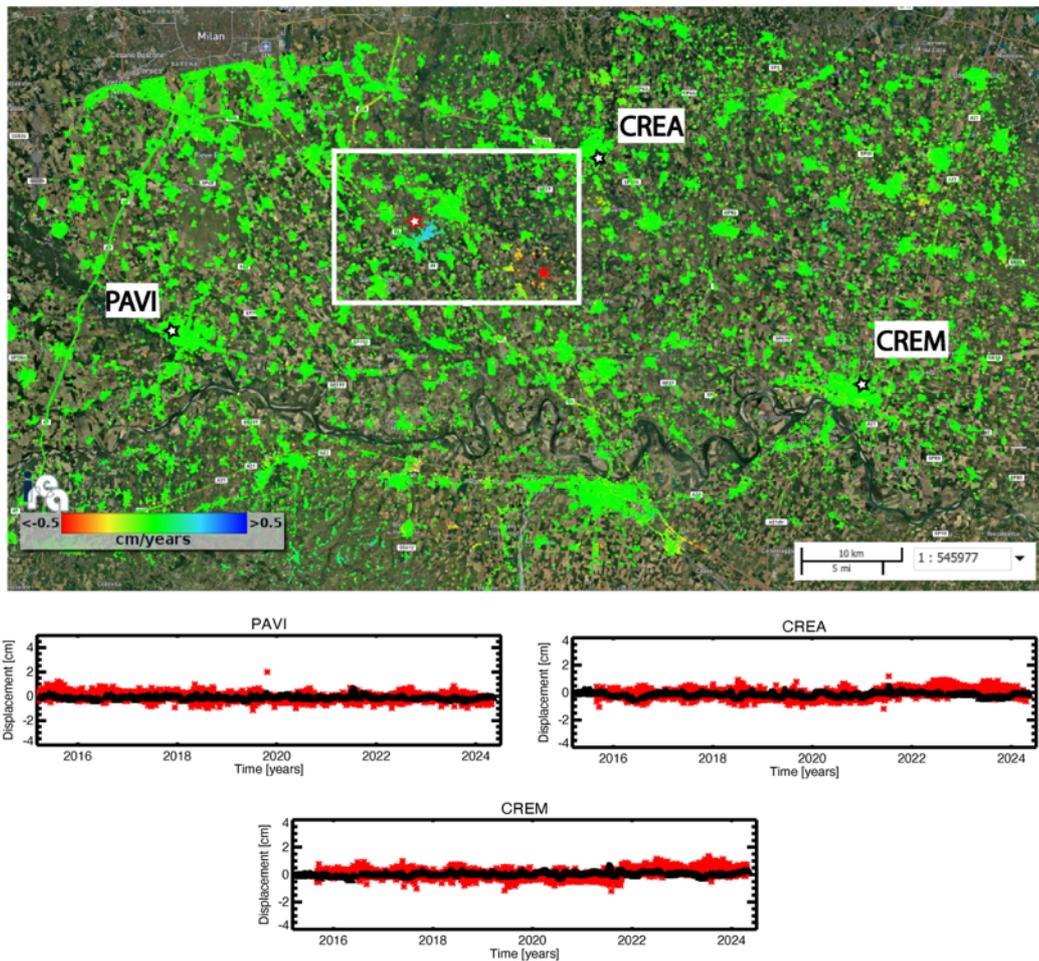


**Figura 20** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 19](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2024.

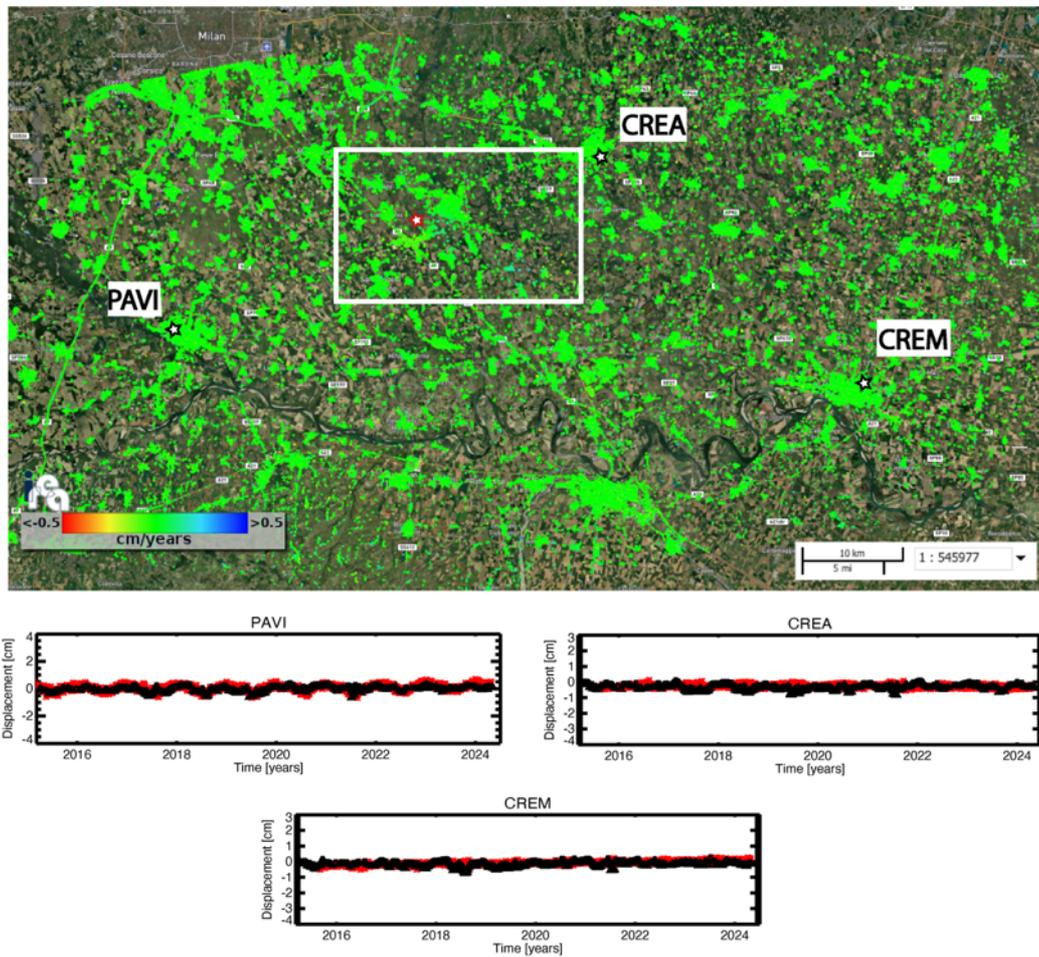
### **2.2.3 Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale**

Le mappe di velocità media relative alle componenti verticale ed Est-Ovest delle deformazioni rilevate, ottenute combinando opportunamente le informazioni ricavate dalle analisi effettuate dalle orbite ascendenti e discendenti, sono riportate nelle Figure 19 e 20, rispettivamente. Anche in questo caso, utilizzando le misure delle 3 stazioni GPS rese disponibili da OGS indicate sulle mappe, sono stati effettuati i confronti tra le serie di deformazione GPS e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (asterischi rossi e triangoli neri, rispettivamente). In particolare, in [Figura 21](#) si mostrano i grafici dei confronti effettuati per la componente verticale della deformazione; le deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento presentano un valor medio pari a circa 0.3 cm. In [Figura 22](#), analogamente, si mostrano i grafici dei confronti effettuati per la componente Est-Ovest della deformazione; in questo caso le deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento presentano un valor medio di circa 0.2 cm. Da tale analisi si evince che in entrambi i casi i confronti tra le misure DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo e i valori di deviazione standard sono consistenti con le accuratezze della tecnica SBAS riportate in letteratura.

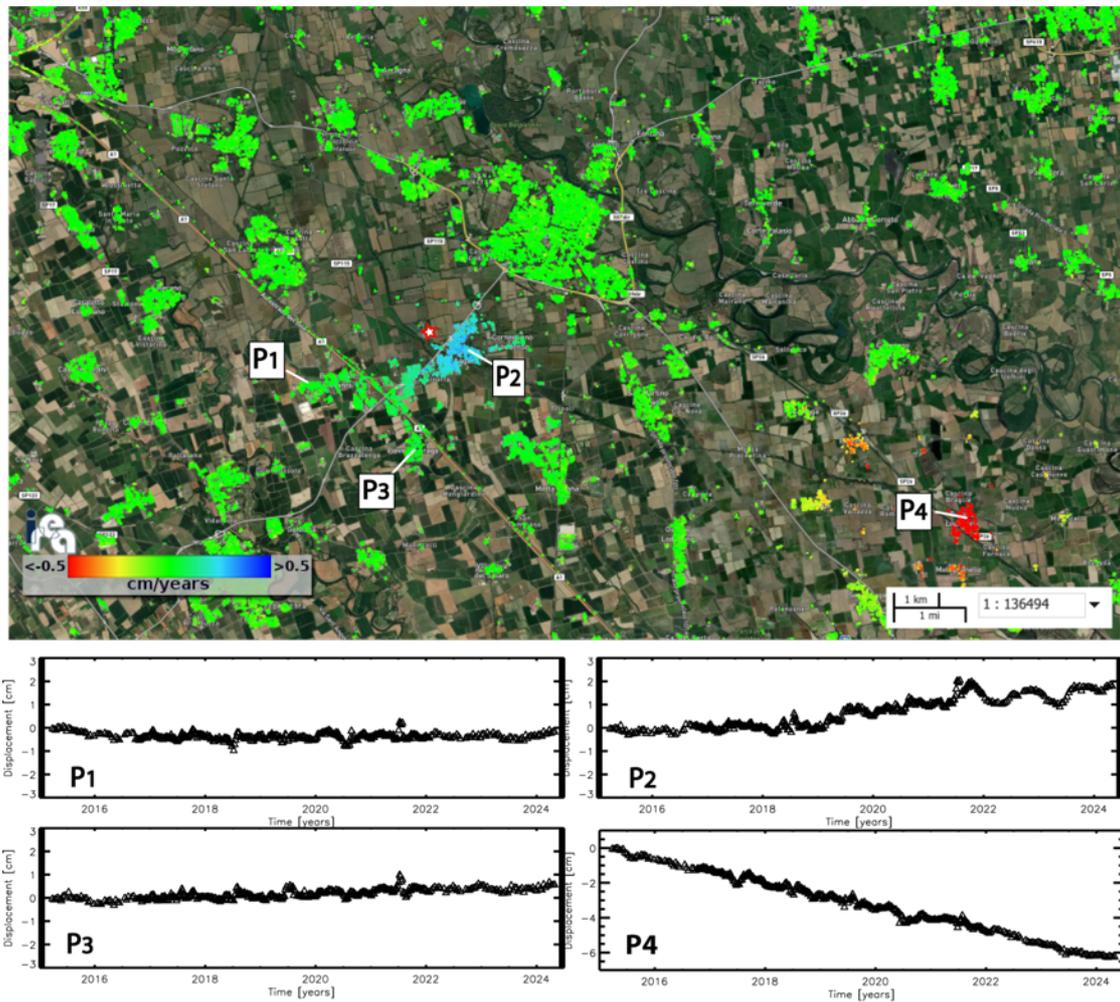
Le [Figure 23](#) e [24](#) mostrano le mappe delle velocità medie di deformazione relative, rispettivamente, alla componente verticale ed Est-Ovest dello spostamento e rappresentano un ingrandimento della zona identificata dal rettangolo bianco nelle [Figure 21](#) e [22](#). Sono inoltre rappresentati i grafici relativi all'andamento temporale della deformazione di quattro punti selezionati. L'analisi dei risultati mostrati nelle [Figure 23](#) e [24](#) evidenzia che nel periodo marzo 2015-aprile 2024 non si rilevano deformazioni significative nell'area di Cornegliano Laudense nelle aree identificate dai punti P1 e P3, mentre la zona corrispondente al punto P2 mostra un effetto deformativo prevalentemente in direzione verticale, con un trend di sollevamento del suolo a partire dall'inizio del 2019 con una velocità media variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno. Tale fenomeno di deformazione è analizzato con maggior dettaglio nel paragrafo che segue. Inoltre, i risultati mostrano un significativo effetto deformativo nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, avente una significativa componente verticale (vedi plot del punto P4) con un tasso il cui valore è compreso tra 0.5 cm/anno e 1 cm/anno.



