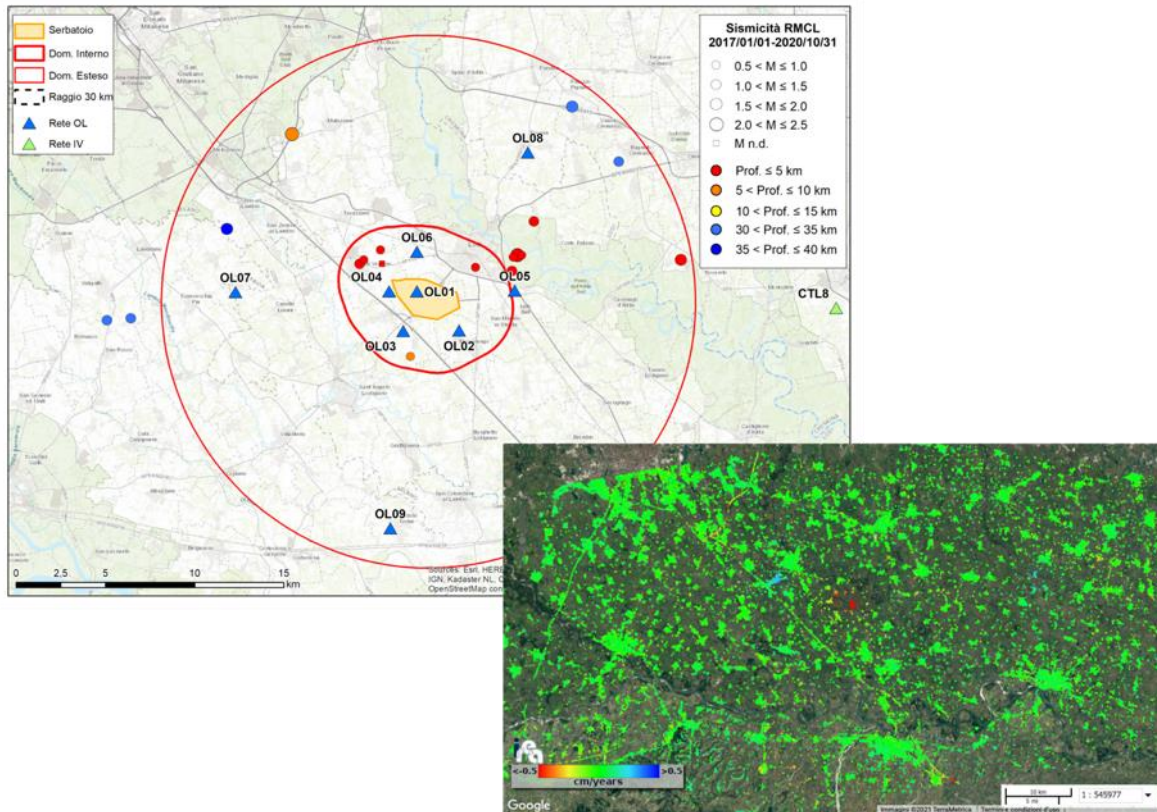


## CONCESSIONE DI STOCCAGGIO DI GAS NATURALE "CORNEGLIANO STOCCAGGIO"



## MONITORAGGIO SISMICO E DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

Anno di esercizio 2022 – Relazione semestrale

2022.2

### **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*

Rel. OGS 2023/7 Sez. CRS 1

Sgonico, 21 aprile 2023

*A cura di:*

*Mariangela Guidarelli<sup>1</sup>, Riccardo Lanari<sup>2</sup>, Manuela Bonano<sup>2</sup>, Claudio De Luca<sup>2</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>*Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale  
Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche (CRS) - OGS*

<sup>2</sup>*Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)  
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) - IREA-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  
*Dott.ssa. Paola Del Negro*

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

**Recapiti**

OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica  
Sperimentale  
Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)  
Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico (Trieste)  
Dott.ssa Mariangela Guidarelli  
Tel.: 040 2140307; cell. 340 4603080  
e-mail: mguidarelli@inogs.it

IREA-CNR - Istituto per il Rilevamento  
Elettromagnetico dell'Ambiente  
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)  
Via Diocleziano 328 - 80124 Napoli  
Dott. Ing. Riccardo Lanari  
Tel. 081 7620612; cell. 320 4397901  
e-mail: lanari.r@cnr.irea.it

## Indice

<b>Recapiti</b> .....	ii
<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> .....	11
<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> .....	21
<b>2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2022 (dati SENTINEL-1)</b> .....	31
<b>2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – ottobre 2022)</b> .....	33
<b>2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – ottobre 2022)</b> .....	37
<b>2.2.4 Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense.</b> .....	45
<b>3. Conclusioni</b> .....	49
<b>Bibliografia</b> .....	52
<b>Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL</b> .....	54
<b>Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione</b> ....	58
<b>Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08</b> .....	60
<b>Appendice D – Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense</b> .....	67

## 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 (MiSE-UNMIG, 2014)
- DI Dominio Esteso di rilevazione della rete di monitoraggio (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 Cornegliano 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 5** - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-31/10/2022, 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 6** - Forme d'onda registrate per l'evento ML2.1 del 15/06/2022 ore 00:38:54 avvenuto nel Dominio Esterno. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu). 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: OL05, OL01, OL02, OL06, OL08, OL03, e OL09. .... 14

**Figura 7** - (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 8** - 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. .... 20

**Figura 9** - Serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) 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). .... 24

**Figura 10** - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. 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 9. .... 25

**Figura 11** - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. 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 9. .... 26

**Figura 12** - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 9. .... 27

- Figura 13** - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. 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 9. .... 28
- Figura 14** - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. 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 9. .... 29
- Figura 15** - Residui delle serie temporali NORTH, EAST, UP 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 2017-2022). In viola, in primo piano, la stazione OL01 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 OL01 abbiamo considerato come zero la media di OL01 calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati). .... 30
- Figura 16** - 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. .... 31
- Figura 17** - 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 dal Dicembre 2021. .... 34
- Figura 18** - 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 - ottobre 2022. 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 19. .... 34
- Figura 19** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 18 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 - ottobre 2022. .... 36
- Figura 20** - 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. .... 37
- Figura 21** - 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 - ottobre 2022. 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 22. .... 38
- Figura 22** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 21 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 - ottobre 2022.*..... 40

**Figura 23** - *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 25.*..... 42

**Figura 24** - *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 26.*..... 43

**Figura 25** - *Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 23 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).*..... 44

**Figura 26** - *Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 24 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).*..... 45

**Figura 27** - *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.*..... 46

**Figura 28.** *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.*..... 47

## Indice delle Tabelle

<b>Tabella 1</b> - Sommario delle stazioni della RMCL. Informazioni dettagliate si trovano nelle singole schede di stazione riportate nella 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 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 dall'OGS. ....	6
<b>Tabella 4</b> - Modello 1D definito 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. ....	11
<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. (2022).....	21
<b>Tabella 7</b> - Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. Le stime ottenute per la stazione OL01 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). ....	23
<b>Tabella 8</b> - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati. ....	32
<b>Tabella 9</b> - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati. ....	33



## Sommario

Il presente documento descrive le attività effettuate nel periodo 1/5/2022-31/10/2022 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 secondo rapporto previsto per l'anno di esercizio 2022, secondo contratto. L'attività di monitoraggio integrato è commissionata da Ital Gas Storage S.p.A. all'OGS e all'IREA-CNR con il Contratto dd. 14/2/2018 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 1/1/2017-31/10/2022 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 31/10/2022.
- 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)

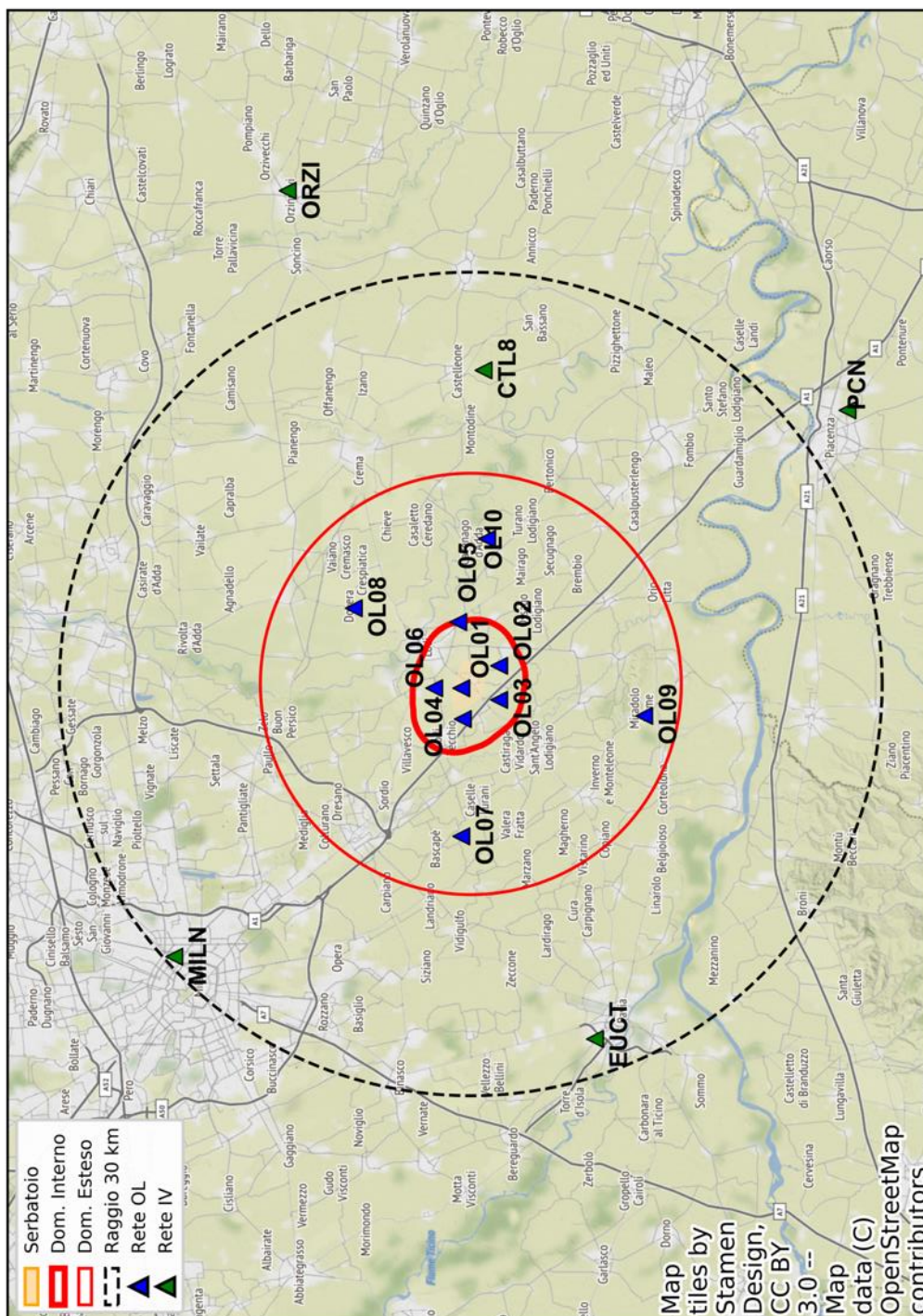
La RMCL è composta da dieci stazioni sismometriche e da una stazione geodetica GNSS permanente. Le stazioni sono indicate con la sigla OL01-OL10, in accordo al codice OL che è il codice internazionale di registrazione della RMCL. La [Tabella 1](#) ne riassume le principali informazioni, mentre la [Figura 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 a profondità di 75 m, con lo scopo di 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 nella 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 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.ogs.it](http://oasis.crs.ogs.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 MiSE (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 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 dall'OGS.

Le procedure di elaborazione dei dati di basso livello (intendendo con ciò le fasi di acquisizione dei dati dalle stazioni), di archiviazione dei *files* 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.

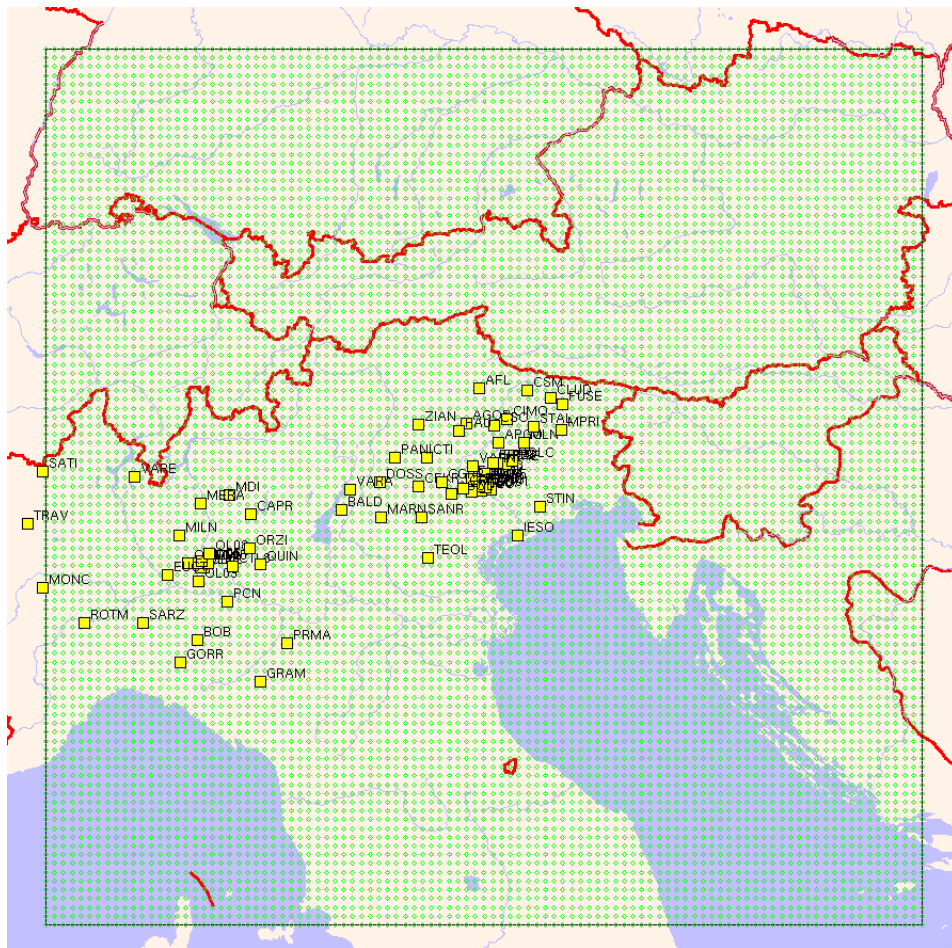
Ricordiamo che il sistema di elaborazione si divide in due parti, rispettivamente:

- **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;

- **off-line**, è la parte che comprende la rielaborazione di tutti i dati con controllo manuale e che viene effettuata con cadenza periodica o, in caso di evento locale, nelle ore successive al suo verificarsi.