**Figura 21** - Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 23](#).



**Figura 22** - Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 24](#).



**Figura 23** - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di [Figura 21](#) in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente verticale dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).



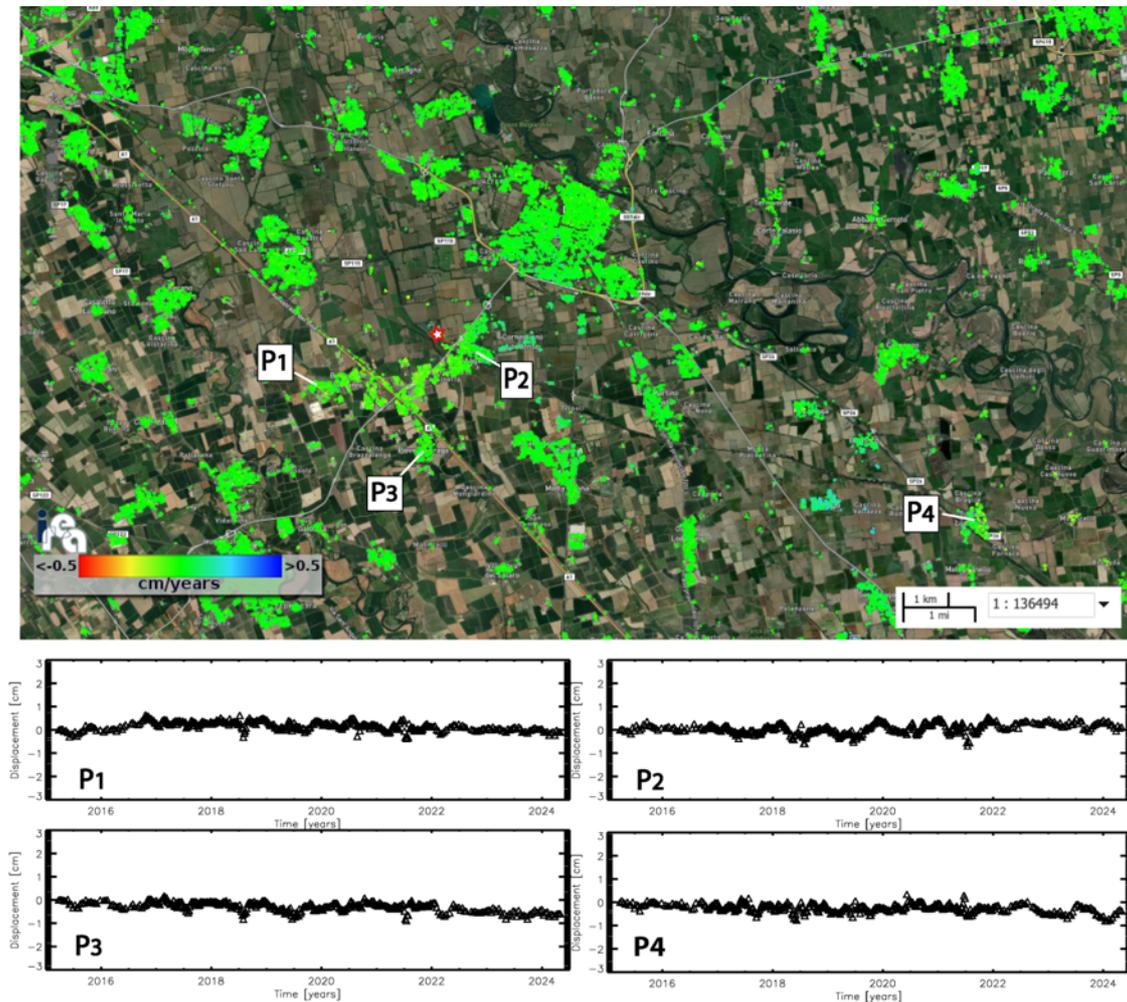
**OGS**

Istituto Nazionale  
di Oceanografia  
e di Geofisica  
Sperimentale



Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento  
elettromagnetico  
dell'ambiente

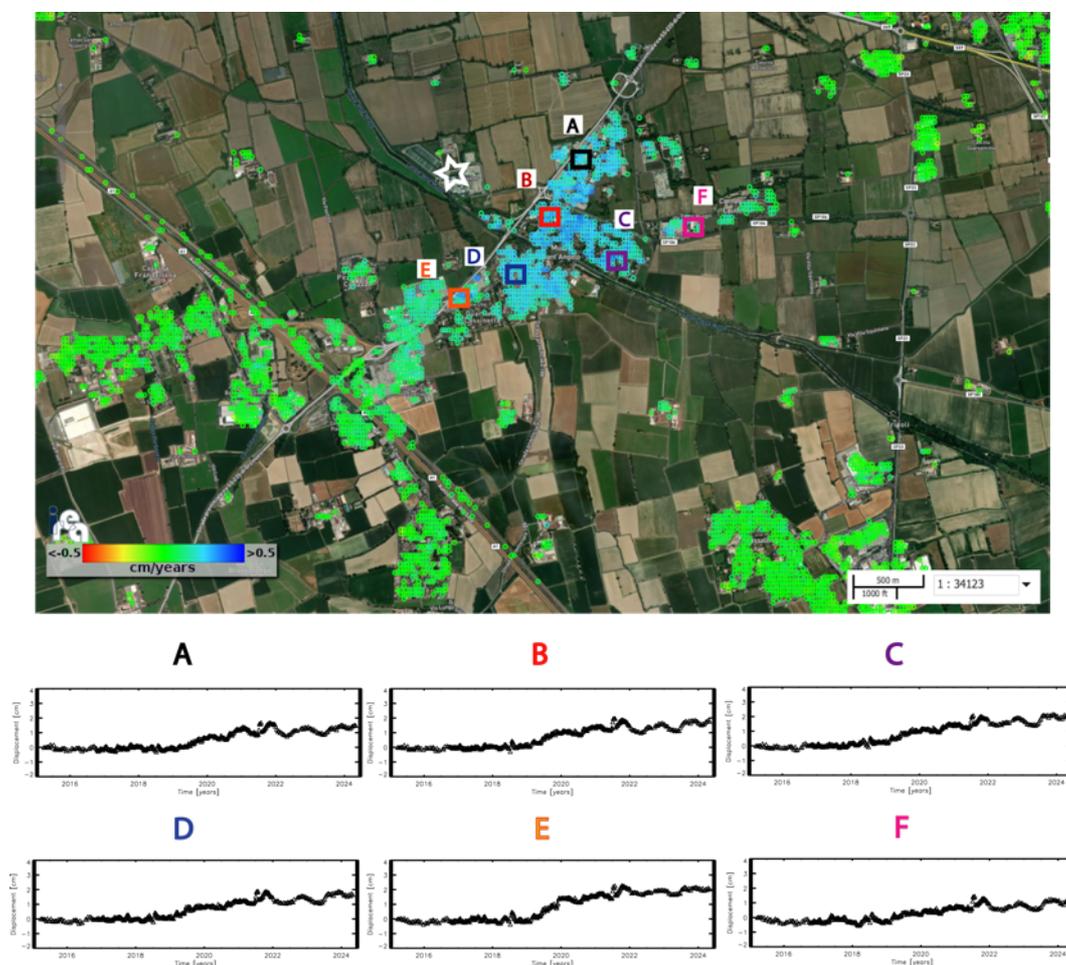


**Figura 24** - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione [Figura 22](#) in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).

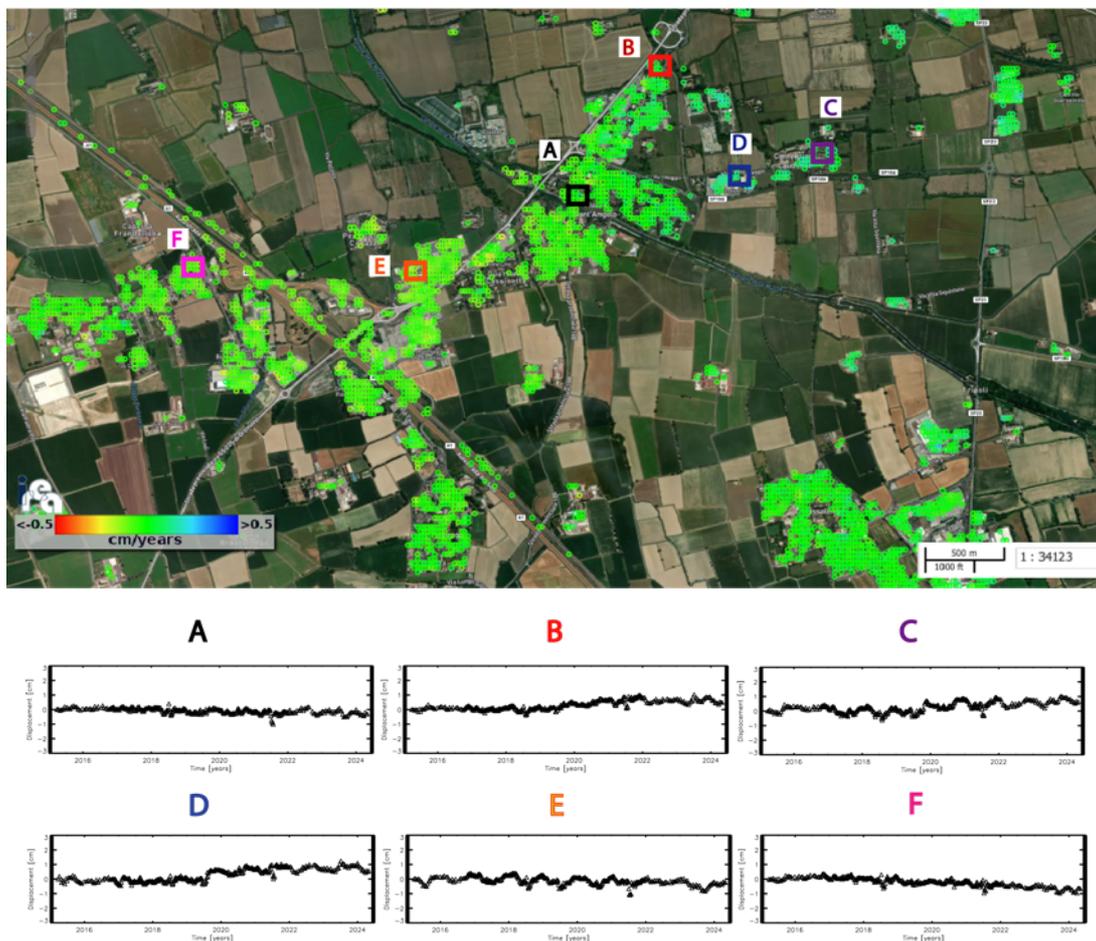
## 2.2.4 Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense.

Dalle analisi SBAS svolte nei precedenti paragrafi, effettuate con i dati Sentinel-1 acquisiti sia da orbite discendenti, sia ascendenti e con la combinazione delle due orbite,

si evince che l'area identificata dal punto P2 nelle [Figure 17, 20, 23 e 24](#), che è quella più vicina all'impianto di stoccaggio, mostra un effetto deformativo di sollevamento del suolo a partire dall'inizio del 2019 con velocità media variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno. Consistentemente con l'effetto di sollevamento, l'area circostante il punto P2 mostra anche delle lievi deformazioni in direzione Est-Ovest. Questo paragrafo è finalizzato a mostrare con maggior dettaglio tali fenomeni. In particolare, nelle [Figure 25 e 26](#) sono rappresentati, rispettivamente, gli ingrandimenti delle mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio con le serie temporali dello spostamento superficiale di alcuni pixel scelti nell'area caratterizzata dalla maggior deformazione rilevata.



**Figura 25** - Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.



**Figura 26.** Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.

In [Figura 25](#) si mostrano le serie temporali della componente verticale dello spostamento del suolo di tali pixel. Dai grafici si evince chiaramente che tutta la zona è caratterizzata da un effetto deformativo prevalentemente in direzione verticale avente un trend di sollevamento del suolo con andamento oscillante e velocità variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno, ed un'escursione massima di circa 2 cm raggiunta nei periodi di settembre/ottobre 2021, 2022 e 2023.

In [Figura 26](#) si mostrano le serie temporali della componente Est-Ovest dello spostamento del suolo di tali pixel. Dai grafici si evince che la zona immediatamente ad Est del sito di stoccaggio è caratterizzata da spostamenti del suolo in direzione Est con valori che superano di poco 1 cm (punti B, C e D di [Figura 26](#)), mentre nella zona ad Ovest del sito di stoccaggio si rilevano degli spostamenti in direzione Ovest con valori

inferiori al centimetro (punti E ed F di [Figura 26](#)). Dall'osservazione congiunta delle [Figure 25](#) e [26](#) si rileva un effetto deformativo compatibile con una leggera inflazione, ovvero un rigonfiamento del suolo.

Il comportamento deformativo osservato è in linea con quelli rilevati e studiati in altri siti caratterizzati da attività di stoccaggio del gas anche in Lombardia (Teatini et al, 2011; Zhou et al, 2019), dove si mostra che la deformazione superficiale segue inizialmente la fase di caricamento del deposito di stoccaggio per poi oscillare intorno ad un valore medio in accordo alla ciclicità delle operazioni. Va altresì rilevato che il fenomeno deformativo appare distribuito uniformemente sui punti campionati, con livelli ridotti di variazione locale delle deformazioni.

## 3. Conclusioni

### Monitoraggio sismico

L'infrastruttura di monitoraggio denominata RMCL, costituita attualmente da 10 stazioni sismometriche collocate in pozzo e superficie e da una stazione di posizionamento satellitare, è operativa dal 1° gennaio 2017. Il presente rapporto riguarda il periodo di sei mesi 1/11/2023-30/4/2024 e corrisponde alla fase di produzione del sesto anno di stoccaggio.

Nei sei mesi rendicontati l'infrastruttura di monitoraggio ha operato correttamente senza interruzioni di rilievo. Nel semestre cui si riferisce la presente relazione sono stati localizzati tre eventi sismici nelle aree di rilevazione della RMCL. Tali eventi rientrano nel quadro della sismicità già evidenziato nelle precedenti relazioni. Anche alla fine di questo semestre d'esercizio non si sono rilevate variazioni statisticamente significative nella sismicità successivamente all'avvio delle attività di stoccaggio.

### Monitoraggio delle deformazioni superficiali

Per ciascun sito della Rete GNSS LODI sono state calcolate le serie temporali fino alla data del 30/4/2024 nei due sistemi di riferimento ITRF14, riferito al centro di massa della Terra, ed ETRF14, solidale con la placca continentale europea. La stazione LODI presenta uno spostamento marcato verso Nord e verso Ovest e un trend deformativo verticale positivo verso l'alto, già evidenziato nelle relazioni precedenti. In particolare, la stazione LODI registra un comportamento distinto da quello delle stazioni circostanti a partire dalla seconda metà del 2019, mostrando uno spostamento orizzontale in direzione Nord-Ovest e verticale verso l'alto, accentuato soprattutto nell'estate del 2021, e che continua anche nel 2024.

È stata inoltre effettuata l'analisi relativa alla distribuzione spaziale delle deformazioni superficiali ed alla loro evoluzione temporale nell'area di interesse, mediante l'utilizzo di dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR), elaborati tramite la tecnica avanzata di Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) nota con l'acronimo SBAS (Small BAseline Subset) e sviluppata presso l'IREA-CNR. In particolare sono state generate mappe e serie temporali della deformazione superficiale relative all'area di interesse utilizzando sia dati di archivio, sia di recente acquisizione fino al 30/04/2024.

Ricordiamo che per il periodo pregresso maggio 1993 – ottobre 2010, l'analisi interferometrica effettuata con i dati ERS-1/2 ed ENVISAT su orbite sia discendenti sia ascendenti non aveva evidenziato spostamenti significativi (superiori a 2–3 mm/anno) nell'area di interesse, ad eccezione di deformazioni molto localizzate e di un significativo

effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano che mostrava un trend di deformazione sostanzialmente lineare, con un tasso di circa 1 cm/anno. Risultati simili erano stati ottenuti anche dall'analisi delle mappe di velocità media di deformazione relative alle componenti verticale ed Est-Ovest dello spostamento superficiale, e confermavano la deformazione significativa presente a scala locale nell'area di Turano Lodigiano con un tasso di circa 1 cm/anno nella componente verticale e di circa 0.5 cm/anno nella direzione Est-Ovest. Data la distanza di circa 15 km che intercorre tra Turano Lodigiano e il sito di stoccaggio, si ritiene che la deformazione rilevata non sia correlata con le attività di stoccaggio.

L'analisi interferometrica effettuata con i dati più recenti acquisiti dai sensori Sentinel-1 (S-1) è consistente con i risultati ottenuti con i dati del precedente report. In particolare, si conferma che a partire dall'inizio del 2019 le mappe e le serie temporali di deformazione relative ai dati acquisiti da orbite discendenti ed ascendenti mostrano un effetto deformativo nell'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio con una significativa componente verticale, avente un trend di sollevamento del suolo con andamento oscillante e velocità variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno, ed un'escursione massima di circa 2 cm raggiunta nei periodi di settembre/ottobre 2021, 2022 e 2023. Si rileva, inoltre, una lieve componente Est-Ovest che raggiunge uno spostamento massimo di poco più di 1 cm verso Est nella zona orientale del sito di stoccaggio e di circa 1 cm verso Ovest nella zona occidentale del suddetto sito. Il comportamento deformativo osservato è compatibile con una leggera inflazione. Tale effetto deformativo è atteso e coerente con quelli rilevati e studiati in altri siti caratterizzati da attività di stoccaggio del gas, dove si mostra che la deformazione superficiale segue inizialmente la fase di caricamento del deposito di stoccaggio per poi oscillare intorno ad un valore medio in accordo alla ciclicità delle operazioni. Tale fenomeno deformativo appare distribuito uniformemente sui punti campionati, con livelli di deformazione locale ridotti. Questa quantità sarà stimata con sempre maggiore accuratezza con il progredire del fenomeno deformativo.

Sono inoltre confermate, anche dalle analisi S-1, le deformazioni molto localizzate presenti nell'area di Turano Lodigiano aventi una significativa componente verticale con un trend di deformazione sostanzialmente lineare e un tasso di subsidenza fino a circa 1 cm/anno. Essendo tale area caratterizzata da fenomeni deformativi già evidenti nelle serie ERS-ENVISAT, e trovandosi a circa 15 km dal sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense, si ritiene che le deformazioni rilevate non siano correlate con le attività del suddetto stoccaggio.

Si evidenzia inoltre che è stata effettuata anche una dettagliata analisi dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS/GNSS rese disponibili da OGS. Tali confronti hanno prodotto valori delle deviazioni standard delle differenze tra le misure di spostamento DInSAR e quelle geodetiche che sono non superiori a 0.4 cm, risultando quindi assolutamente in linea con l'accuratezza della tecnica SBAS riportate in letteratura.

## Bibliografia

- Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D., Amit, H., Aubert, J., Baerenzung, J., Bondar, T.N., Browin, W.J., Califf, S., Chambodut, A., Chulliat, A., Cox, G.A., Finlay, C.C., Fournier, A., Gillet, N., Grayver, A., Hammer, M.D., Holschneider, M., Huder, L., Hulot, G., Jager, T., Kloss, C., Korte, M., Kuanh, W., Kuvshinov, A., Langlais, B., Léger, J.-M., Levur, V., Livermore, P.W., Lowes, F.J., Macmillan, S., Magnes, W., Manda, M., Marsal, S., Matzka, J., Metman, M.C., Minami, T., Morschhauser, A., Mound, J.E., Nair, M., Nakano, S., Olsen, N., Pavón-Carrasco, F.J., Petrov, V.G., Ropp, G., Rother, M., Sabaka, T.J., Sanchez, S., Saturnino, D., Schnepf, N.R., Shen, X., Stolle, C., Tangborn, A., Tøffner-Clausen, L., Tob, H., Torta, J.M., Varner, J., Vervelidou, F., Vigneron, P., Wardinski, I., Wicht, J., Woods, A., Yang, Y., Zeren, Z., and Zhou, B. (2021). International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space* 73, 49, doi: 10.1186/s40623-020-01288-x.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., and Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013098.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., Collilieux, X. (2017). ITRF2014 plate motion model, *Geophysical Journal International*, 209(3), 1906–1912, doi:10.1093/gji/ggx136, 2017.
- Bragato, P. L. e Tonto, A. (2005). Local Magnitude in Northeastern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(2):579–591.
- Dong, D., Herring, T. A., and King, R. W. (1998). Estimating Regional Deformation from a Combination of Space and Terrestrial Geodetic Data. *J. Geodesy* 72 (4), 200–214. doi:10.1007/s001900050161.
- Floyd, M. A., and Herring, T. A. (2019). Fast statistical approaches to geodetic time series analysis. In J. P. Montillet & M. Bos (Eds.), *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences* Bos and Montillet, Springer Geophysics. Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-030-21718-1.
- Garbin, M., and E. Priolo (2013). Seismic event recognition in the Trentino area (Italy): Performance analysis of a new semi-automatic system, *Seismol. Res. Lett.* 84, 65–74, doi: 10.1785/0220120025.
- Guidarelli M. et al. (2022). Concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio”. Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2022 – Relazione semestrale. Rel. OGS 2023/7 Sez. CRS 1.
- Guidarelli M. et al. (2024). Concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio”. Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2023 – Seconda relazione annuale 2023.2. Rel. OGS 2024/7.
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., and McClusky, S.C (2018). Introduction to GAMIT/GLOBK Introduction to 680 GAMIT/GLOBK, Release 10.7. Available at: [http://geoweb.mit.edu/gg/docs/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/docs/Intro_GG.pdf).
- Lahr, J. C. (1984). HYPOELLIPSE/VAX: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude and First-Motion Pattern, US Geological Survey Open-File Report, 84-519, 76 pp.

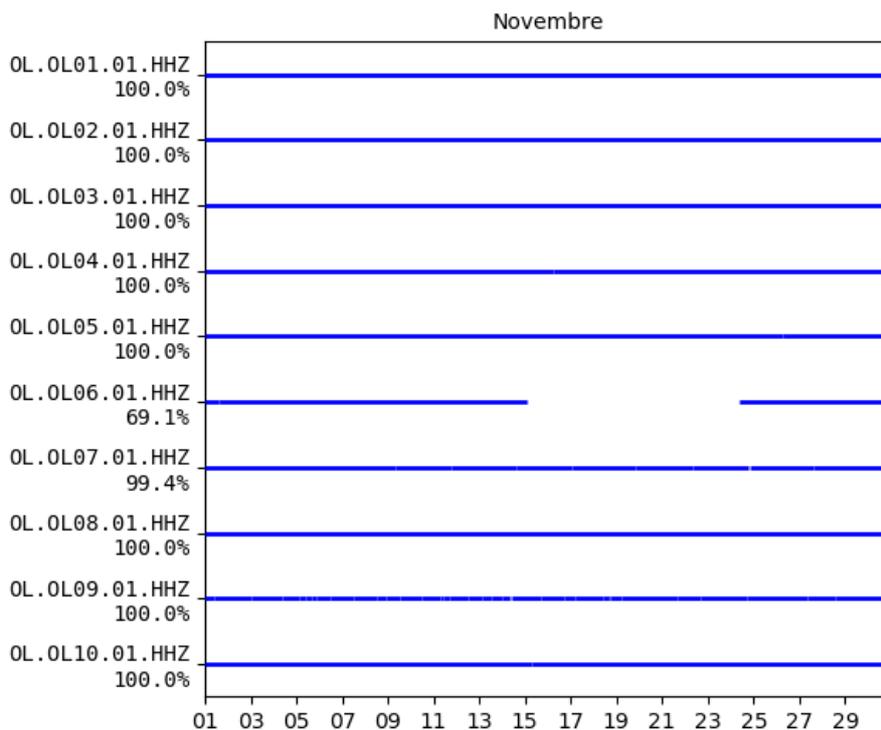
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean dynamics*, 56, 394-415.
- Masson C., Mazzotti S. and Vernant, P. (2019). Precision of continuous GPS velocities from statistical analysis of synthetic time series, *Solid Earth*, 10, 329–342, doi:10.5194/se-10-329-2019.
- MiSE-UNMIG (2014). Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche, 38 pp.; [https://unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/2018/07/85\\_238.pdf](https://unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/2018/07/85_238.pdf).
- Noll, C. (2010) The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, *Advances in Space Research*, Volume 45, Issue 12, 15 June 2010, Pages 1421-1440, ISSN 0273-1177, DOI: 10.1016/j.asr.2010.01.018.
- OGS (Istituto Nazionale Di Oceanografia E Di Geofisica Sperimentale) (2016): Friuli Regional Deformation Network Data Center (1.0), OGS (Istituto Nazionale Di Oceanografia E Di Geofisica Sperimentale) [data set], <https://doi.org/10.6092/frednet>.
- Petit, G. and Luzum, B. (2010). IERS conventions, Tech. rep., Bureau International des Poids et mesures sevres (France).
- Priolo E. et al. (2017). *Progetto per la realizzazione dell'infrastruttura di monitoraggio sismico per la concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio" presso Cornegliano Laudense (LO)*. Relazione conclusiva sulla realizzazione dell'infrastruttura. OGS, Sgonico, 6 febbraio 2017. Rel. OGS 2017/13 Sez. CRS 3.
- Priolo E. et al. (2018). *Progetto per la realizzazione dell'infrastruttura di monitoraggio sismico per la concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio" presso Cornegliano Laudense (LO)*. Relazione completa sulle attività iniziali. OGS, Sgonico, 13 novembre 2018. Rel. OGS 2018/77 Sez. CRS 23.
- Priolo E. et al. (2021). Concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio". Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2021 – Seconda relazione annuale. Rel. OGS 2022/57 Sez. CRS 2 SISMIND.
- Priolo E. et al. (2022). Concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio". Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2022 – Relazione semestrale. Rel. OGS 2022/99 Sez. CRS 18.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2012). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. In: M. Mucciarelli (Ed.), *Tecniche Speditive per la Stima dell'Amplificazione Sismica, Studi teorici ed applicazioni professionali*, Aracne Ed., 431-445.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2015a). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. *Seismological Research Letters*, 86, 978-984, doi: 10.1785/0220140175. Available at <http://srl.geoscienceworld.org/content/early/2015/02/18/0220140175.full.pdf>.
- Priolo E., Romanelli M., Plasencia-Linares M. P., Garbin M., Peruzza L., Romano M. A., Marotta P., Bernardi P., Moratto L., Zuliani D. and Fabris P. (2015b). Seismic Monitoring of an Underground Natural Gas Storage Facility – The Collalto Seismic Network. *Seismological Research Letters*, 86, 1, 109-123 + Electronic Supplement.