La rilevazione di un evento sismico avviene, per entrambi i rami di elaborazione, attraverso alcune operazioni standard che sono:

- **detezione**: è l'operazione con cui la registrazione viene analizzata per riconoscere e marcare la presenza di anomalie di ampiezza del segnale (detti, con terminologia tecnica, *trigger*) rispetto al rumore di fondo. Questa operazione viene effettuata in base a criteri predeterminati per tutte le tracce acquisite dal sistema.



**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.

- **Associazione:** è l'operazione con cui un evento viene classificato come tale in base al fatto che numerose stazioni rilevano dei *trigger* con una certa sincronia. L'associatore valuta questa coincidenza temporale per una serie di localizzazioni di prova all'interno di un volume ben definito e delimitato in superficie dall'area 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 (p.es.: invio del messaggio di allerta al personale reperibile, aggiornamento delle tabelle e delle pagine di notifica); 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, S;
- **localizzazione**, utilizzando le fasi rilevate manualmente;
- stima della **magnitudo**.

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, è calcolata la magnitudo locale (ML) con la formula di attenuazione di Bragato e Tento (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.inogs.it](http://rete-cornegliano.crs.inogs.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 definito 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 (1/5/2022-31/10/2022) 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.

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

Nel corso della tarda primavera è stata completata l'installazione della nuova stazione di Cavenago d'Adda, denominata OL10. Questa presenta le stesse caratteristiche e strumentazione delle altre stazioni, per mantenere la massima omogeneità nella rete.

Nel corso dell'estate/autunno la copertura cellulare in tecnologia 3G è stata gradualmente sostituita dalla nuova tecnologia 4G (LTA) e 5G. I router Conel ur5V2 installati sulle stazioni Ital Gas Storage, che trasmettono normalmente in 3G, passano automaticamente in modalità 2G quando 3G non risulta essere disponibile durante i test di aggiornamento del gestore telefonico. La banda 2G a disposizione è comunque

sufficiente per la trasmissione dati, ma nelle ore di punta le celle 2G possono risultare molto affollate con conseguente riduzione della velocità di trasmissione. In previsione del cambio di tecnologia sono stati ordinati dei nuovi *router* aggiornati, la cui sostituzione avverrà non appena saranno disponibili.

L'estrazione del sensore in pozzo nella stazione OL07, che risultava malfunzionante, ha richiesto un intervento mirato per togliere la sabbia sul fondo, intrusasi all'interno del rivestimento attraverso un difetto del tappo di fondo.

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.

Si è riscontrato qualche problema di accesso nel percorso verso la stazione OL01, spesso rovinato dal transito o presenza delle macchine operatrici agricole che lavorano o irrigano i campi adiacenti alla stazione.

Data	Stazione	Intervento
2022.05.23	OL07	Estrazione velocimetro Radian da fondo pozzo, causa malfunzionamento, per verifica in laboratorio, reinserimento a testa pozzo del Radian s/n T41
2022.05.23	OL01	Router, sostituzione della Sim dati Ottimizzato posizionamento e passaggio cavidotti GNSS LZero Crescita eccessiva piante a Nord della stazione
2022.05.23	OL10	Installazione infrastrutture di stazione, armadio, telaio e pannello FV, accensione acquirente ed accelerometro Fortis s/n TF051
2022.05.24	OL10	Installazione velocimetro Radian s/n TR1291 a fondo pozzo, acquisizione in locale causa un problema al router
2022.05.24	OL05	Verifica del funzionamento di stazione e stato batterie
2022.06.24	OL10	Completamento stazione, installazione router di trasmissione, incollatura vetro isolante accelerometro, scarico dei dati acquisiti in locale dalla prima accensione
2022.06.24	OL01	Verifica e sostituzione del cavo coassiale del GNSS TopCon G5 per un problema al connettore,
2022.06.25	OL10	Reinstallazione dell'accelerometro sul vetro isolante
2022.06.25	OL01	Completato dettagli relativi al nuovo cavo del GNSS
2022.06.25	OL07	Verifica della pulizia e quota di fondo del pozzo, per preparare reinserimento del velocimetro
2022.08.10	OL04	Sostituzione Minimus s/n MIN_8D55 con MIN_675A per aggiornamento fw
2022.08.31	OL04	Aggiornamento fw non riuscito, acquirente off
2022.09.15	OL07	Installazione velocimetro Radian s/n T41 a fondo pozzo, sostituzione collegamenti batterie
2022.09.15	OL04	Sostituzione Minimus s/n MIN_675A con MIN_8A55
2022.09.15	OL01	Sostituzione GNSS Lzero con ricambio

2022.10.12	OL01	Installazione router RUT955 in parallelo a ur5V2 per verifica della copertura LTE, a valle spegnimento 3G
------------	------	---

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

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

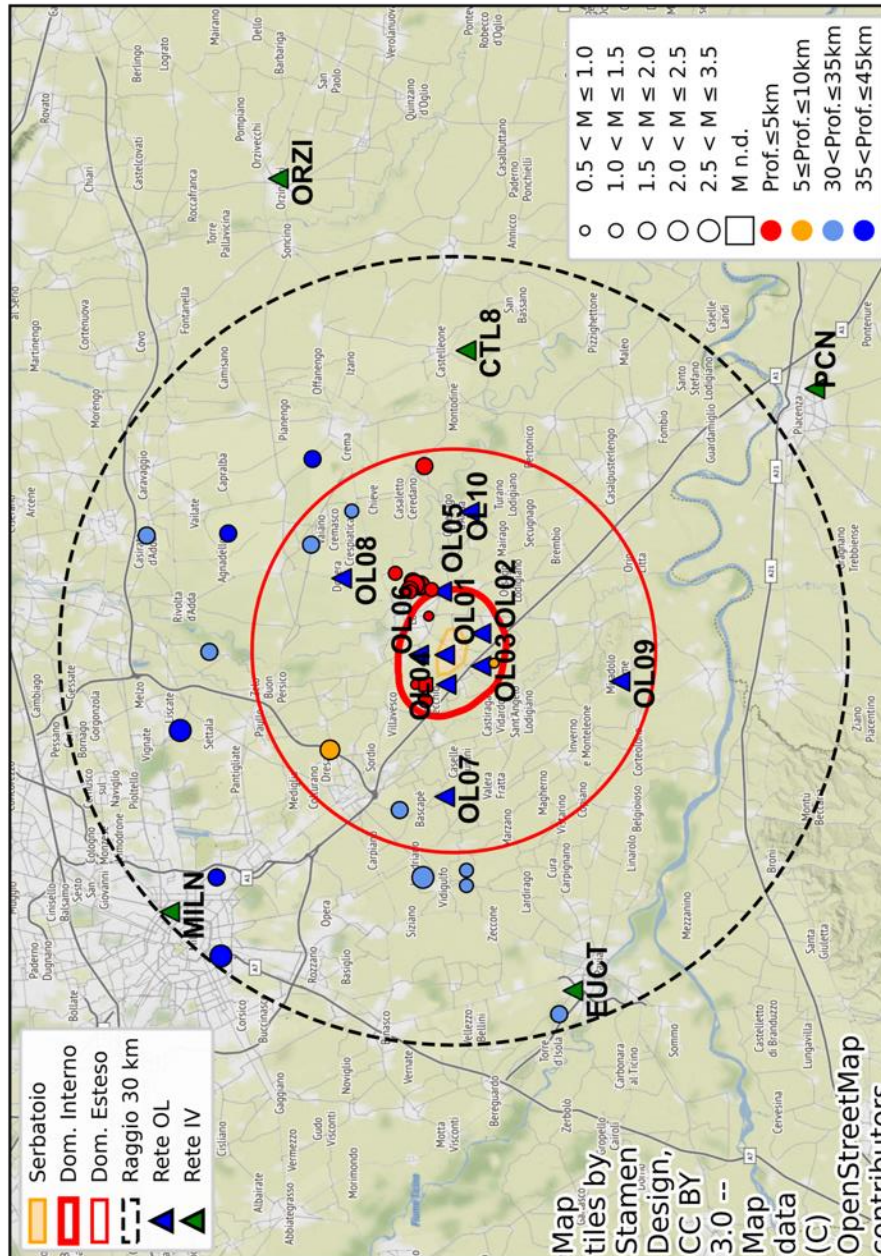
Nel periodo 1/5/2022-31/10/2022 la RMCL ha rilevato un solo evento sismico nel Dominio Esterno, corrispondente all'area contenuta entro 15 km dal serbatoio. L'evento sismico (15/06/2022) di magnitudo 1.3, è stato localizzato ad una profondità di 2.1km. Tale evento si è verificato nella stessa area nei 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 1/11/2017. La lista completa di tutti gli eventi rilevati a partire dal 1/11/2017 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 1.3 del 15/06/2022 ore 00:38:54 avvenuto Dominio Esterno. La distanza epicentrale delle stazioni visualizzate è compresa tra 2 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 Ital Gas Storage. 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.

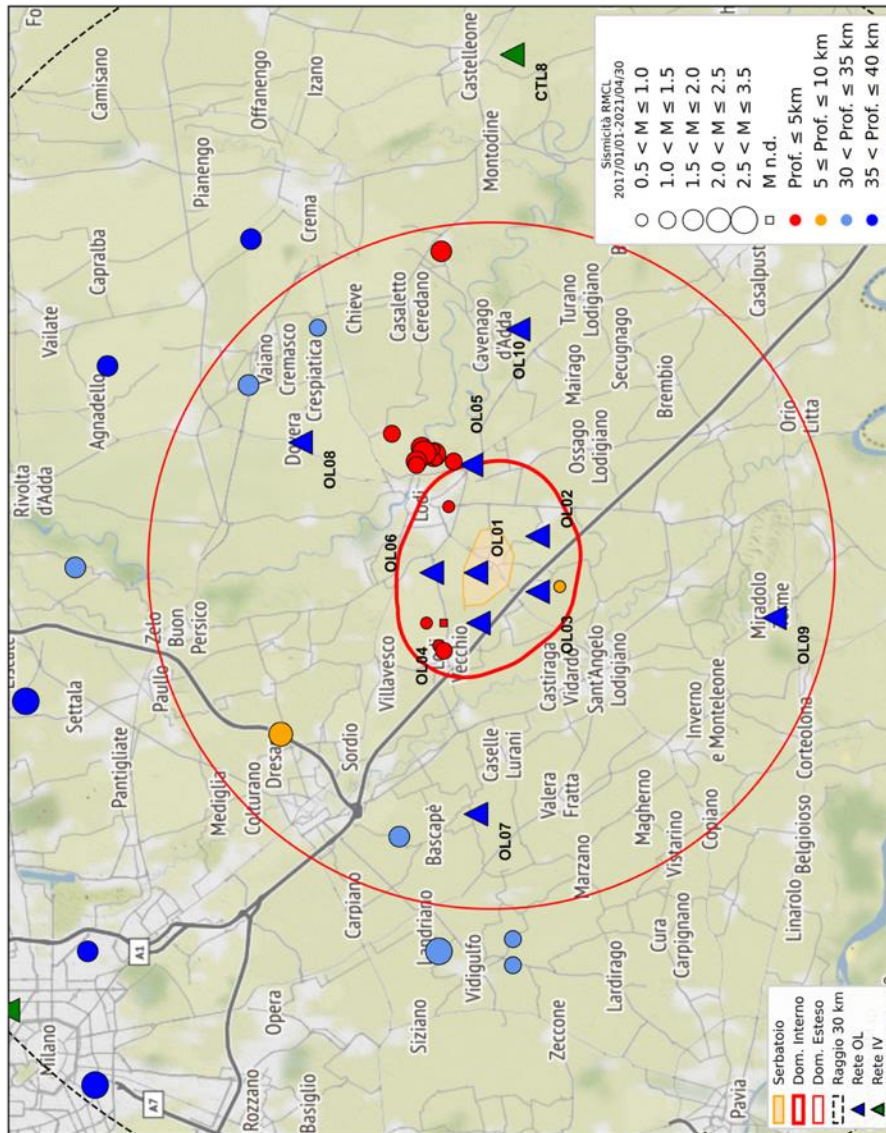
(a)