- Teatini, P., Castelletto, N., Ferronato, M., Gambolati, G., Janna, C., Cairo, E., Marzorati, D., Colombo, D., Ferretti, A., Bagliani, A., Bottazzi, F., (2011). Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy, *J. Geophys. Res.*, 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793.
- Tunini L., Zuliani D., Magrin A. (2022). Applicability of Cost-Effective GNSS Sensors for Crustal Deformation Studies. *Sensors*, no. 1: 350. <https://doi.org/10.3390/s22010350>.
- Tunini L., Magrin A., Rossi G., and Zuliani D. (2024). Global Navigation Satellite System (GNSS) time series and velocities about a slowly convergent margin processed on high-performance computing (HPC) clusters: products and robustness evaluation, *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 1083–1106, <https://doi.org/10.5194/essd-16-1083-2024>. Dataset on Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8055800>.
- Zhou, P., Yang, H., Wang, B., & Zhuang, J. (2019). Seismological investigations of induced earthquakes near the Hutubi underground gas storage facility. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JB017360>.

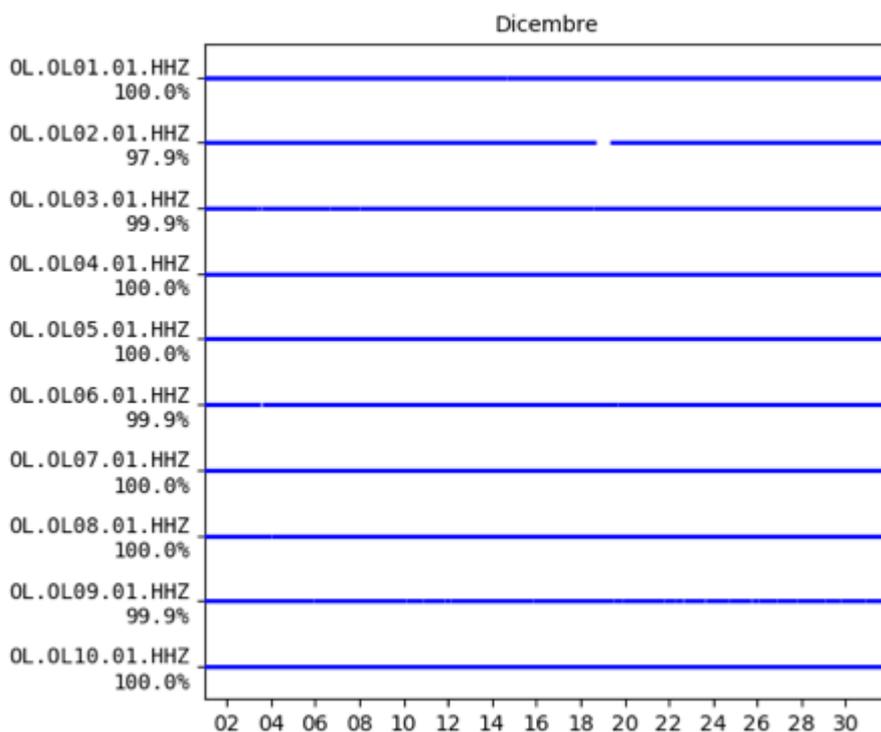
## **Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL**

I grafici raffigurano la disponibilità dei dati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL) nel periodo 1/11/2023-30/4/2024, considerato in questa relazione. Ogni tabella si riferisce a un mese. Le barre orizzontali grigie indicano la disponibilità dei dati per le stazioni corrispondenti (codice OL##). L'ascissa indica il tempo rappresentato come giorno del mese corrente. Per ogni stazione è mostrato solo il canale verticale (HHZ) del sismometro posto in pozzo.

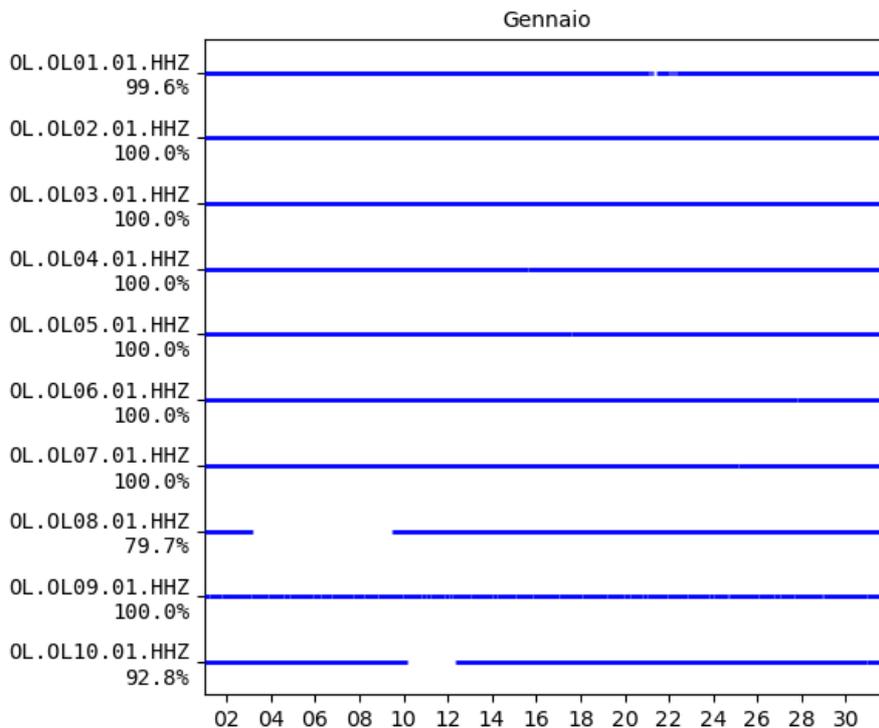
### Novembre 2023



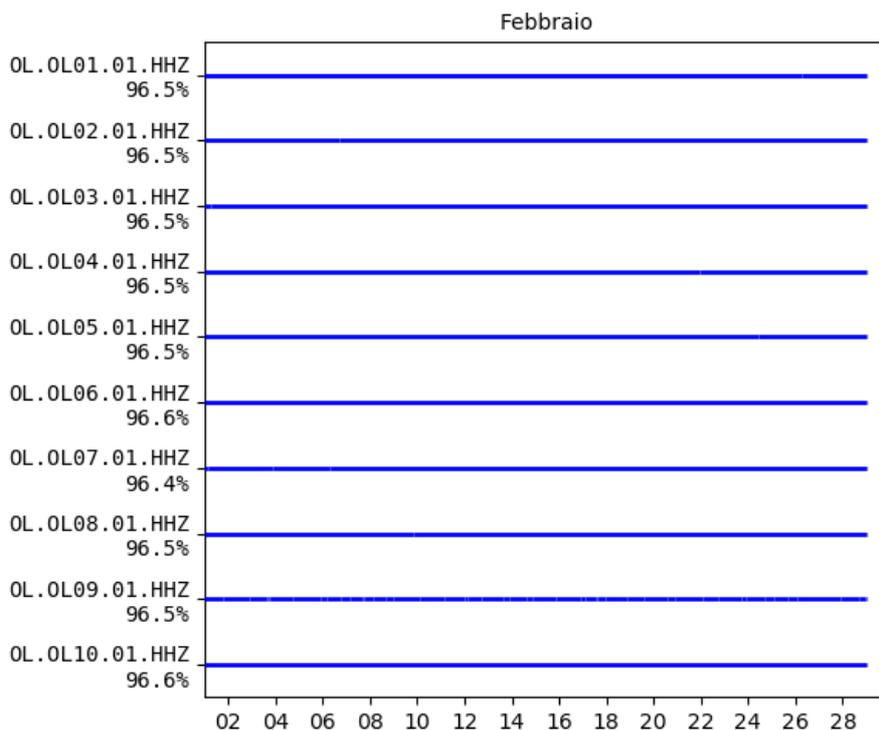
### Dicembre 2023



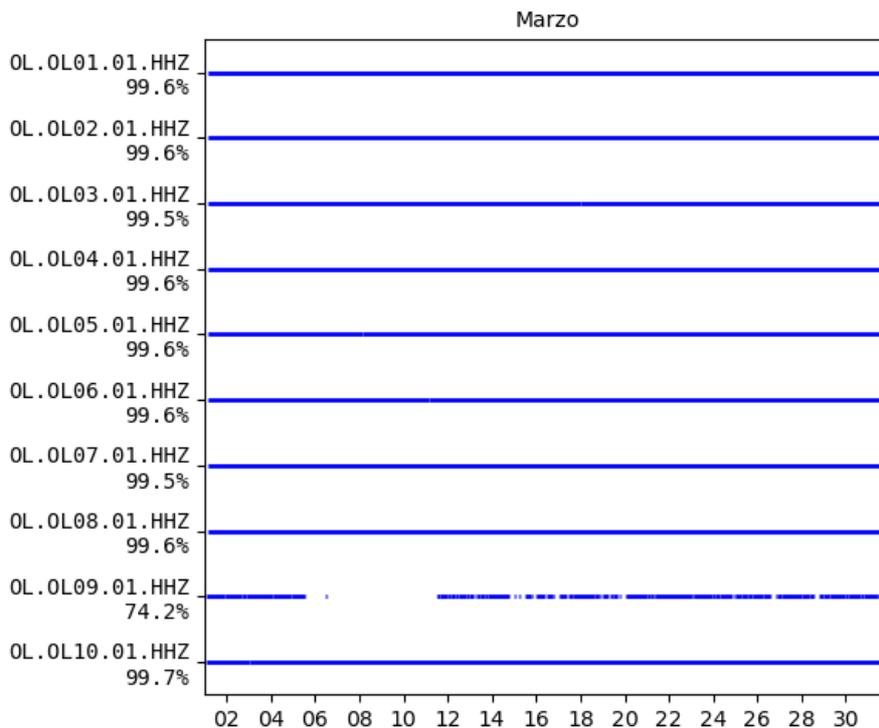
### Gennaio 2024



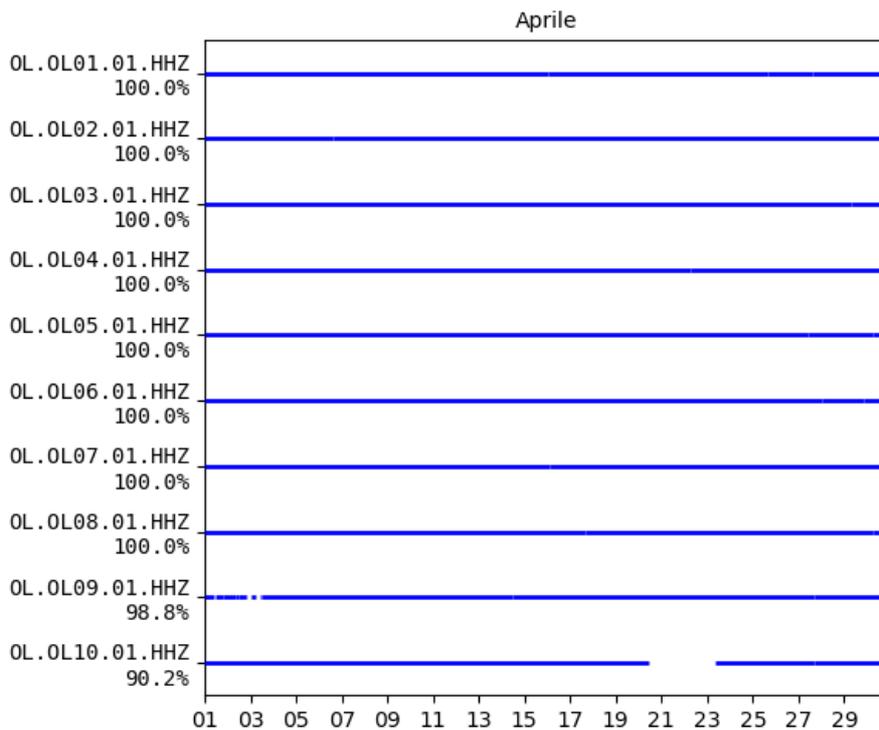
### Febbraio 2024



Marzo 2024



Aprile 2024



## Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione

### Legenda

id	numero identificativo evento
Area	area di appartenenza ("DI" = dominio interno, "DE" = dominio esterno, "AE" = area estesa)
yyyy/mm/dd	data (anno/mese/giorno)
hh:mm:ss.ss	ora UTC 12 (ora;minuto:secondo.centesimali di secondo)
lat	latitudine (gradi decimali)
lon	longitudine (gradi decimali)
depth	profondità (km)
MI	magnitudo locale
Q	qualità della localizzazione
GAP	angolo di gap (gradi)
No	numero di fasi
Ns	numero di stazioni
errh1	errore orizzontale 1 (km)
errh2	errore orizzontale 2 (km)
errv	errore verticale (km)
rms	residuo medio (s)
Location	località

\* : L'asterisco indica eventi con errore statistico nella localizzazione molto elevato.

"AE°" : sigla utilizzata per indicare eventi che vengono inclusi nella lista anche se escono di poco dal volume corrispondente ad AE, come ad esempio alcuni eventi sismici più profondi di 32 km.

# Corneigliano Laudense Seismic Network Event List

#  
# File generated on: 2024-07-19 09:28:55.669632  
# Location Method: Hypoellipse  
# Earth Model: corn1

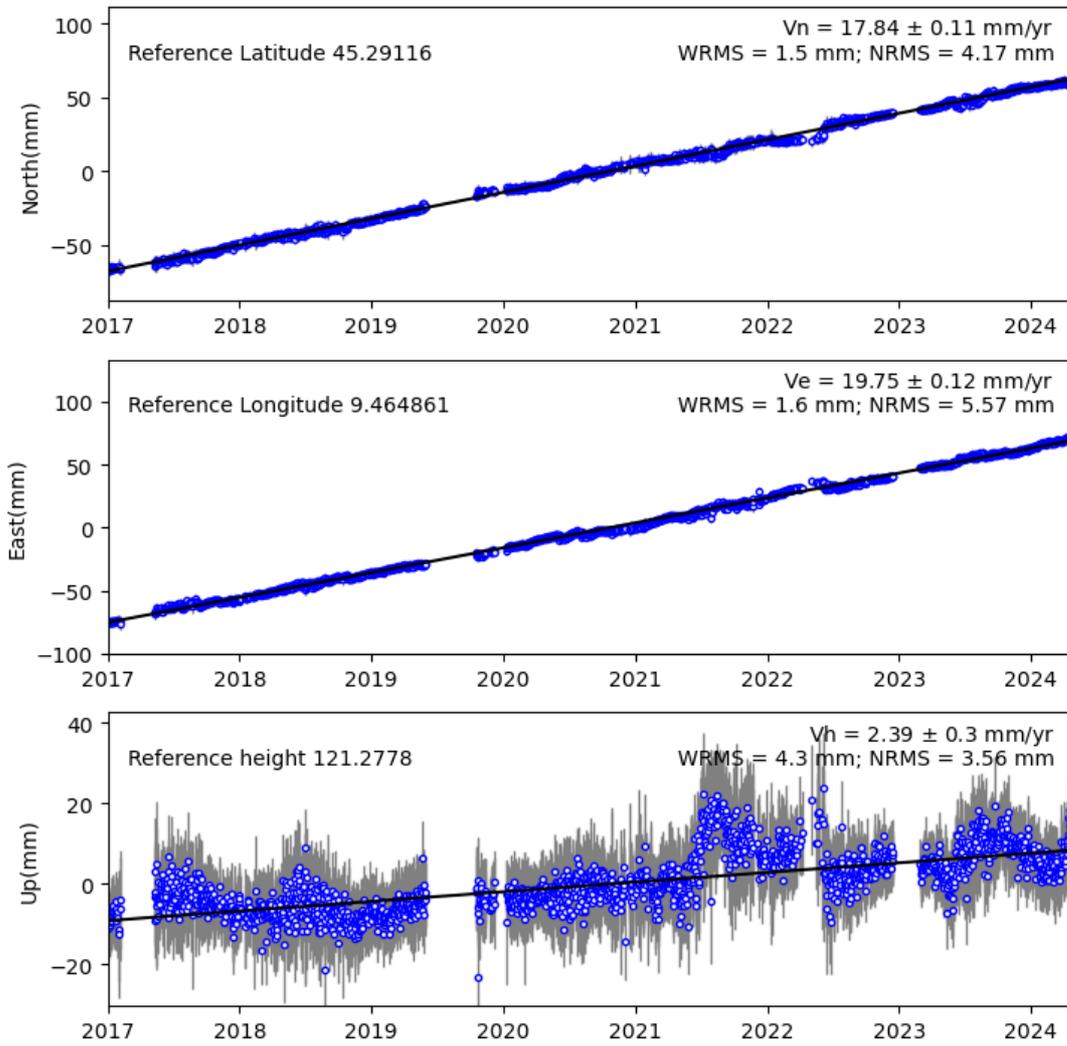
#	id	Area	date	time	lat	lon	depth	M1	Q	GAP	No	Ns	errh1	errh2	errz	rms	distance	Location
1	AE		2017/05/23	04:16:32.54	45.448	9.246	37.95	1.9	A	175	16	7	0.44	1.05	0.65	0.15	43.15	Milano
2	DI*		2017/07/11	22:25:03.54	45.306	9.422	1.43	0.9	D	294	8	3	0.11	0.17	99.00	0.07	1.99	Lodi Vecchio
3	DI		2017/07/12	00:17:53.87	45.304	9.419	2.19	1.1	A	156	15	6	0.14	0.20	0.14	0.18	2.21	Lodi Vecchio
4	DI		2017/07/12	00:18:30.95	45.304	9.435	1.25	--	A	256	8	3	0.05	0.25	0.04	0.04	1.04	Lodi Vecchio
5	DE		2017/10/20	21:37:06.65	45.325	9.544	3.22	1.2	C	208	5	2	0.12	0.71	4.97	0.10	6.23	Lodi
6	DI		2018/01/27	04:01:44.44	45.311	9.435	1.51	0.8	A	278	11	5	0.06	0.09	1.16	0.11	1.84	Tavazzano con Villavesco
7	DE		2018/05/27	20:01:35.35	45.257	9.456	5.66	0.7	A	150	13	6	0.14	0.19	0.19	0.14	4.84	Pieve Fissiraga
8	AE		2018/06/18	21:45:20.87	45.276	9.253	33.33	1.2	A	191	18	9	0.40	0.65	0.47	0.37	35.29	Vidigulfo
9	AE		2018/06/20	00:49:07.48	45.276	9.238	34.0	1.3	A	301	15	7	0.59	0.72	0.37	0.23	36.41	Vidigulfo
10	AE		2018/10/30	05:03:37.61	45.383	9.572	34.01	1.9	A	153	22	11	0.39	0.79	0.72	0.17	34.89	Palazzo Pignano
11	DE		2018/11/21	03:26:44.47	45.308	9.532	3.14	2.1	A	284	12	6	0.18	0.22	0.38	0.19	4.41	Lodi
12	AE		2018/12/23	15:06:12.55	45.440	9.583	35.61	1.6	B	197	14	7	0.29	2.29	0.93	0.00	38.81	Vailate
13	AE		2019/04/25	23:11:31.35	45.355	9.605	31.97	1.5	A	255	21	9	0.36	0.59	0.49	0.10	32.73	Bagnolo Cremasco
14	DI		2019/06/12	10:24:02.07	45.302	9.502	1.65	1.0	B	191	10	5	0.11	0.17	1.50	0.16	1.82	Lodi
15	DE		2019/06/21	15:49:01.16	45.308	9.535	2.17	1.0	A	290	10	5	0.10	0.22	0.08	0.21	4.28	Lodi
16	DE		2019/06/30	12:01:20.47	45.332	9.312	35.0	2.0	A	115	30	14	0.20	0.46	0.42	0.15	35.36	Cerro al Lambro
17	AE		2019/07/13	03:01:35.97	45.300	9.528	2.49	1.2	A	180	16	8	0.10	0.15	0.06	0.16	3.54	Lodi
18	DE		2019/08/17	09:40:07.14	45.305	9.649	4.24	2.0	A	222	17	7	0.71	0.85	1.02	0.23	13.04	Credera Rubbiano
19	AE		2020/10/28	09:28:28.98	45.515	9.248	12.06	2.0	A	118	12	3	0.23	0.53	0.54	0.24	30.67	Milano
20	AE		2020/10/28	09:28:28.97	45.515	9.246	12.05	--	A	120	11	2	0.23	0.49	0.54	0.24	30.74	Milano
21	AE		2020/12/17	15:59:23.86	45.445	9.169	41.63	3.3	A	224	25	9	0.83	0.97	1.08	0.24	48.51	Milano
22	AE		2021/01/17	10:27:25.98	45.473	9.390	36.99	2.7	A	124	31	15	0.18	0.20	0.22	0.27	40.92	Settala
23	AE		2021/02/21	08:54:21.16	45.212	9.112	31.81	1.7	B	257	15	7	0.72	1.45	0.71	0.22	41.03	Pavia
24	DI		2021/08/14	06:26:48.34	45.303	9.436	1.23	0.2	A	252	5	2	0.08	0.48	0.10	0.01	0.97	Lodi Vecchio
25	DI		2021/08/14	06:27:10.49	45.304	9.427	1.85	0.5	A	259	11	5	0.17	0.33	0.49	0.14	1.58	Lodi Vecchio
26	DI		2021/10/11	23:18:21.81	45.306	9.246	23.94	2.9	A	179	27	12	0.14	0.23	0.20	0.47	27.30	Landriano
27	AE		2021/11/06	11:00:57.57	45.496	9.581	34.95	1.7	A	113	20	9	0.27	0.41	0.57	0.14	41.29	Casirate d'Adda
28	AE		2021/12/21	23:37:57.32	45.313	9.536	2.51	1.6	A	195	16	8	0.14	0.46	0.18	0.25	4.68	Lodi
29	DE		2021/12/22	05:17:15.26	45.312	9.533	2.43	2.2	A	189	16	8	0.09	0.17	0.07	0.14	4.45	Lodi
30	DE		2022/02/14	01:02:55.81	45.315	9.528	2.14	1.6	A	107	17	8	0.10	0.15	0.13	0.14	4.36	Lodi
31	DE		2022/03/21	21:33:20.29	45.382	9.653	36.12	1.8	A	247	17	6	0.43	0.83	0.95	0.08	38.45	Cremosano
32	AE		2022/06/15	00:38:54.27	45.315	9.526	2.1	1.3	A	168	11	5	0.07	0.08	0.20	0.12	4.20	Lodi
33	AE		2023/02/25	02:49:19.04	45.308	9.485	2.25	0.9	A	199	14	6	0.05	0.09	0.16	0.12	2.15	Lodi
34	DI		2023/03/28	02:02:44.34	45.311	9.535	2.89	1.3	A	194	16	7	0.16	0.34	0.12	0.34	4.60	Lodi
35	DE		2023/10/22	13:56:40.17	45.253	9.525	6.47	1.2	A	215	15	6	0.13	0.23	0.24	0.15	6.57	Ossago Lodigiano
36	DE		2023/10/24	01:49:30.58	45.316	9.518	1.51	0.7	C	118	8	3	0.15	0.21	4.53	0.23	3.78	Lodi
37	DE		2024/02/25	10:32:42.15	45.386	9.553	28.5	2.6	A	137	23	11	0.20	0.35	0.27	0.14	29.61	Dovera
38	AE		2024/03/07	01:25:30.16	45.250	9.193	29.15	2.2	A	159	23	10	0.36	0.53	0.48	0.16	34.34	Zeccone
39	AE		2024/04/26	08:05:46.55	45.318	9.536	1.83	0.9	A	192	11	6	0.08	0.44	0.36	0.11	4.97	Lodi

## **Appendice C** – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF14

In questa sezione sono riportate le serie temporali delle stazioni della RETE GNSS LODI secondo il sistema di riferimento ITRF14. Ogni figura mostra le serie relative alle tre componenti (dall'alto verso il basso, Nord, Est e verticale verso l'alto) dello spostamento per una stazione. Ogni punto sul grafico è lo spostamento stimato giornaliero in mm. Ad ogni punto è sovrapposta la barra di errore che rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere.