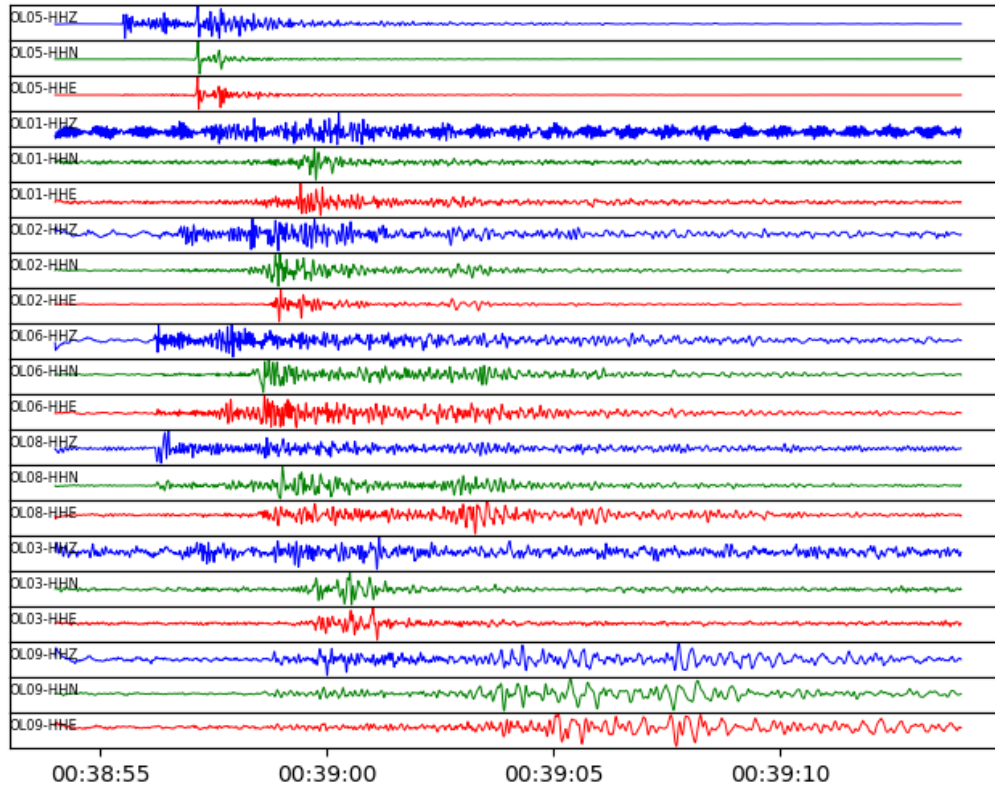
**Figura 3** - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-31/10/2022, a distanza epicentrale  $\leq 30$  km dal sito di stoccaggio (a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato 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.



(b)

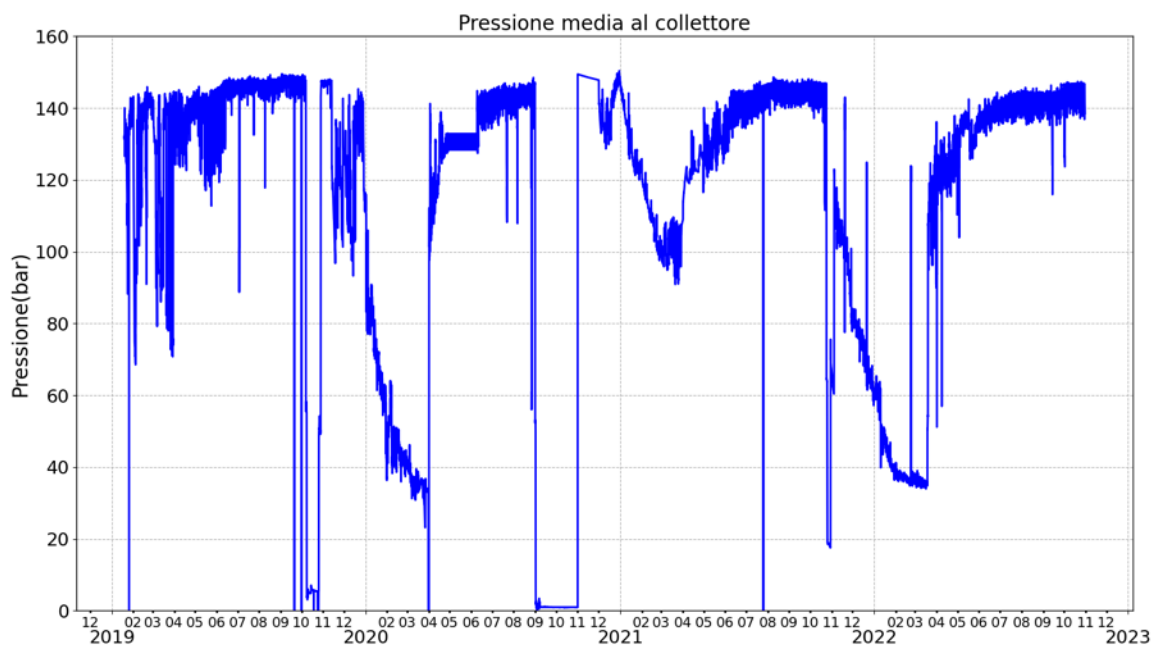


**Figura 5** – Continua dalla pagina precedente.

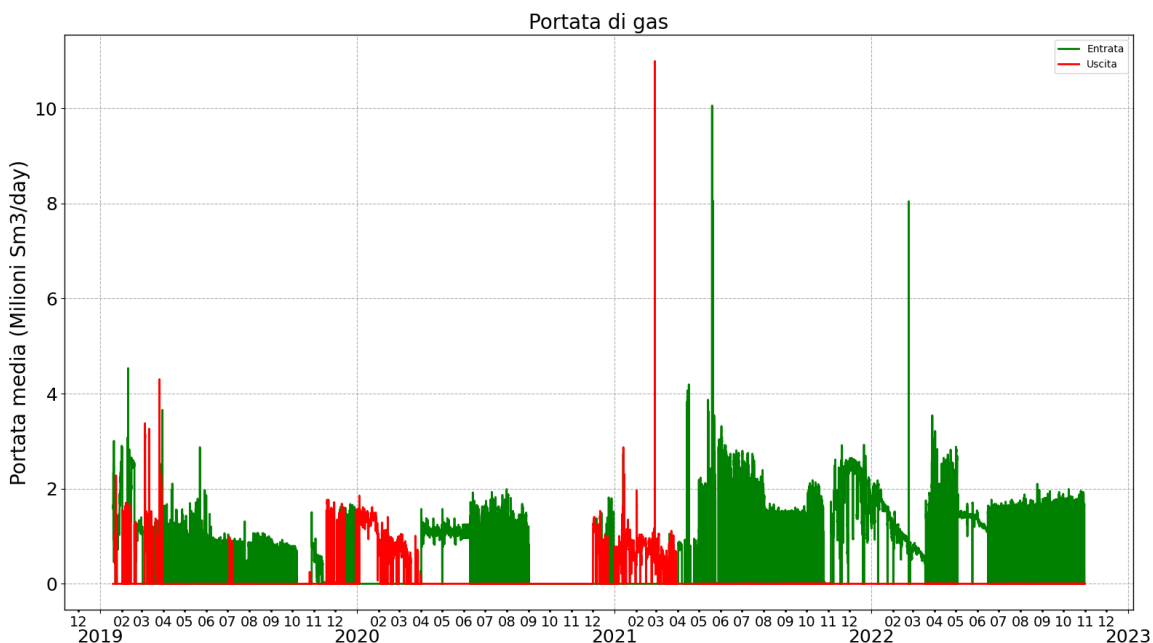


**Figura 4** - Forme d'onda registrate per l'evento ML1.3 del 15/06/2022 ore 00:38:54 avvenuto nel Dominio Esterno. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu, le due componenti orizzontali rispettivamente in rosso (E-O) e verde (N-S)). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL05, OL01, OL02, OL06, OL08, OL03, e OL09.

(a)

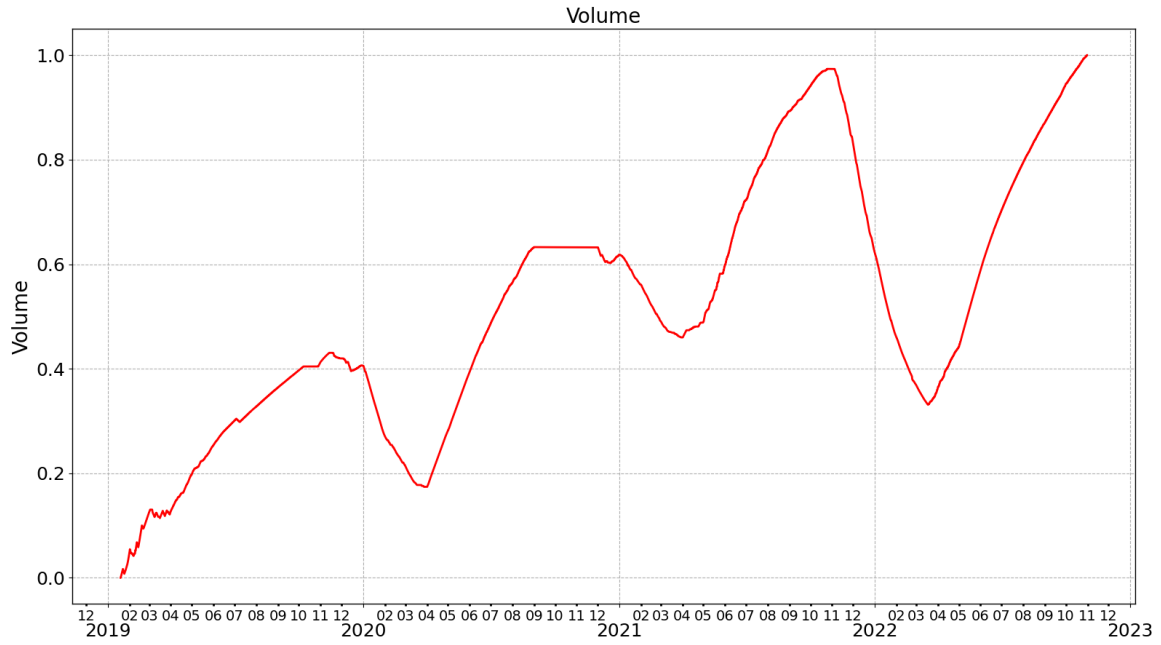


(b)



**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 7** – Continua dalla pagina precedente.



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

## 2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01

La stazione GNSS (Global Navigation Satellite System) OL01 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.

Le osservazioni (dati in formato RINEX, Receiver Independent Exchange Format) della stazione GNSS OL01, sono stati elaborati in modo da ottenere le stime giornaliere delle coordinate e le serie temporali secondo due diversi sistemi di riferimento:

- il sistema di riferimento globale ITRF08 (International Terrestrial Reference Frame 2008, [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2008/](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/)), è 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'ITRF08 è il 2008.
- Il sistema di riferimento europeo EURA (Altamimi et al., 2012), 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 questo lavoro, l'intervallo di tempo considerato è 01/01/2017 - 31/10/2022. Come segnalato nelle relazioni precedenti, a causa di un difetto di sincronizzazione tra il server di scarico dei dati e quello di backup, non sono disponibili i file RINEX e le serie temporali del sito OL01 negli intervalli: 01/06/2019 e 31/10/2019, 14/11/2019 e 25/11/2019, 07/12/2019 e 10/01/2020. I lavori per il recupero parziale dei dati dal disco interno del ricevitore GNSS di OL01 non permettono ulteriori miglioramenti. Nell'ultimo anno, alcuni malfunzionamenti nella trasmissione dei dati hanno comportato ulteriori interventi di manutenzione alla stazione (2 sostituzioni SIM il 25/03/2022 e il 23/05/2022; sostituzione del cavo coassiale del ricevitore NET-G5 il 24/06/2022), ma senza interruzioni nel flusso di dati o nelle serie temporali. Tuttavia, il *router* della stazione OL01, modello Conel Ur5-V2, si è guastato a inizio ottobre 2022 ed è stato sostituito con un Teltonika RUT\_955. Quest'ultimo malfunzionamento ha comportato una lacuna di dati dal giorno 04/10/2022 al giorno 12/10/2022.

### 2.1.1 Dati elaborati

Il *dataset* della stazione OL01 viene registrato in file di formato RINEX ed è disponibile

in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane).

Le osservazioni di OL01, così come quelli delle altre stazioni GNSS, vengono elaborate con il pacchetto software GAMIT/GLOBK, 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)). In questo lavoro, abbiamo utilizzato una versione aggiornata di GAMIT/GLOBK (Ver 10.71, <http://geoweb.mit.edu/gg/>) a partire dall'elaborazione del giorno 15/06/2020.

Sono stati elaborati i dati disponibili dal 01/01/2017 fino al giorno 31/10/2022. Come spiegato nella relazione precedente, fino al 29 gennaio del 2022 si è tenuto conto dei modelli atmosferici (Tregoning et al., 2005) prodotti dal MIT (Massachusetts Institute of Technology, mentre dal giorno successivo (30 Gennaio 2022) non se ne tiene più conto, a causa del mancato aggiornamento del file `atmdisp_cm.2022`, disponibile sul repository internazionale del MIT ([everest.mit.edu](http://everest.mit.edu)). Ad ogni modo è stato verificato che questa modifica alla procedura di elaborazione non comporta differenze apprezzabili nei risultati.

I file RINEX di OL01 registrati dal 01/01/2017 fino al 31/10/2022 sono 1719, così come le giornate elaborate. L'elaborazione dei dati ha infatti prodotto, per OL01, 1694 soluzioni pari all'utilizzo del 98,5% dei dati iniziali, e ciò indica la disponibilità di un *dataset* sufficientemente completo e adatto all'elaborazione con il pacchetto GAMIT/GLOBK.