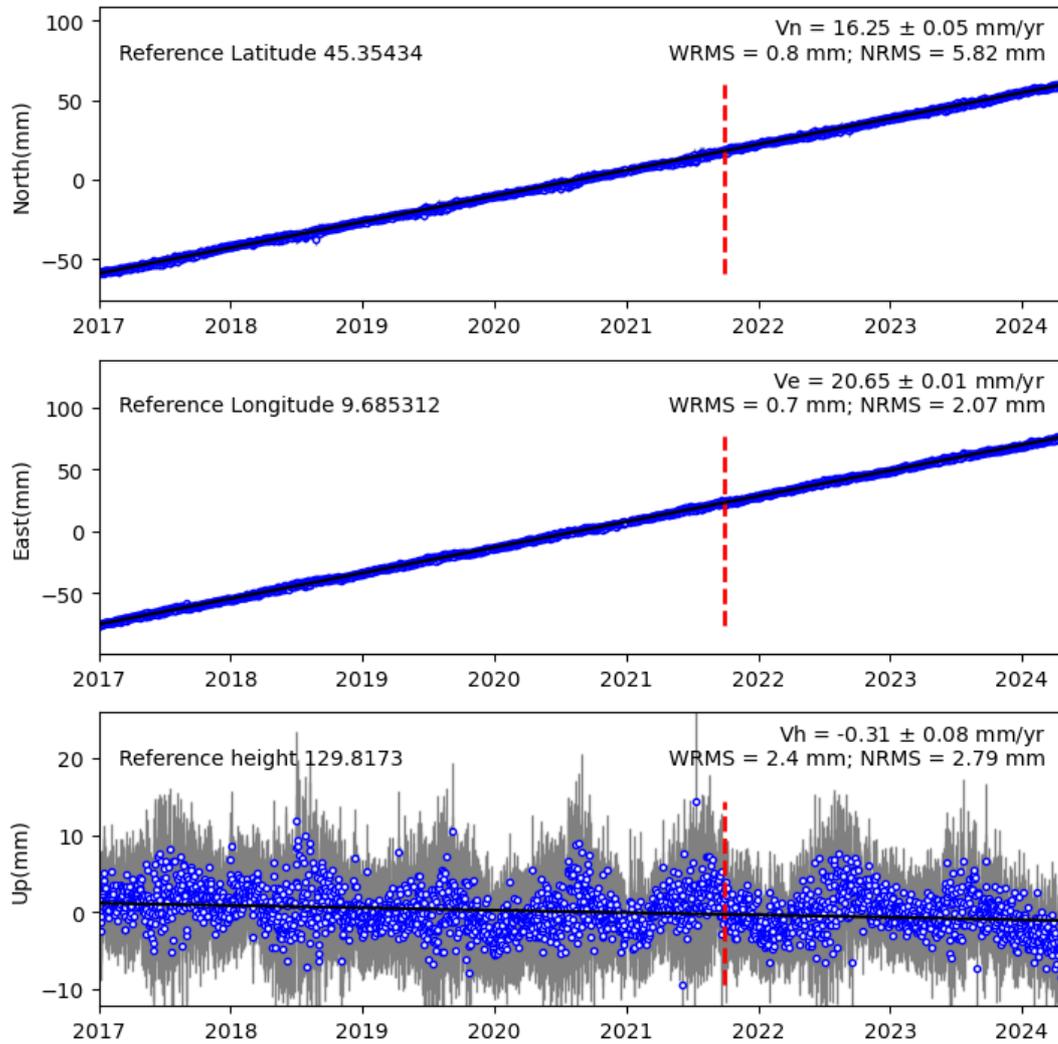
Sul grafico è presente anche la retta interpolante, la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, visibile sullo stesso grafico in alto a sinistra (rate (mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).

## LODI



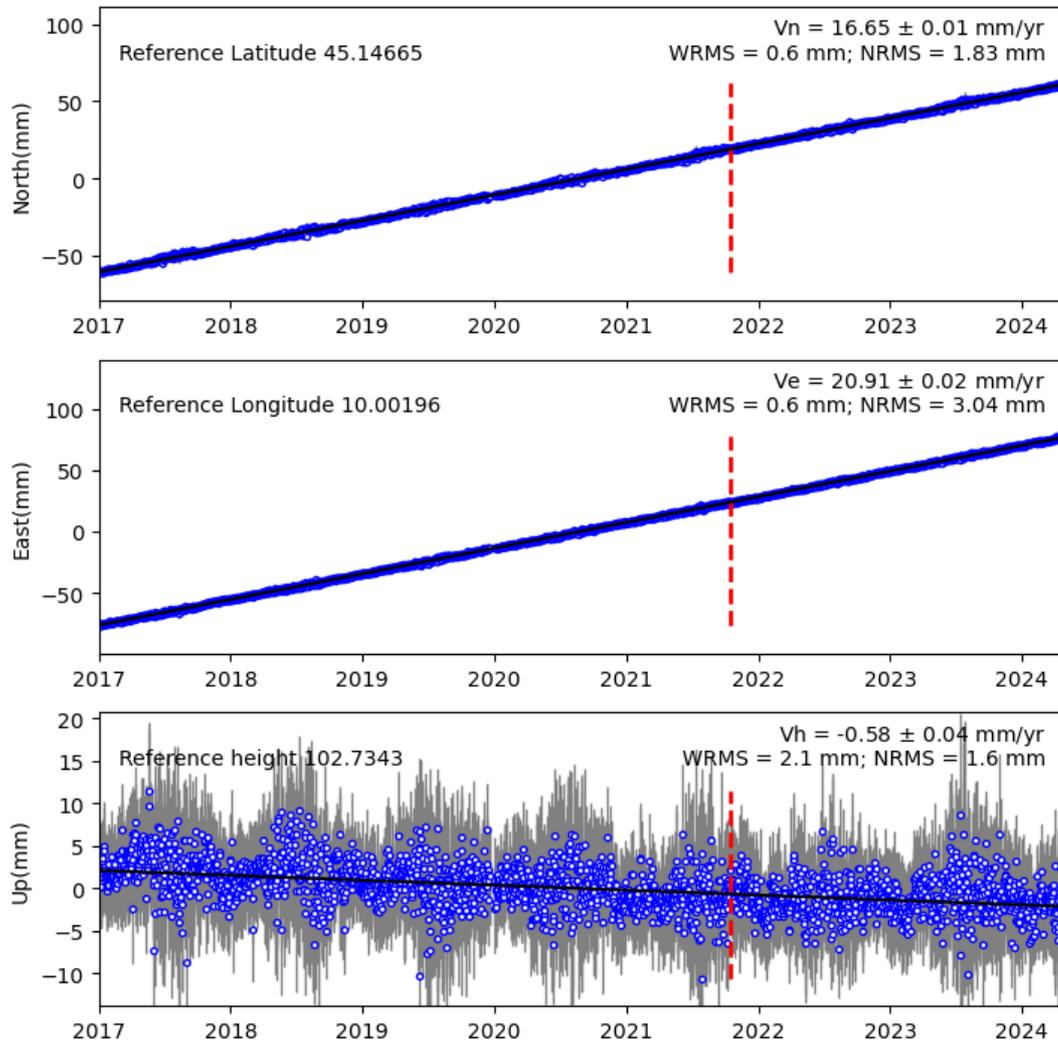
**Figura C.1** – Serie temporale della stazione LODI secondo il sistema di riferimento ITRF14.

## CREA



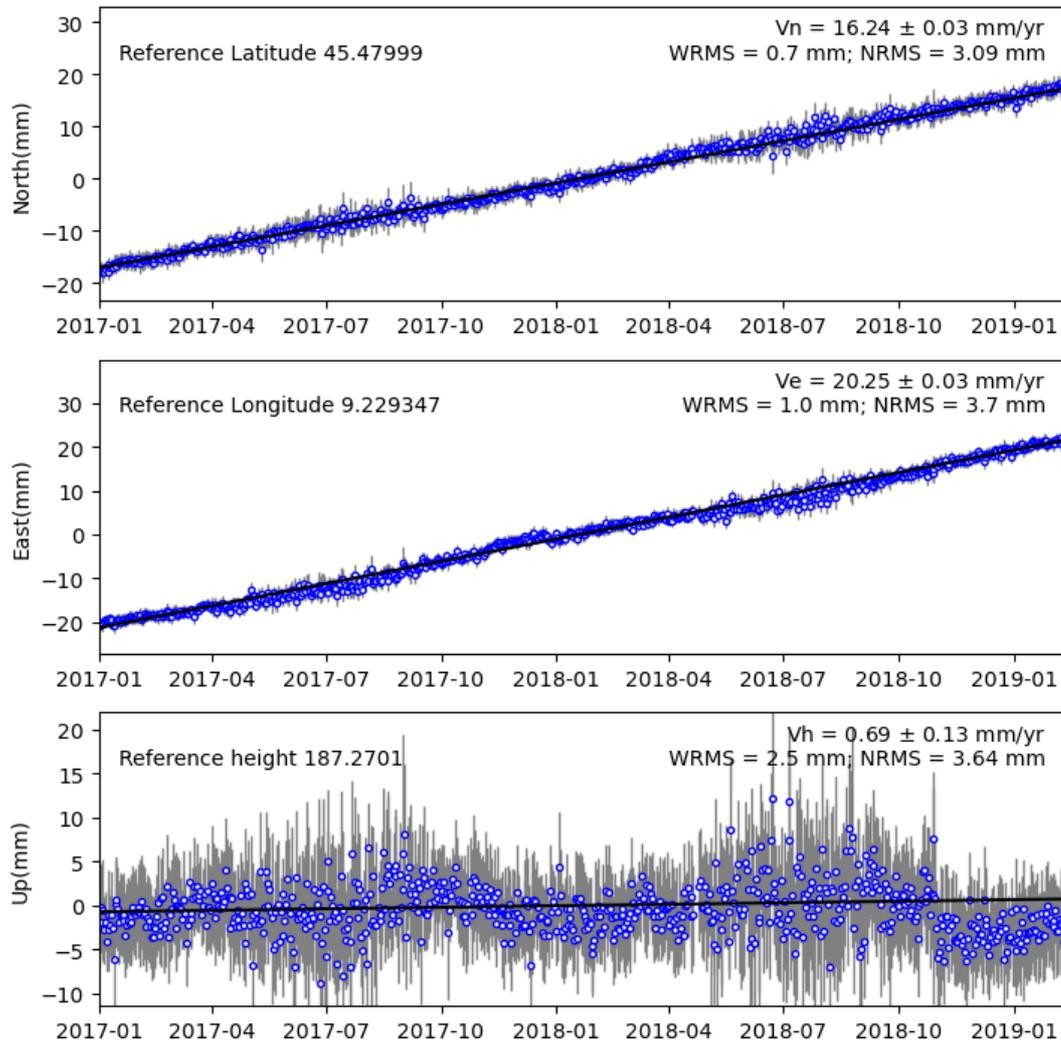
**Figura C.2** – Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

## CREM



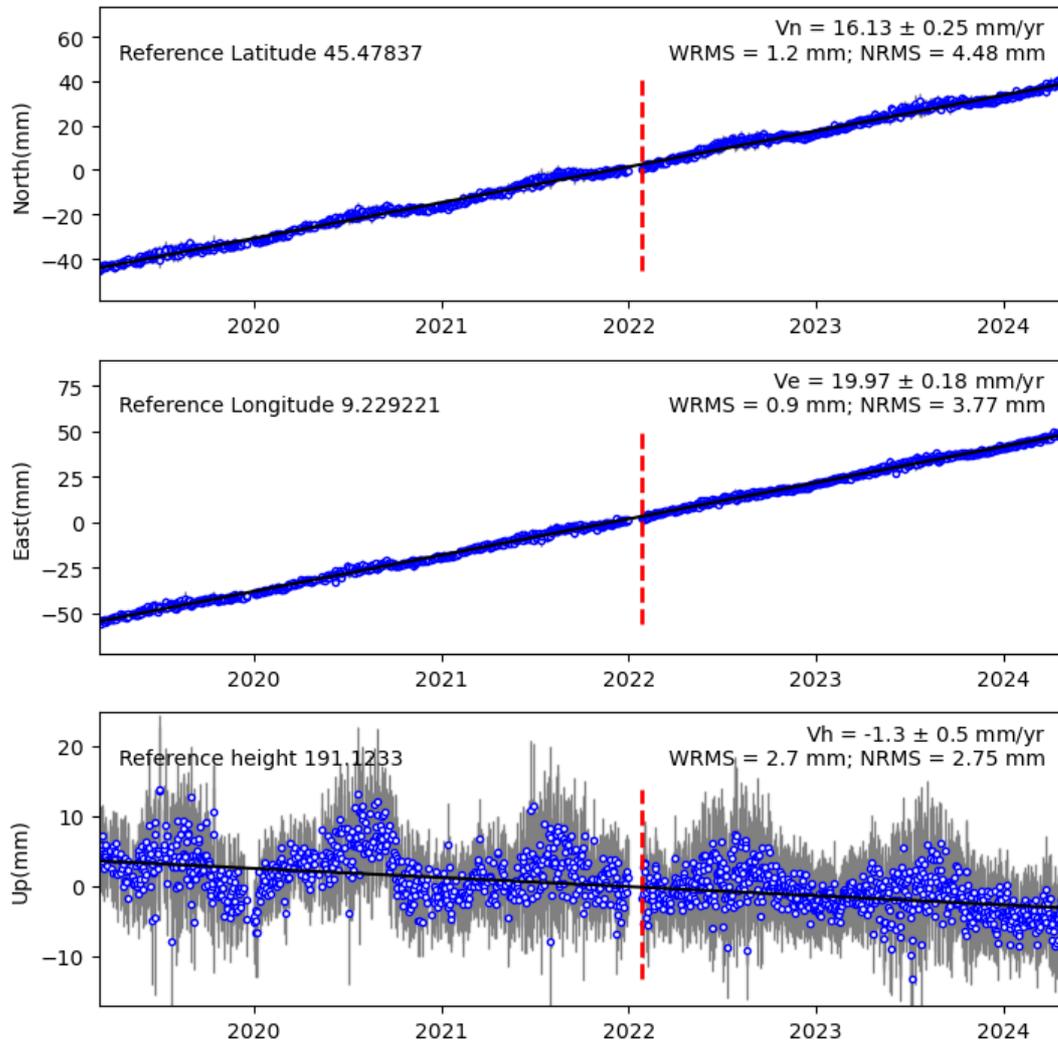
**Figura C.3** – Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2020. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

## MILA



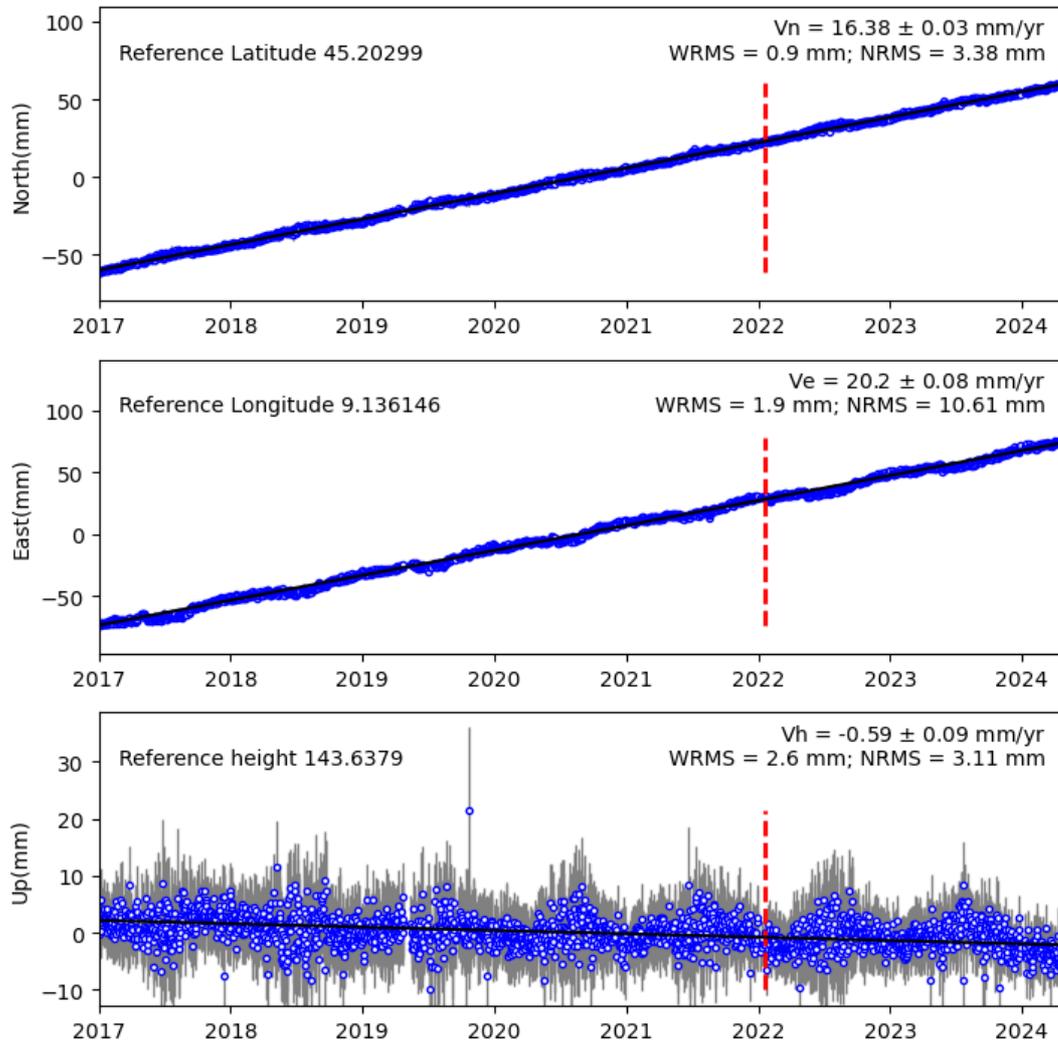
**Figura C.4** – Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF14.

## MIL2



**Figura C.5** – Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

## PAVI



**Figura C.6** – Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

## **Appendice D** – Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense

Da novembre 2019 è attivo il sito web che descrive le attività di monitoraggio sismico e geodetico dello stoccaggio di Cornegliano Laudense. Le statistiche di accesso al sito della RMCL sono state realizzate con il servizio Google Analytics fino al 31/7/2023. Poiché allo stato attuale la piattaforma Google Analytics non rispetta il regolamento europeo GDPR (Regolamento UE 2016/679), si è provveduto a transitare il rilevamento delle statistiche di utilizzo del sito sulla piattaforma "Web Analytics Italia", promossa dall'Agenzia per l'Italia Digitale. Tali statistiche sono disponibili a partire da gennaio 2024. Di seguito, presentiamo i risultati delle statistiche di accesso per soli tre mesi da gennaio ad aprile 2024. Nelle prossime relazioni, i dati sulle statistiche di accesso al sito verranno riportati interamente come al solito.

Nel periodo 17/1/2024-30/4/2024 sono state effettuate circa 130 visite al sito web come riportato in Figura D.1. Si può notare come gli accessi non siano particolarmente numerosi ma comunque regolari, coerentemente con quanto evidenziato negli anni scorsi. Come si può notare nella Figura D.2 nel periodo considerato gli utenti hanno visitato il sito web soprattutto dall'Italia ma è comunque presente una notevole componente di utenti stranieri. Gli accessi al sito vengono effettuati principalmente da computer (v. Figura D.3). Dalla Figura D.4 si può notare come le pagine di maggiore interesse per gli utenti che accedono al sito sono quelle introduttive e quelle relative al monitoraggio geodetico e alla deformazione superficiale. Infine, nella Figure D.5 riportiamo le statistiche di download dal sito nel periodo analizzato.

(a)



(b)

### Riepilogo visite

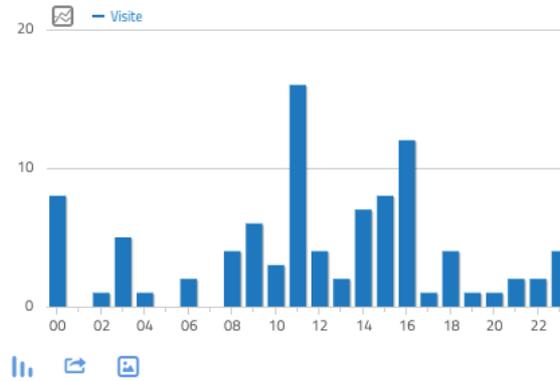


**Figura D.1** – (a) Rendiconto delle visite effettuate sul sito web nel periodo 17/1/2024-30/4/2024 (linea blu) e del numero di visualizzazioni di pagina (linea arancione); (b) caratteristiche delle visite effettuate al sito web nel periodo sopra indicato.

(a)



### Visite per ora locale



(b)

### Tipo di dispositivo

TIPO	VISITE
Desktop	74
Smartphone	17
Sconosciuto	3

**Figura D.3** – (a) Distribuzione del numero di utenti in funzione delle ore del giorno nel periodo 17/1/2024-30/4/2024; (b) percentuale di sessioni in funzione del tipo di dispositivo.

## Titoli delle pagine

TITOLO PAGINA	VISUALIZZAZIONI PAGINA	▼ VISUALIZZAZIONI UNICHE	% RIMBALZI	TEMPO MEDIO SULLA PAGINA	% USCITE
"Cornegliano Stoccaggio" Monitoring   Cornegliano Laudense gas stor...	31	28	86%	00:00:11	89%
Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"   Monitoraggio integrato si...	33	26	58%	00:00:18	69%
L'interferometria differenziale SAR - Tecniche di analisi   Monitoraggi...	19	18	83%	00:00:08	89%
Relazioni   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	9	8	0%	00:01:42	50%
Dati sismici   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	4	4	0%	00:00:05	25%
Inquadramento Sismotettonico   Monitoraggio di "Cornegliano Stocca...	4	4	75%	00:00:02	100%
Monitoraggio Sismico   Monitoraggio di "Cornegliano Stocca   	3	3	100%	00:00:01	67%
SAR differential interferometry - Analysis techniques   "Cornegliano S...	3	3	100%	00:00:00	100%
12/10/2021 Evento sismico ML 2.5 in provincia di Lodi   Monitoraggi...	2	2	0%	00:00:03	50%
Chi siamo   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	3	2	0%	00:01:25	50%
Domande e risposte più frequenti   Monitoraggio di "Cornegliano Stoc...	2	2	100%	00:00:01	50%
IGS   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	2	2	100%	00:00:00	100%
News   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	3	2	0%	00:06:02	0%
Pubblicazioni   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	2	2	0%	00:00:01	50%
Sismicità rilevata   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	2	2	0%	00:00:06	0%
Sismicità storica e strumentale   Monitoraggio di "Cornegliano Stocca...	2	2	100%	00:00:06	50%
Sismogrammi in tempo quasi-reale   Monitoraggio di "Cornegliano St...	2	2	100%	00:00:00	100%
09/02/2022 Evento sismico ML 4.3 a Correggio (RE)   Monitoraggio d...	1	1	0%	00:00:09	0%
6/2/2023 Evento sismico M7.8 in Turchia rilevato dalla RSCL   Monito...	1	1	0%	00:00:07	0%
18/12/2021 Evento sismico vicino a Bonate Sotto (BG) rilevato dalla ...	1	1	0%	00:00:08	0%
admin   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	1	1	0%	00:00:00	100%
Current seismicity   "Cornegliano Stoccaggio" Monitoring	1	1	0%	00:00:11	0%
Dati e Documentazione   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	1	1	0%	00:00:01	0%
Detected Seismicity   "Cornegliano Stoccaggio" Monitoring	1	1	0%	00:00:07	0%
Elaborazione dei dati GNSS   Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	1	1	100%	00:00:00	100%