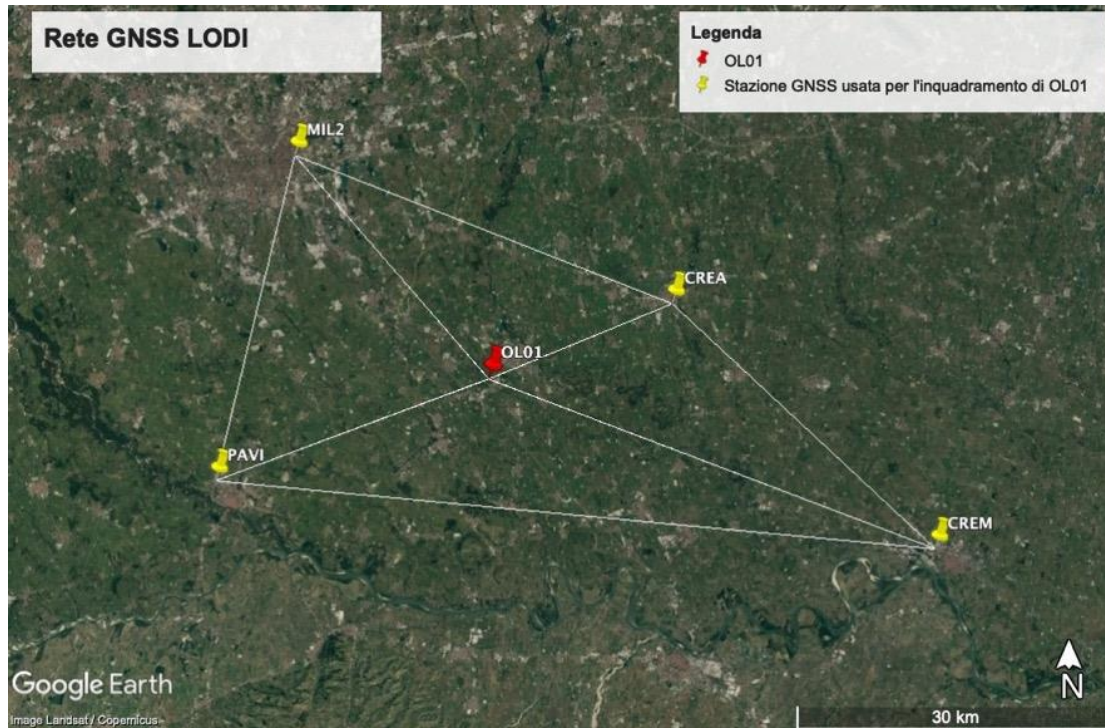
La stazione GNSS OL01 è stata inquadrata all'interno di una rete di stazioni permanenti denominata Rete GNSS LODI ([Figura 8](#)), appartenenti al Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia (Rete SPIN):

- CREA (Crema), *baseline* (distanza dalla stazione OL01) pari a 18.6 km;
- CREM (Cremona), *baseline* pari a 45.1 km;
- MILA (Milano), *baseline* pari a 27.9 km;
- MIL2 (Milano), *baseline* pari a 27.8 km;
- PAVI (Pavia), *baseline* pari a 27.6 km.

Si ricorda che i dati della stazione MILA sono stati elaborati fino al giorno 08/02/2019, dopo il quale la stazione è stata dismessa ed è stata sostituita da MIL2. Dal 06/03/2019 nell'elaborazione dei dati abbiamo quindi introdotto MIL2 (coordinate: 45° 28' 42.145091" N, 09° 13' 45.193712" E, quota: 191.119 m).

Le stazioni della Rete GNSS LODI sono a loro volta inquadrature nel sistema ETRF2000(2008.0), adottato da SPIN in conformità alla Rete Dinamica Nazionale (RDN) gestita dall'Istituto Geografico Militare (IGM). Il risultato dell'inquadratura della stazione OL01 è mostrato in [Tabella 6](#).

Per il calcolo delle serie temporali, a fianco della Rete GNSS LODI, sono state utilizzate le stazioni GNSS appartenenti alla Rete SPIN e le stazioni di riferimento gestite dall'International GNSS Service (IGS, <https://www.igs.org/network/>).



**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.

SITE CODE	LOCALITA'	RICEVITORE	ANTENNA	LATITUDINE LONGITUDINE	QUOTA [m]
CREA	Crema	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 21' 15,592537" N 9° 41' 07,096872" E	129,818

CREM	Cremona	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	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 SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 28' 42,127070" N 9° 13' 45,166341" E	191,125
PAVI	Pavia	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 12' 10.732233" N 9° 08' 10.104212" E	143,638
OL01	Cornegliano Laudense	TPS NET-G5 (GPS+GLO)	CR-G5 (TPSH)	45°17'28,17435"N 9°27'53,47318"E	121,254

**Tabella 6** - Coordinate ETRF2000 (2008.0), sistema ufficiale adottato dallo stato italiano (<https://www.igmi.org/it/direzione-geodetica/progetto-rdn-rete-dinamica-nazionale>), delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, PAVI e del sito OL01. Le quote sono ellissoidiche. 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. (2022).

## 2.1.2 Risultati ottenuti

Riportiamo qui di seguito le serie temporali stimate per ciascun sito della Rete GNSS LODI. Come detto i risultati delle elaborazioni coprono il periodo temporale 01/01/2017 - 31/10/2022.

Le serie temporali sono disponibili in due sistemi di riferimento diversi: quello europeo EURA (Figure 6-11) e quello internazionale ITRF08 (Appendice B). Nel sistema internazionale gli spostamenti e le velocità sono stimati rispetto a un sistema inerziale geocentrico che mostra i moti delle placche litosferiche rispetto al centro della Terra. Le stime di velocità sono stimate attraverso un *fit* lineare sull'intera serie temporale 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 EURA (Altamimi et al., 2012), gli spostamenti delle placche vengono stimati rispetto al blocco europeo (o Eurasia), per cui a ciascun sito della rete è nella pratica sottratto il moto medio della placca europea. Nel sistema EURA quindi le velocità sul piano orizzontale sono nettamente ridotte rispetto a quelle in ITRF 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 prima 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 ITRF (Figure in Appendice B) e EURA (Figure 7-13). La stazione OL01 presenta uno spostamento marcato verso Nord e verso Ovest e un trend deformativo verticale positivo verso l'alto, presente già nell'ultima relazione (Priolo et al. 2022).

La [Tabella 7](#) mostra le velocità stimate dal *fit* delle serie temporali nel periodo 01/01/2017 – 31/10/2022. 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 15.9 mm/anno di CREA ai 17.4 mm/anno di OL01 in direzione Nord, e dai 19.7 mm/anno di MIL2 e OL01 ai 20.8 mm/anno di CREM in direzione Est. Nella direzione verticale, il range di variazione fra le stazioni è di circa 5 mm/anno, con valori che vanno da -1 mm/anno di MILA ai 4.5 mm/anno di OL01 (4.45 mm/anno in Fig.B1). I valori risultano coerenti con quelli della relazione precedente con una variazione massima di 0.1 mm/anno per OL01, paragonabili con l'incertezza propria di questo tipo di stima (Masson et al., 2019).

Nel riferimento Euroasiatico (EURA), come indicato nella [Tabella 7](#), i valori di velocità stimati nelle componenti orizzontali sono compresi, nella direzione Nord, fra 0.1 mm/anno (CREA) e 1.6 mm/anno (OL01), e fra -0.4 mm/anno (OL01) e 0.6 (CREM) mm/anno. Anche in questo caso i valori risultano coerenti con quelli della relazione semestrale precedente.

Come già osservato nella relazione precedente, tra le stazioni attorno a OL01, la stazione MIL2 registra un tasso di spostamento verticale (Vel. Up, Tabella 7) significativamente diverso da quello delle altre. Questo è dovuto al fatto che la stazione è ancora troppo "giovane" (circa tre anni e mezzo di dati) per poter essere correttamente stabilizzata in tutte le sue componenti. Blewitt e Lavallée (2002) hanno infatti stimato che per misurazioni precise in campo tettonico e geofisico, si dovrebbe disporre almeno di 4.5 anni di dati per essere certi che eventuali *bias* nelle velocità siano trascurabili.

	ITRF08			EURA		
	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>OL01</b>	<b>17.4</b>	<b>19.7</b>	<b>4.5</b>	<b>1.6</b>	<b>-0.4</b>	<b>4.4</b>

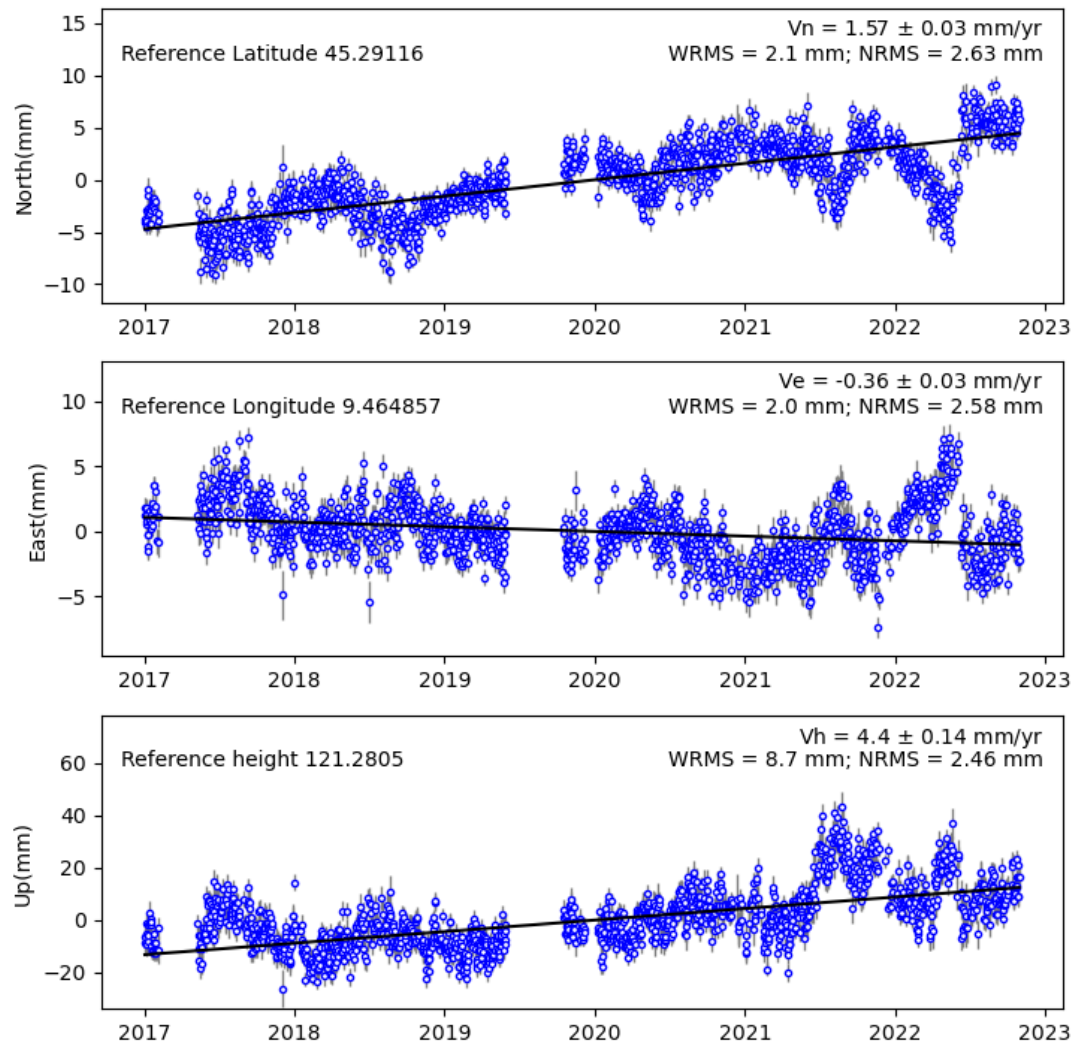
CREA	15.9	20.6	0.5	0.1	0.5	0.4
CREM	16.5	20.8	0.04	0.7	0.6	0.01
MILA	16.3	20.2	-1.0	0.4	0.2	-1.0
MIL2	16.2	19.7	2.1	0.4	-0.2	2.1
PAVI	16.2	20.5	0.7	0.3	0.6	0.6

**Tabella 7** - Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. Le stime ottenute per la stazione OL01 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 OL01 rispetto al trend tettonico medio delle stazioni di riferimento per mettere in luce eventuali anomalie locali sulla stazione OL01 che potessero essere messe in relazione con lo stoccaggio di gas nel serbatoio.

Ipotizzando che il moto delle stazioni attorno a OL01, 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 OL01, giorno per giorno nelle tre componenti. In questo modo, il segnale residuo su OL01 rappresenta il comportamento locale della stazione stessa. Il risultato è riportato in [Figura 15](#). Dalla Figura si nota che la stazione OL01 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 di minore entità nell'estate del 2022.