**Figura D.4** – Rendiconto delle pagine di maggiore interesse del sito web nel periodo 17/1/2024-30/4/2024.

## Download

URL DOWNLOAD	DOWNLOAD UNICI	DOWNLOAD
rete-cornegliano.crs.inogs.it	15	100% 16
<a href="#">/DATI/22.2_Cornegliano_report_finale_signed.pdf</a>	3	18,8% 3
<a href="#">/DATI/20.2_Cornegliano_full_signed.pdf</a>	2	12,5% 2
<a href="#">/DATI/Localizzazioni/eventi-sismici-full-period.txt</a>	2	12,5% 2
<a href="#">/DATI/21.1_Cornegliano_full_signed.pdf</a>	1	6,3% 1
<a href="#">/DATI/21.2_Cornegliano_full_signed.pdf</a>	1	6,3% 1
<a href="#">/DATI/22.1_Cornegliano_report_final_signed.pdf</a>	1	6,3% 1
<a href="#">/DATI/images/Portata.png</a>	1	6,3% 1
<a href="#">/DATI/Localizzazioni/EventiMagnitudo.png</a>	1	6,3% 1
<a href="#">/sites/default/files/19.1_Cornegliano_cmp-signed_signed.pdf</a>	1	12,5% 2
<a href="#">/sites/default/files/F_fig1.jpg</a>	1	6,3% 1
<a href="#">/sites/default/files/GNSS_Inquadramento_Tab1.png</a>	1	6,3% 1

**Figura D.5** – Statistiche dei download dal sito web nel periodo 17/1/2024-30/4/2024.

## Appendice E - Stazione geodetica a basso costo LOZ1

Una stazione geodetica a basso costo è stata installata accanto alla stazione LODI (Figura E.1), con il fine di testarne le performance nel monitoraggio della deformazione a lungo periodo del sito di stoccaggio. La nuova stazione è stata denominata LOZ1, è dotata di un ricevitore dual-frequency u-blox F9P e di un'antenna Tallysman TW3742. Installata in data 3 Dicembre 2021, a causa di problemi di connessione dati, produce ed invia dati RINEX giornalieri solo da gennaio 2022.

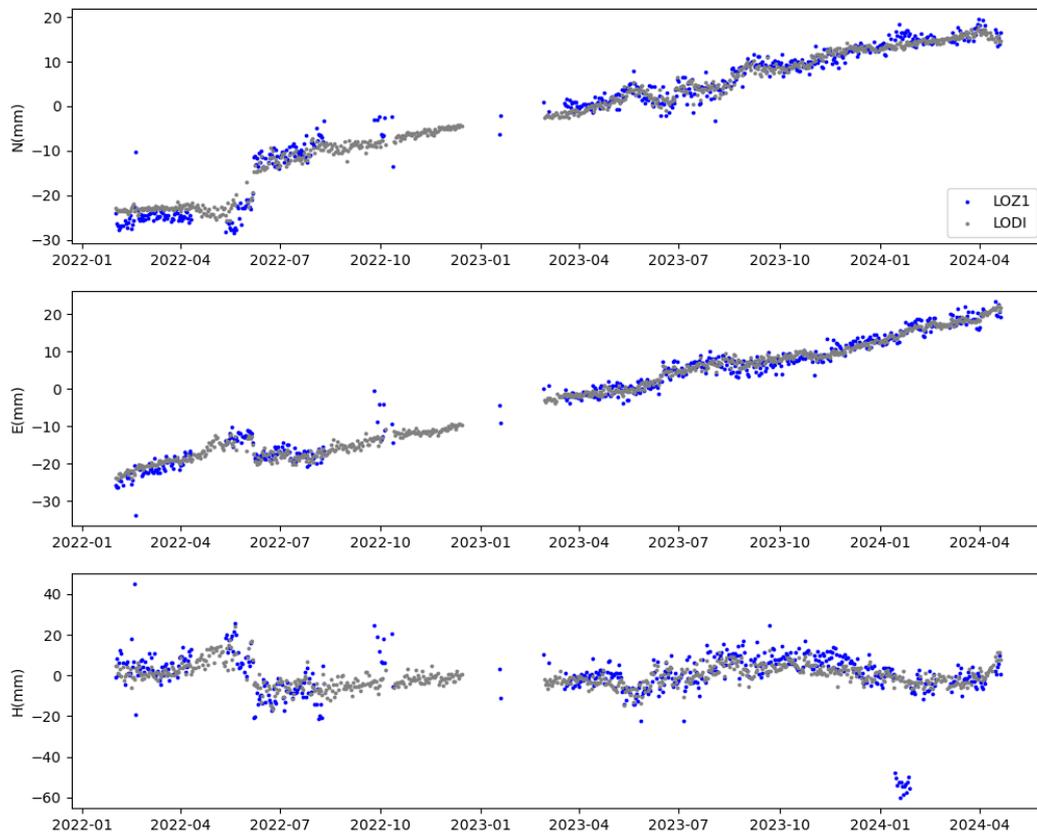
I dati di LOZ1 vengono regolarmente elaborati con il pacchetto software GAMIT/GLOBK versione 10.71 e utilizzando la medesima procedura di elaborazione della stazione LODI.



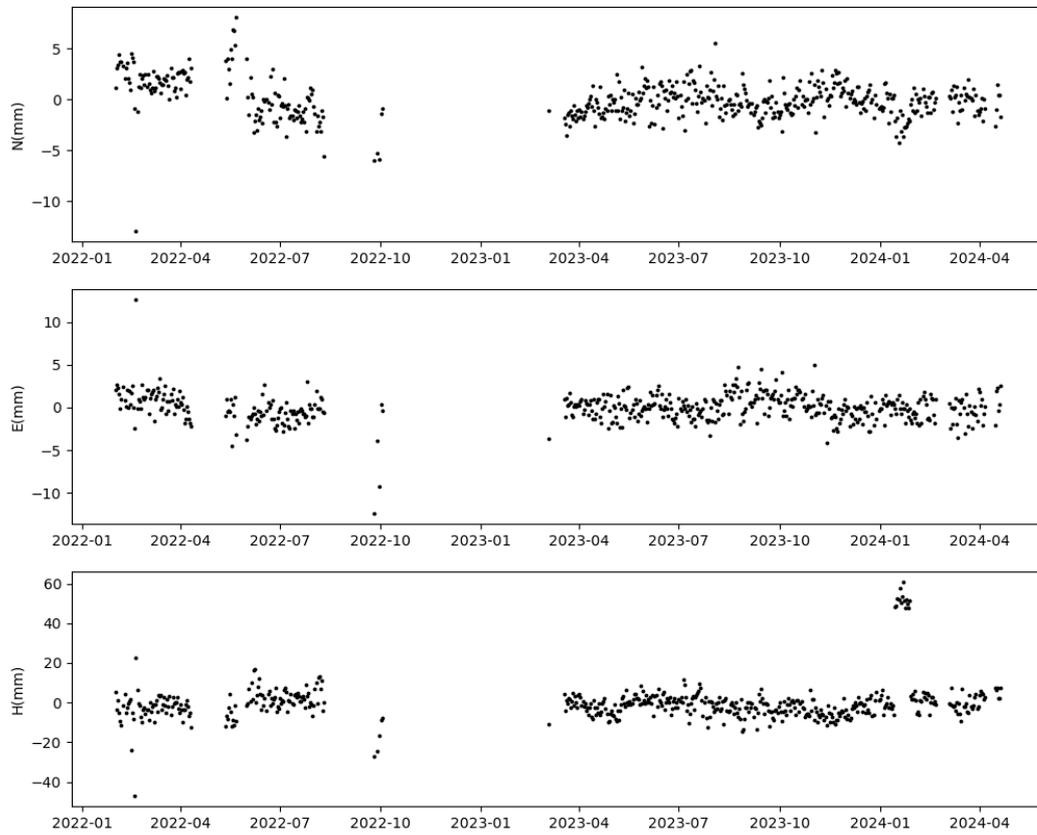
**Figura E.1** Due foto della stazione LODI e della stazione LOZ1 co-locata.

Nelle figure a seguire si mostra il risultato del confronto delle soluzioni ottenute per le stazioni LOZ1 e LODI: le serie temporali delle posizioni delle due stazioni (Figura E.2), le differenze delle stime delle posizioni giornaliere tra LOZ1 e LODI (Figura E.3) e la precisione della stima di posizione delle due stazioni, stimata con le deviazioni standard delle posizioni giornaliere all'interno di una finestra mobile di 7 giorni (Figura E.4).

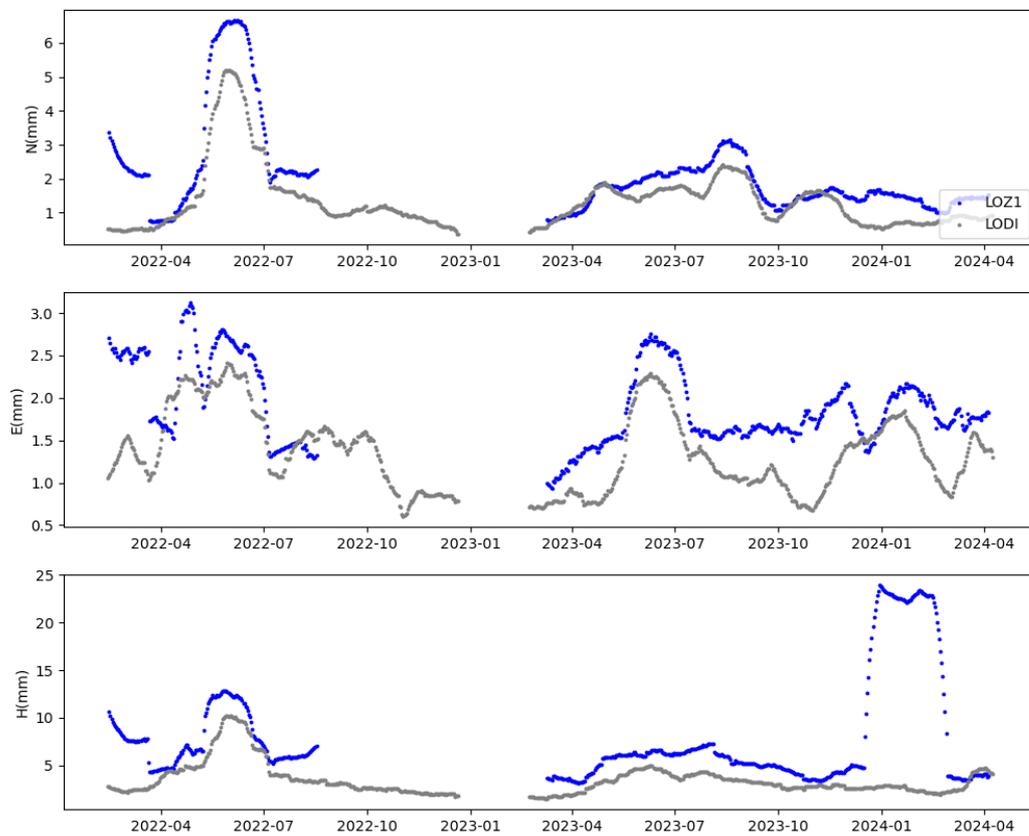
Le serie temporali e le posizioni stimate sono molto coerenti fra LODI e LOZ1, anche se la stazione LOZ1 stima le posizioni con minore precisione rispetto a LODI.



**Figura E.2** - Serie temporali dei residui rispetto al trend della stazione Lodi, ottenuti con la vecchia e con la nuova procedura. Dall'alto verso il basso: residui rispetto al trend in direzione NORD; residui rispetto al trend in direzione EST; residui rispetto al trend in direzione verticale.



**Figura E.3** - Differenze tra le stime delle posizioni giornaliere tra LODI e LOZ1.



**Figura E.4** - - Deviazione standard delle stime delle posizioni giornaliere di LOZ1 (in grigio) e di LODI (in blu) a confronto.