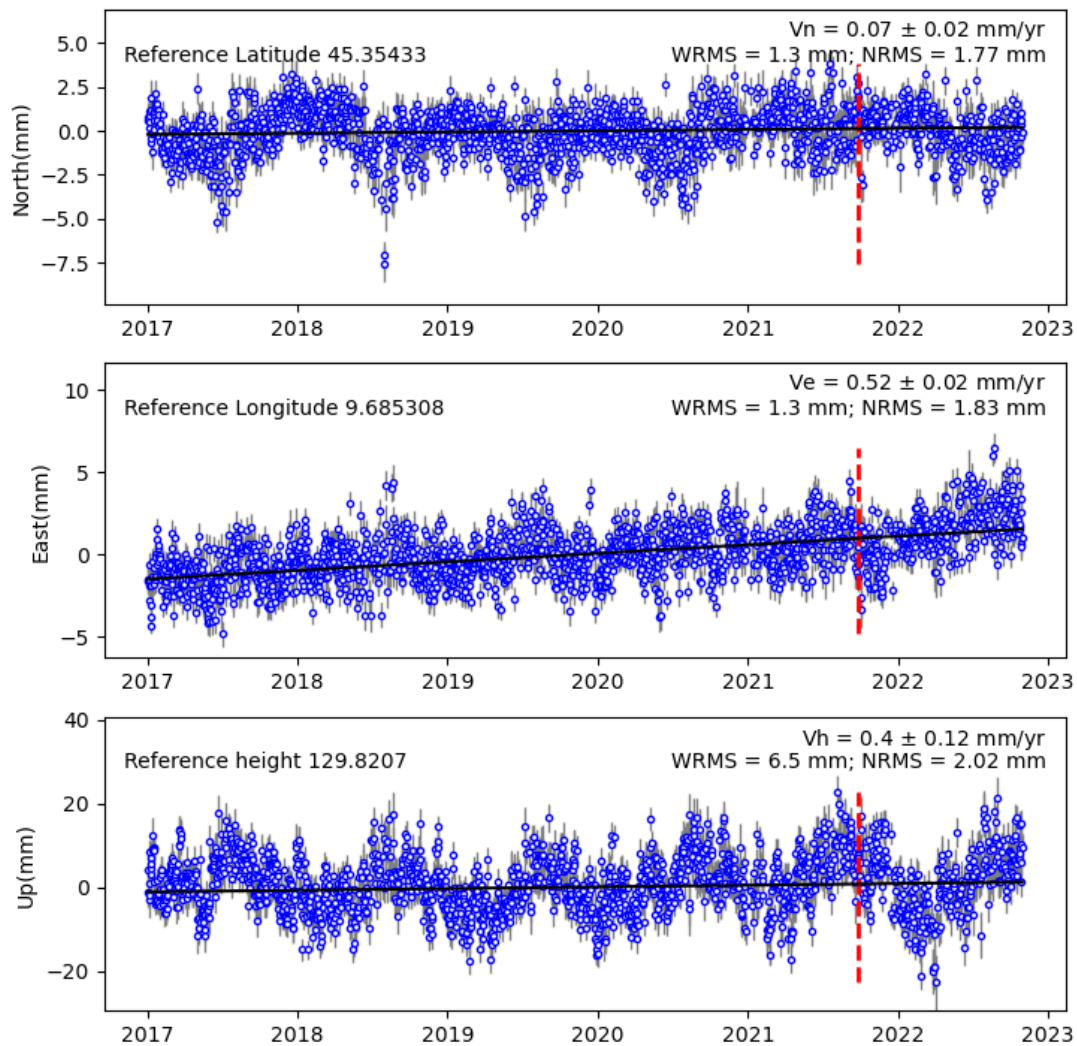
## OL01



**Figura 7** - Serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) 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).

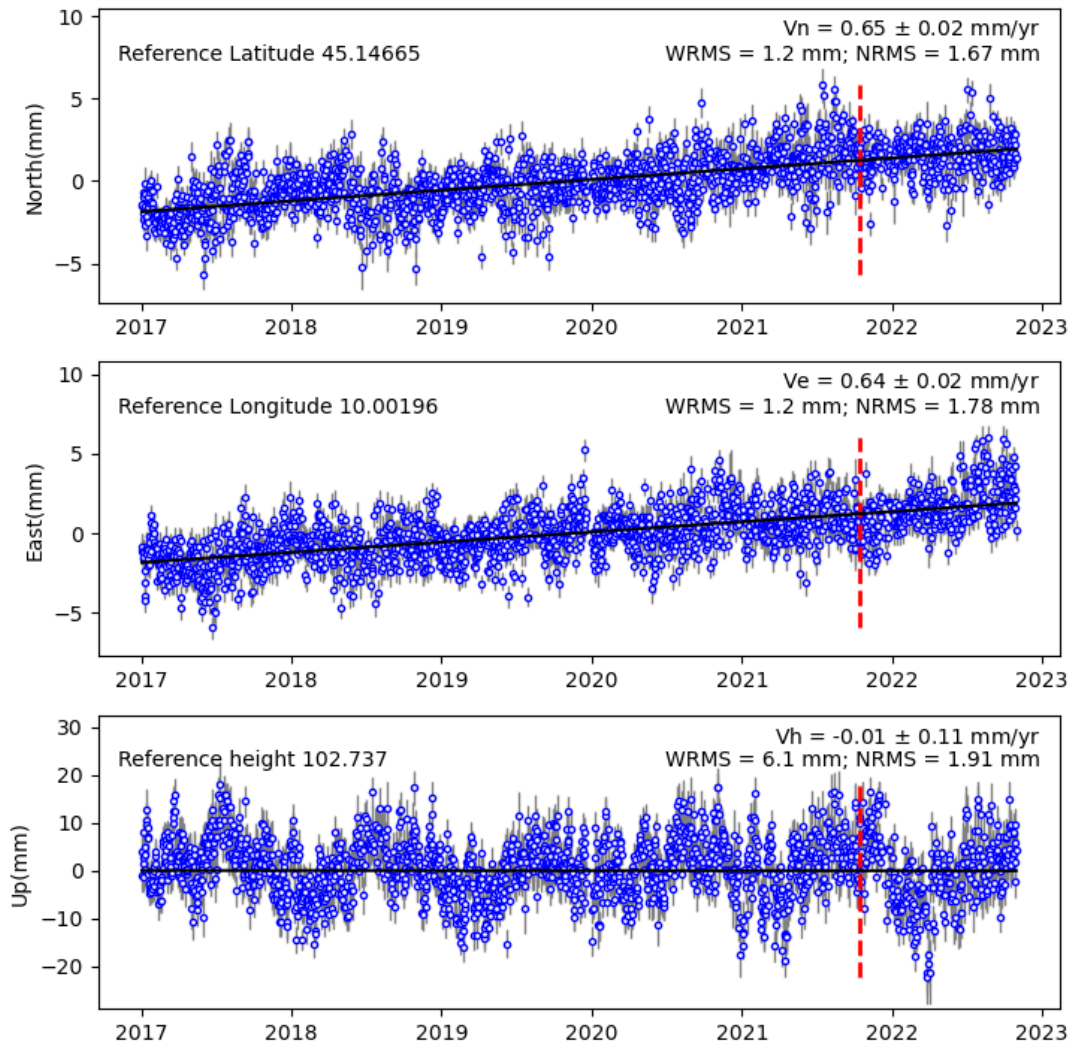


## CREA



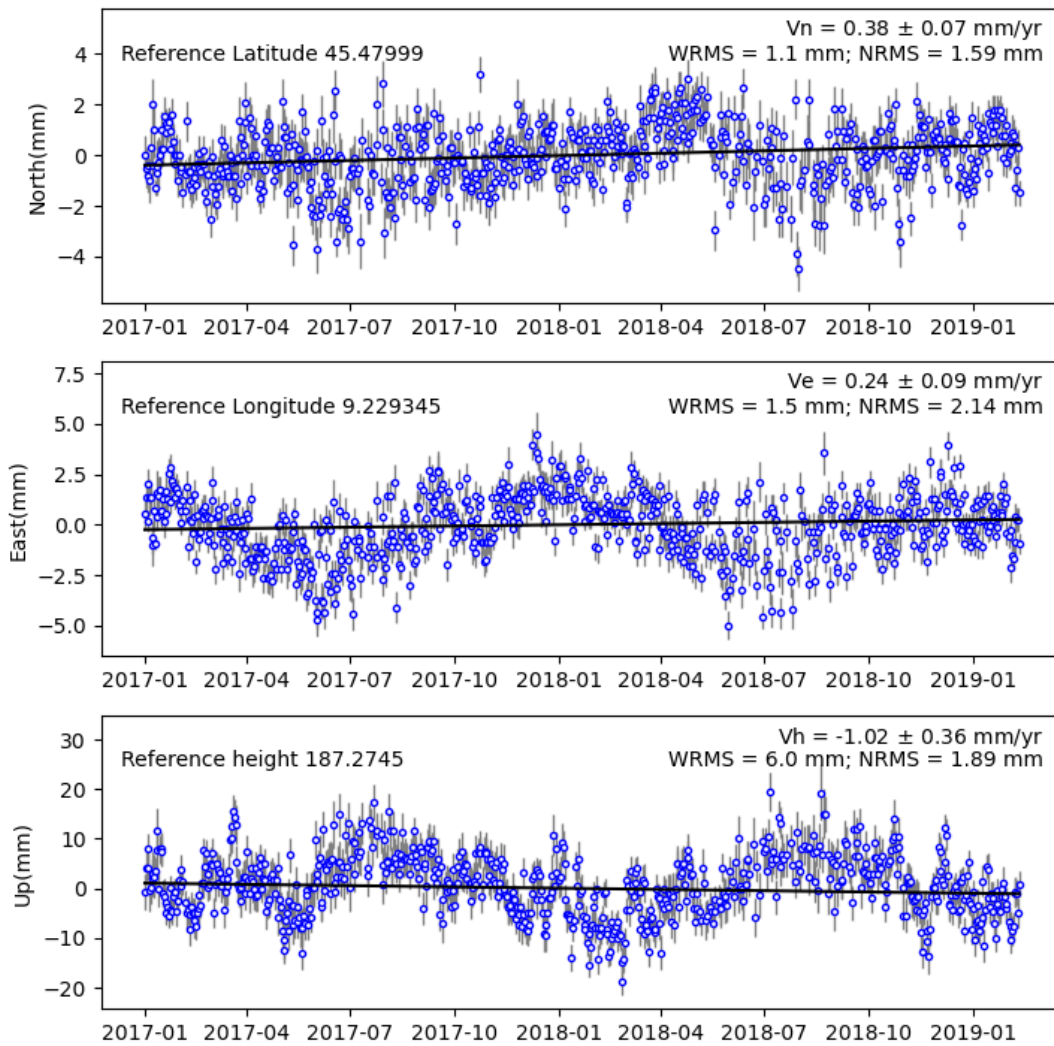
**Figura 8** - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali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

## CREM



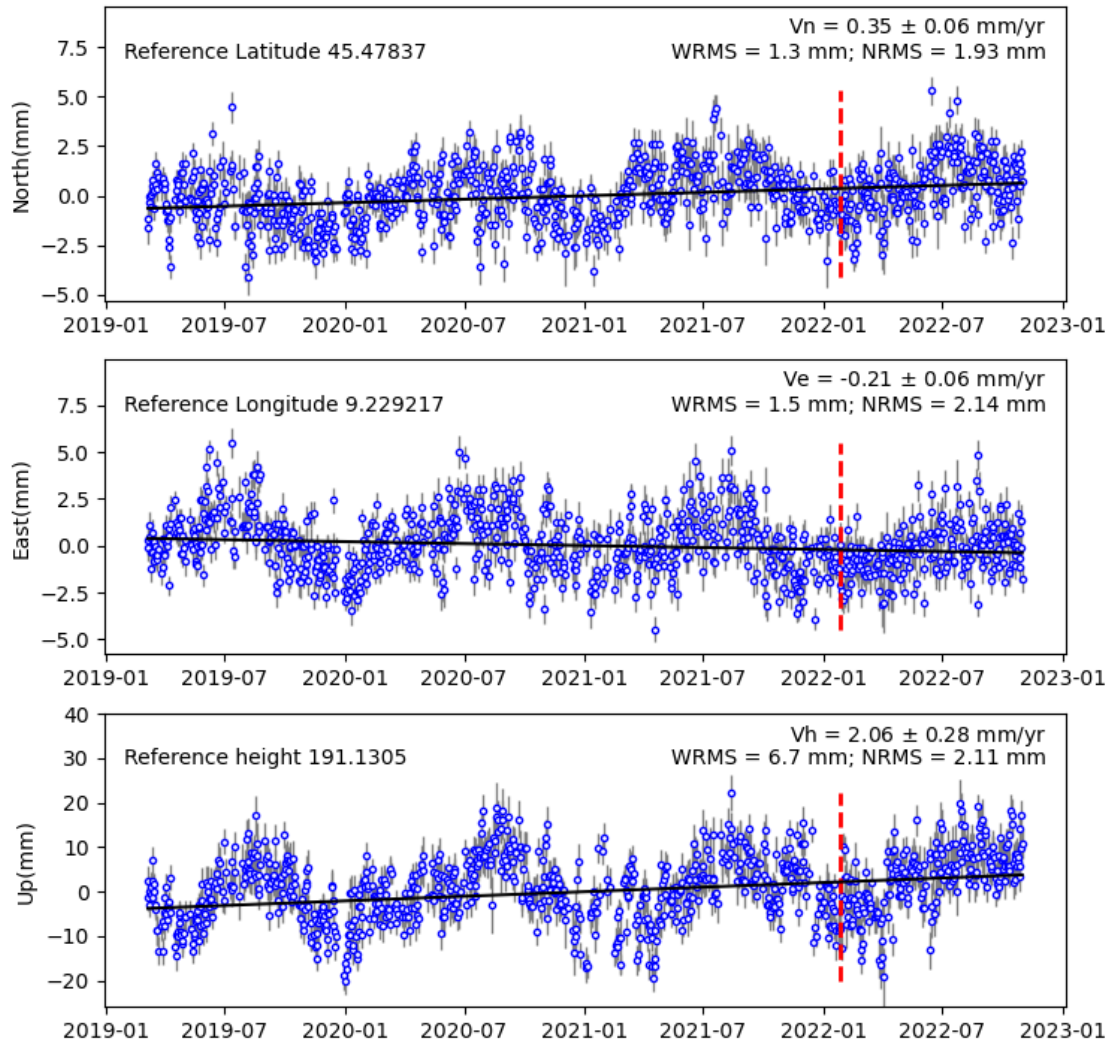
**Figura 9** - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali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

## MILA



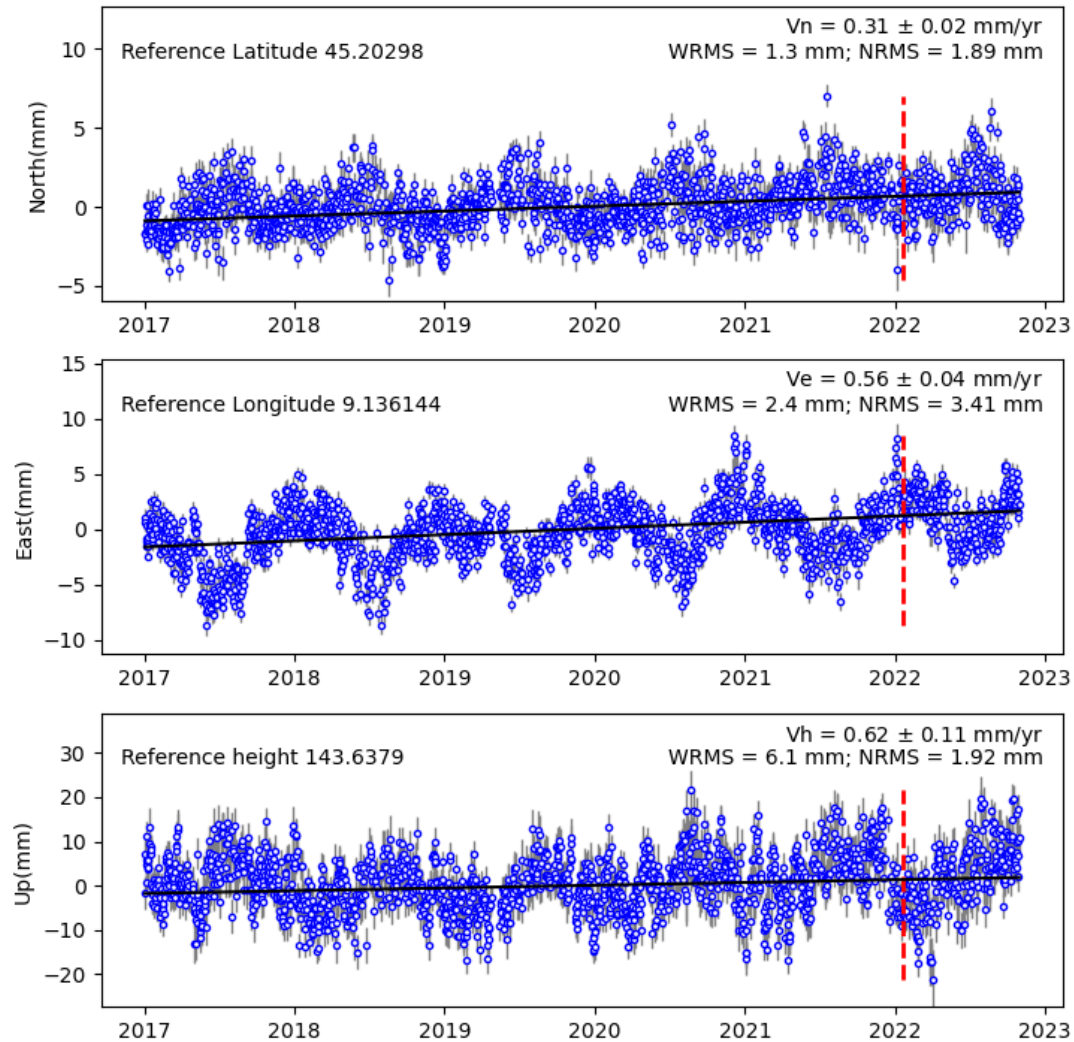
**Figura 10** - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 9](#).

## MIL2

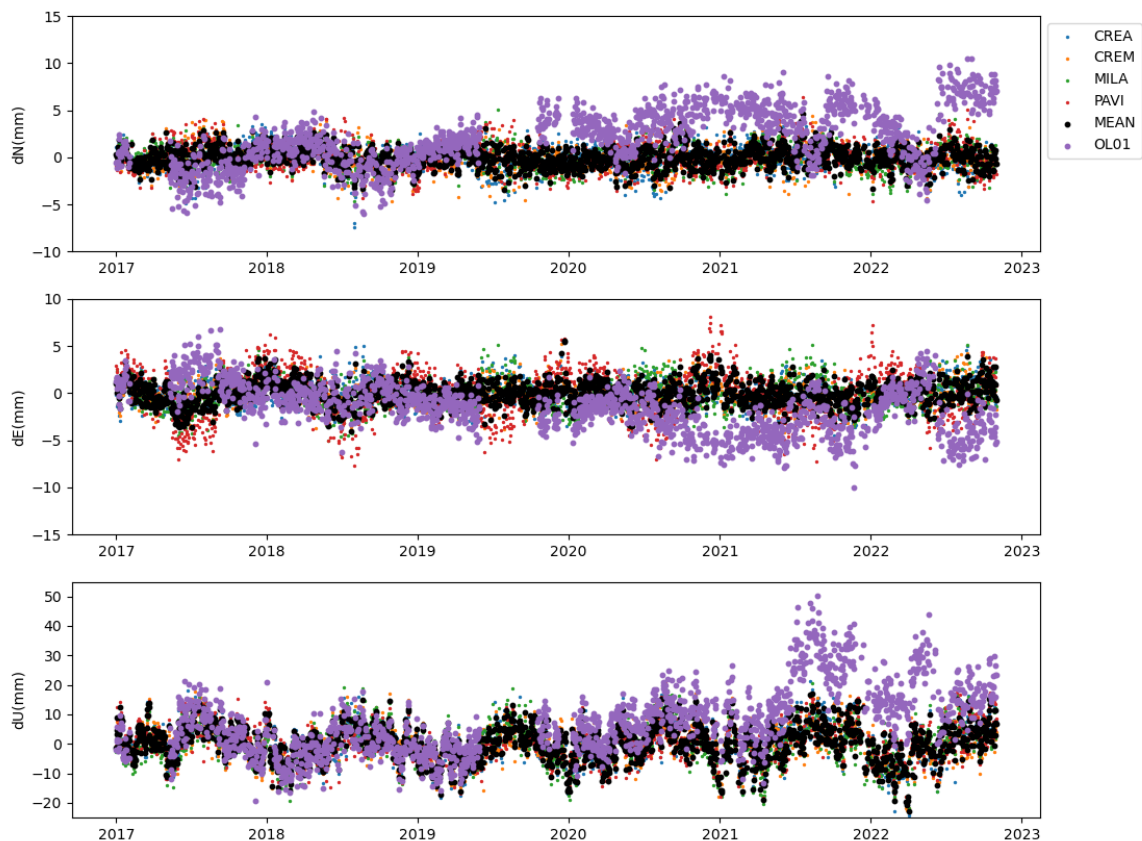


**Figura 11** - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 9](#).

## PAVI



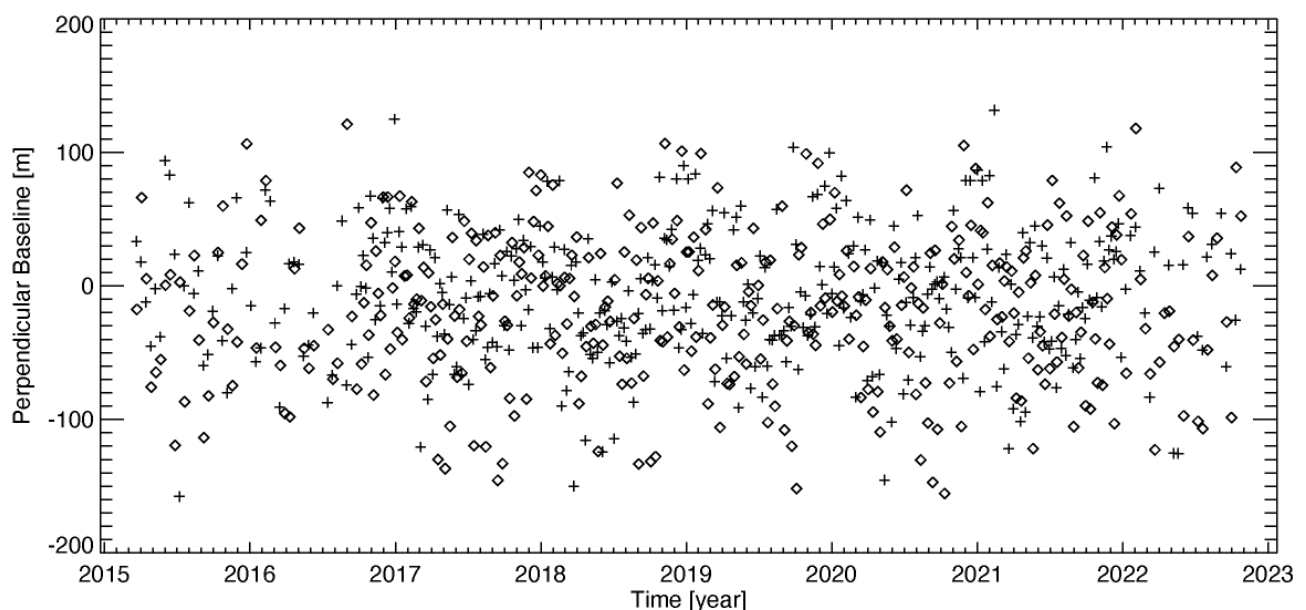
**Figura 12** - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 9](#).



**Figura 13** - Residui delle serie temporali Nord-sud, Est-Ovest, verticale (NORTH, EAST, UP) 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 2017-2022). In viola, in primo piano, la stazione OL01 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 OL01 abbiamo considerato come zero la media di OL01 calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati).

## 2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2022 (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 383 immagini acquisite lungo orbite discendenti e 373 lungo orbite ascendenti, relative al periodo marzo 2015 – ottobre 2022; in [Figura 16](#) è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 1077 e 1041 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 dall' 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 GNSS che, come testimoniato dalle relative misure GNSS, 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 per la fine dell'estate 2023. 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 0.99. 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 - ottobre 2022

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

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-23/10/2022	383	1077



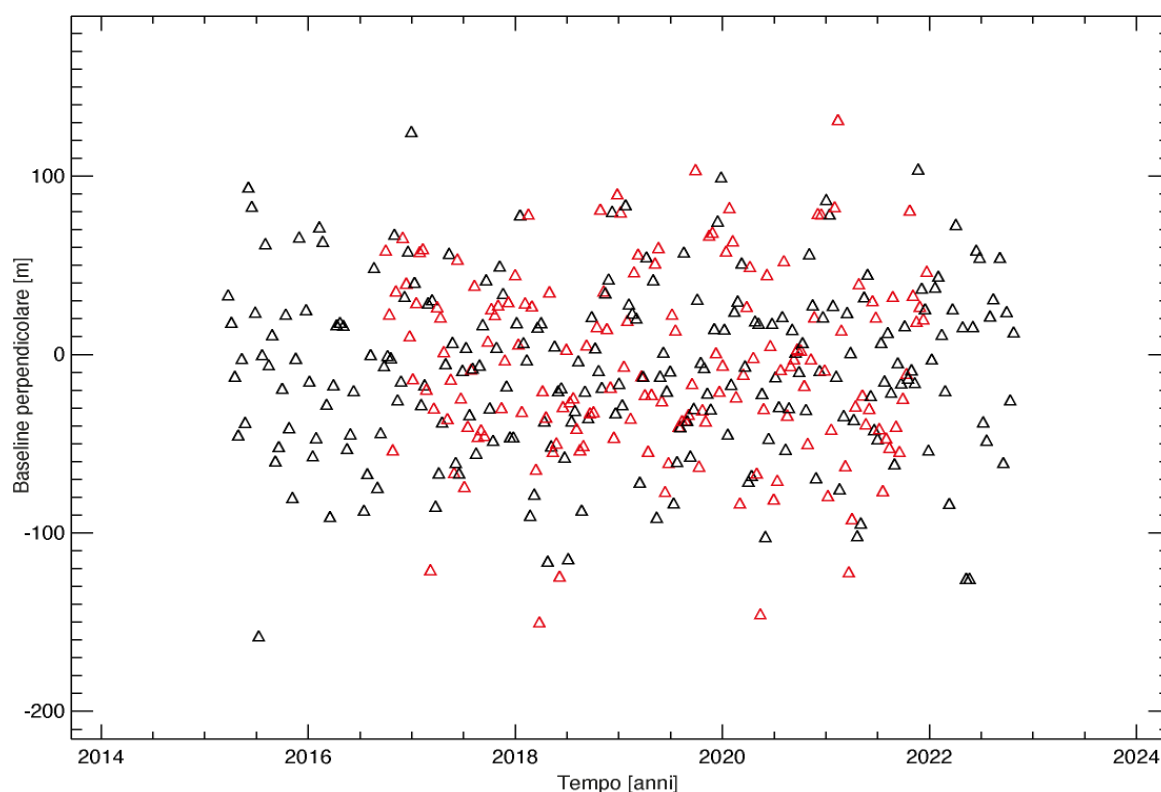
Ascendente	23/03/2015-24/10/2022	373	1041
------------	-----------------------	-----	------

**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 – ottobre 2022)

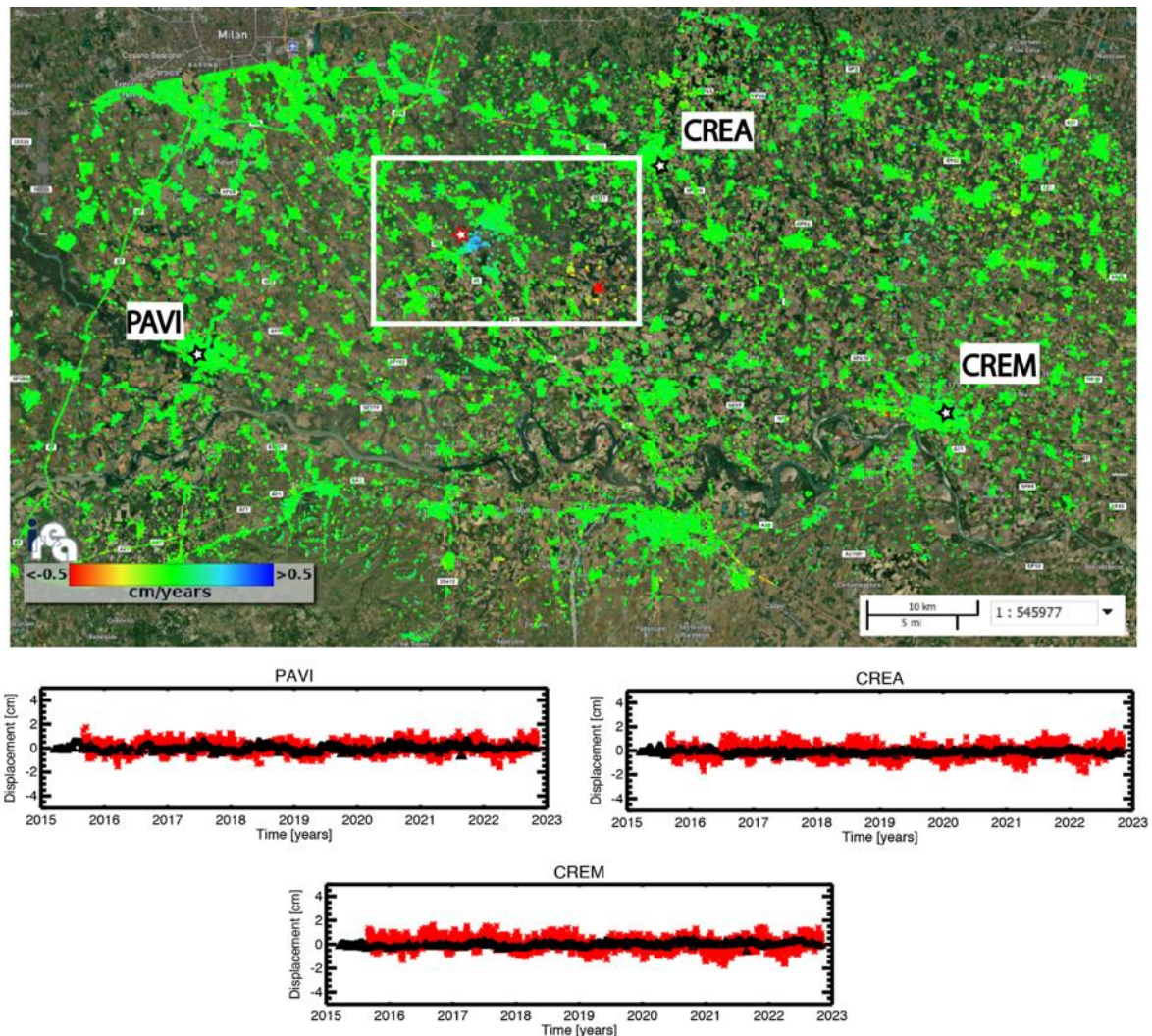
L'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 lungo orbite discendenti (track 168). In particolare, sono stati utilizzati 383 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – ottobre 2022 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 16](#); grazie ad essi sono stati generati 1077 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 17](#), 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 dal Dicembre 2021.

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GNSS di deformazione rese disponibili dall' OGS. In particolare, nella [Figura 18](#) sono evidenziate le posizioni delle tre stazioni GNSS 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 GNSS 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

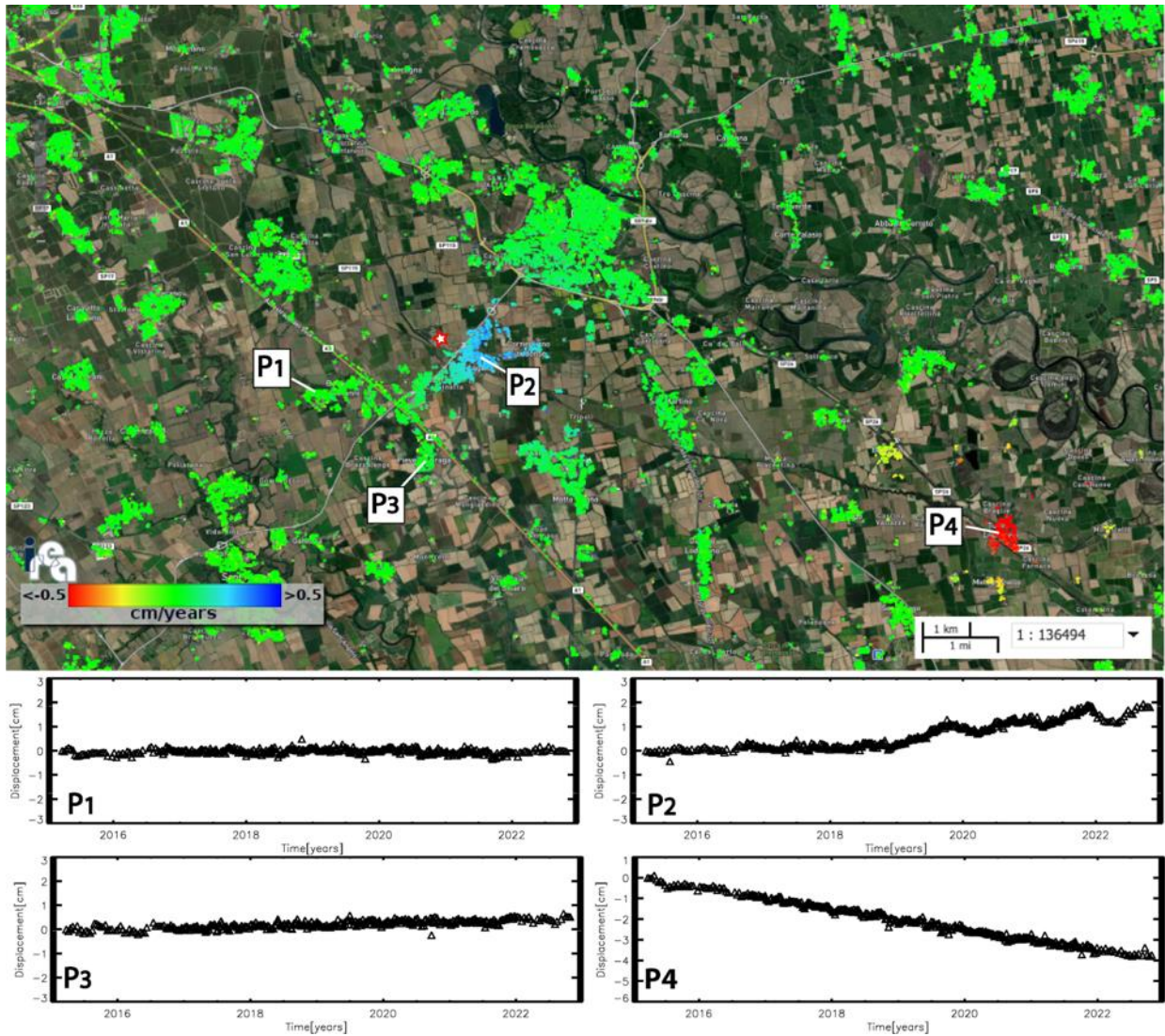
*elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2022. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GNSS 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 19](#).*

Come si evince dai grafici in [Figura 18](#), 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 0.4 cm. Tale valore è consistente, se non migliore, rispetto alla stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

Nella [Figura 19](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS della [Figura 18](#) sull'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 19](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in [Figura 19](#)).

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.

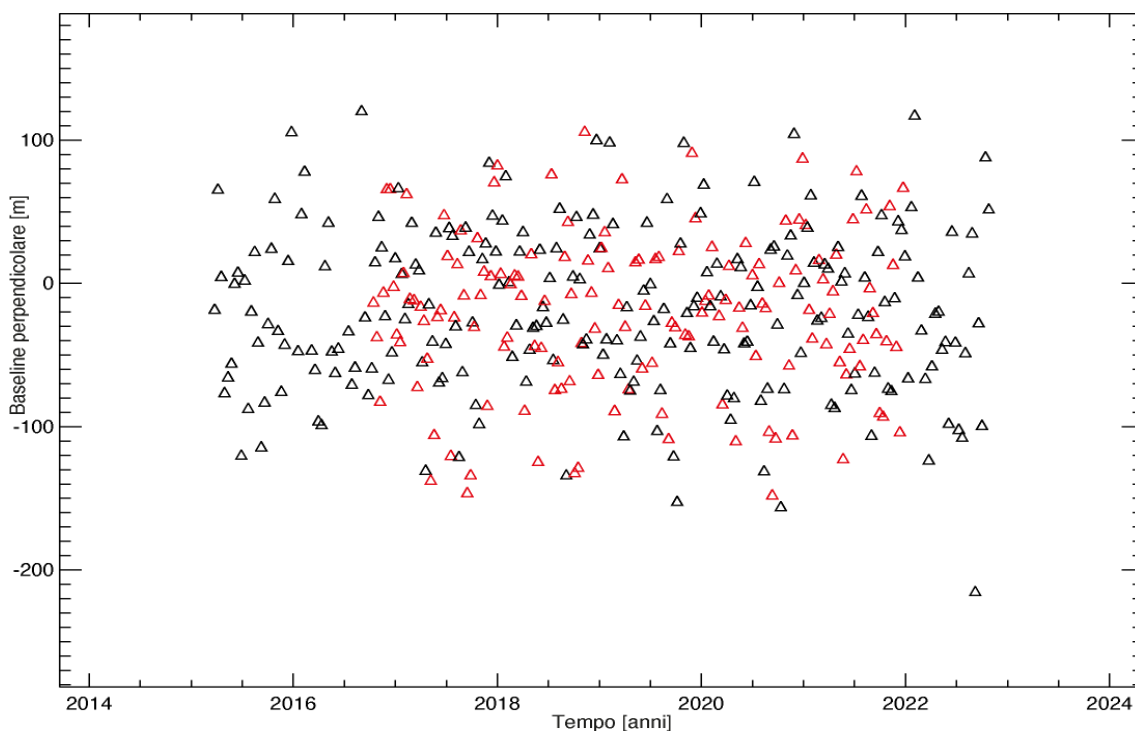


**Figura 17** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 18](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto 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 - ottobre 2022.

## 2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – ottobre 2022)

Come detto, l'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 nel periodo marzo 2015 – ottobre 2022 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, sono stati utilizzati 373 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 20](#), con i quali sono stati generati 1001 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.

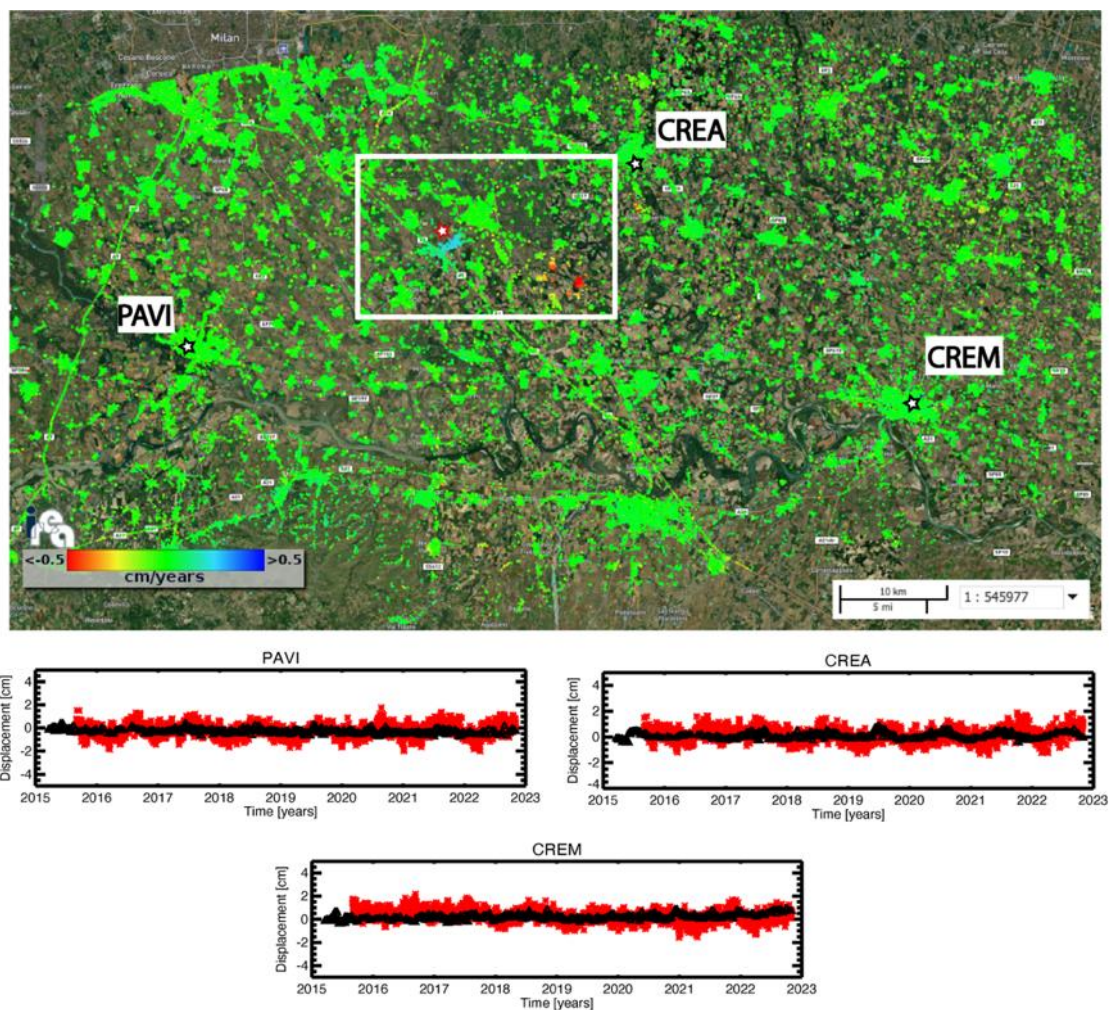
I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in [Figura 21](#), dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione in LOS sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione 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.

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 GNSS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, nella [Figura 21](#) sono rappresentate le 3 stazioni GNSS 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 GNSS 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.



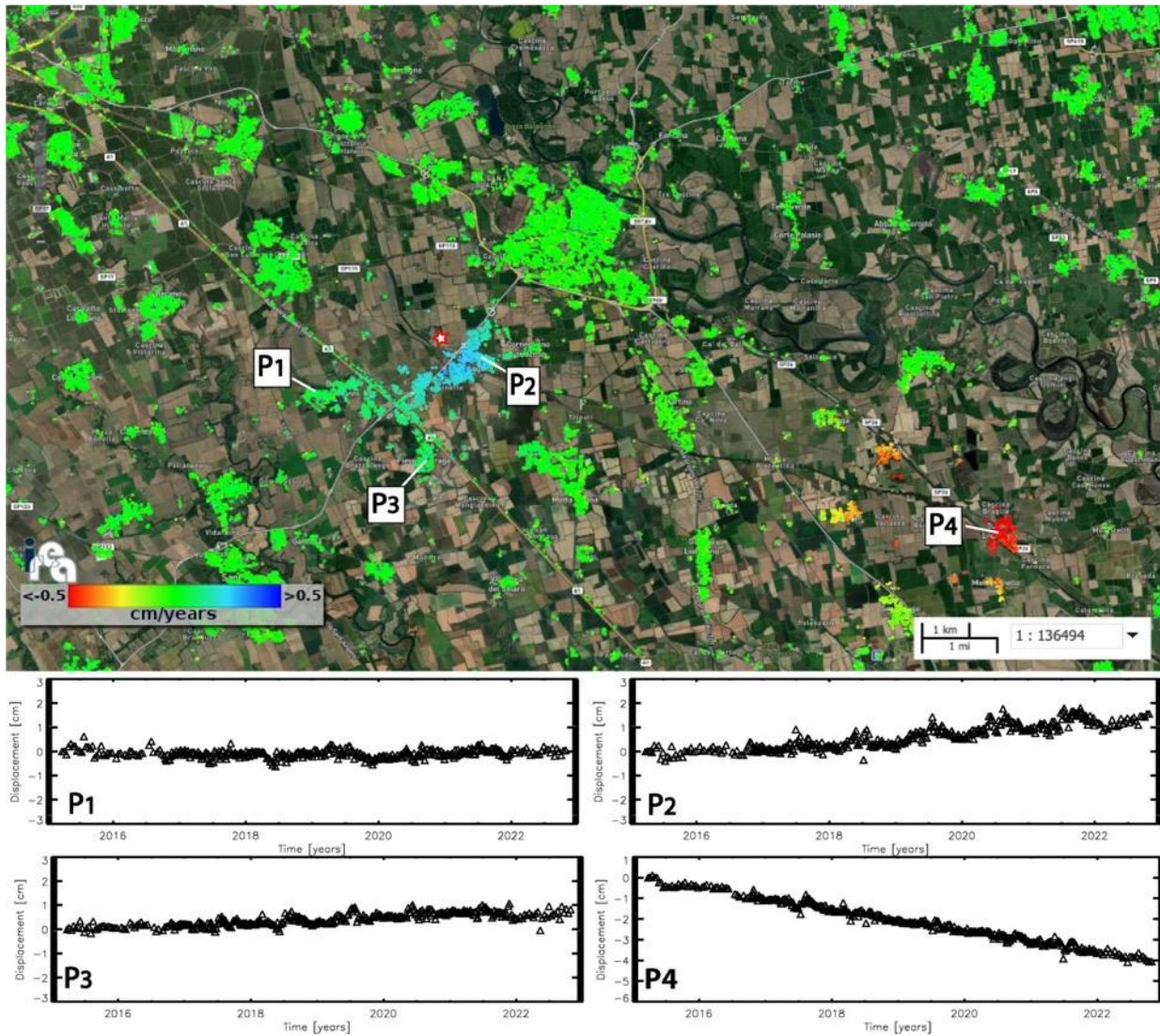
**Figura 19** - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2022. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GNSS 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 22](#).

Come si evince dai grafici in [Figura 21](#), 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.

Nella [Figura 22](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS della [Figura 21](#) 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 22](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 di [Figura 22](#)).

L'analisi effettuata evidenzia che nell' area identificata dai punti P1 e P3 si rilevano lievissime deformazioni, 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 21](#) 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 - ottobre 2022.



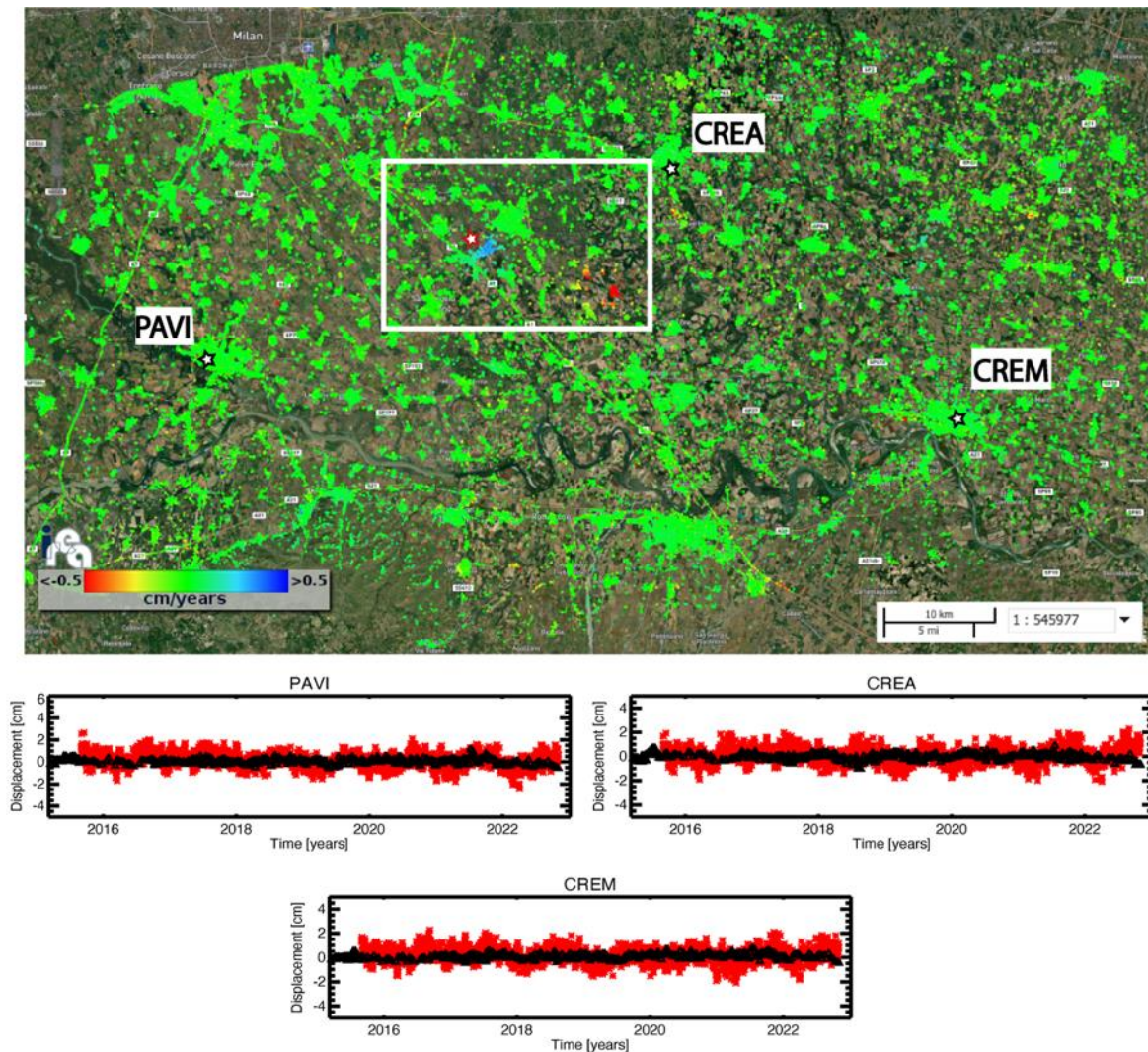
## 2.2.3 Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale

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 23](#) e [24](#), rispettivamente. Anche in questo caso, utilizzando le misure delle 3 stazioni GNSS rese disponibili da OGS indicate sulle mappe, sono stati effettuati i confronti tra le serie di deformazione GNSS e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (asterischi rossi e triangoli neri, rispettivamente). In particolare nella [Figura 23](#) 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 0.5 cm. Nella [Figura 24](#), 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 0.4 cm.

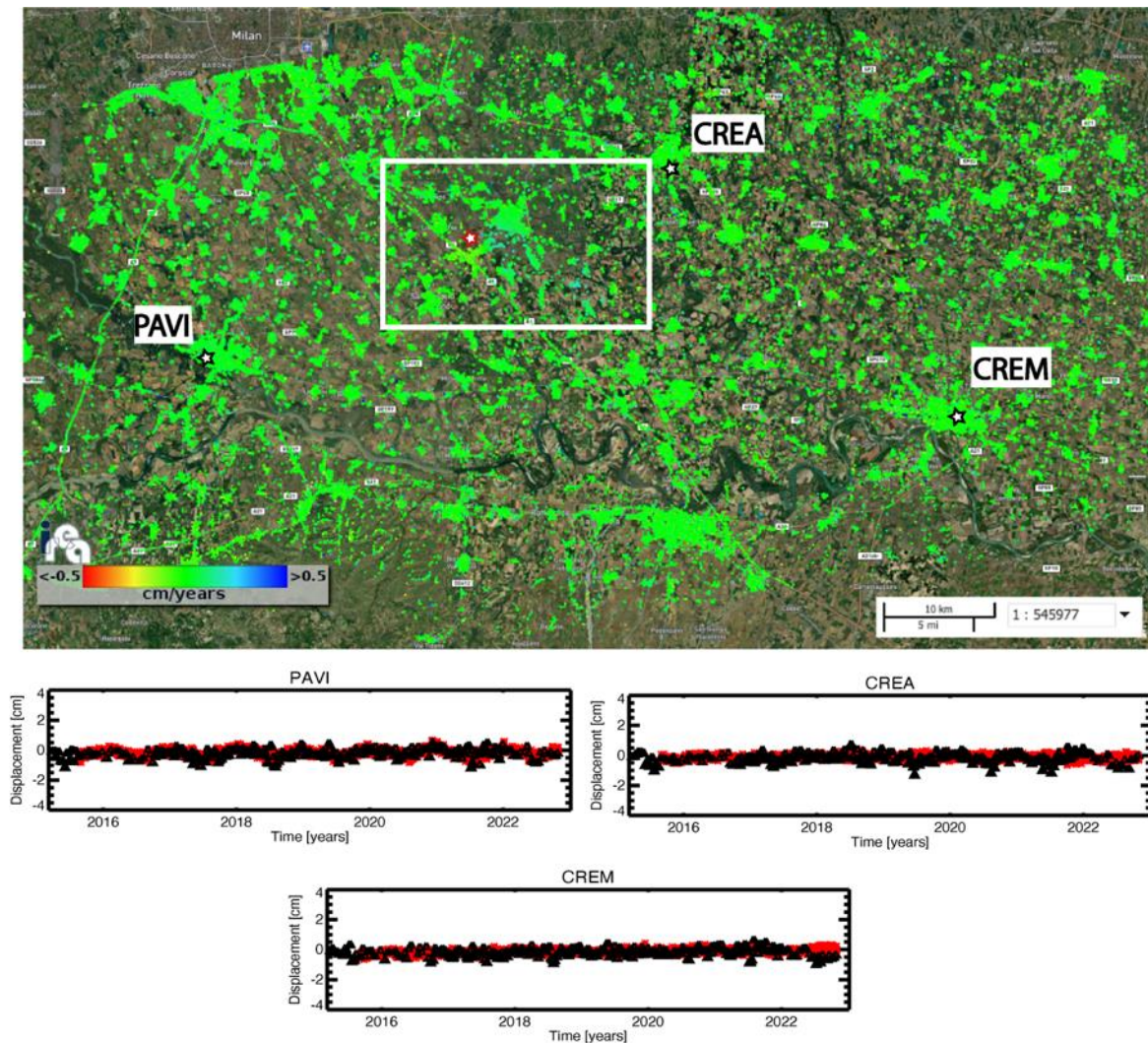
Da tale analisi si evince che in entrambi i casi i confronti tra le misure DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo e i valori di deviazione standard sono consistenti con le accuratezze della tecnica SBAS riportate in letteratura.

Le [Figure 25](#) e [26](#) 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 23](#) e [24](#). Sono inoltre rappresentati i grafici relativi all'andamento temporale della deformazione di quattro punti selezionati. L'analisi dei risultati mostrati nelle [Figure 25](#) e [26](#) evidenzia che nel periodo marzo 2015-ottobre 2022 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.

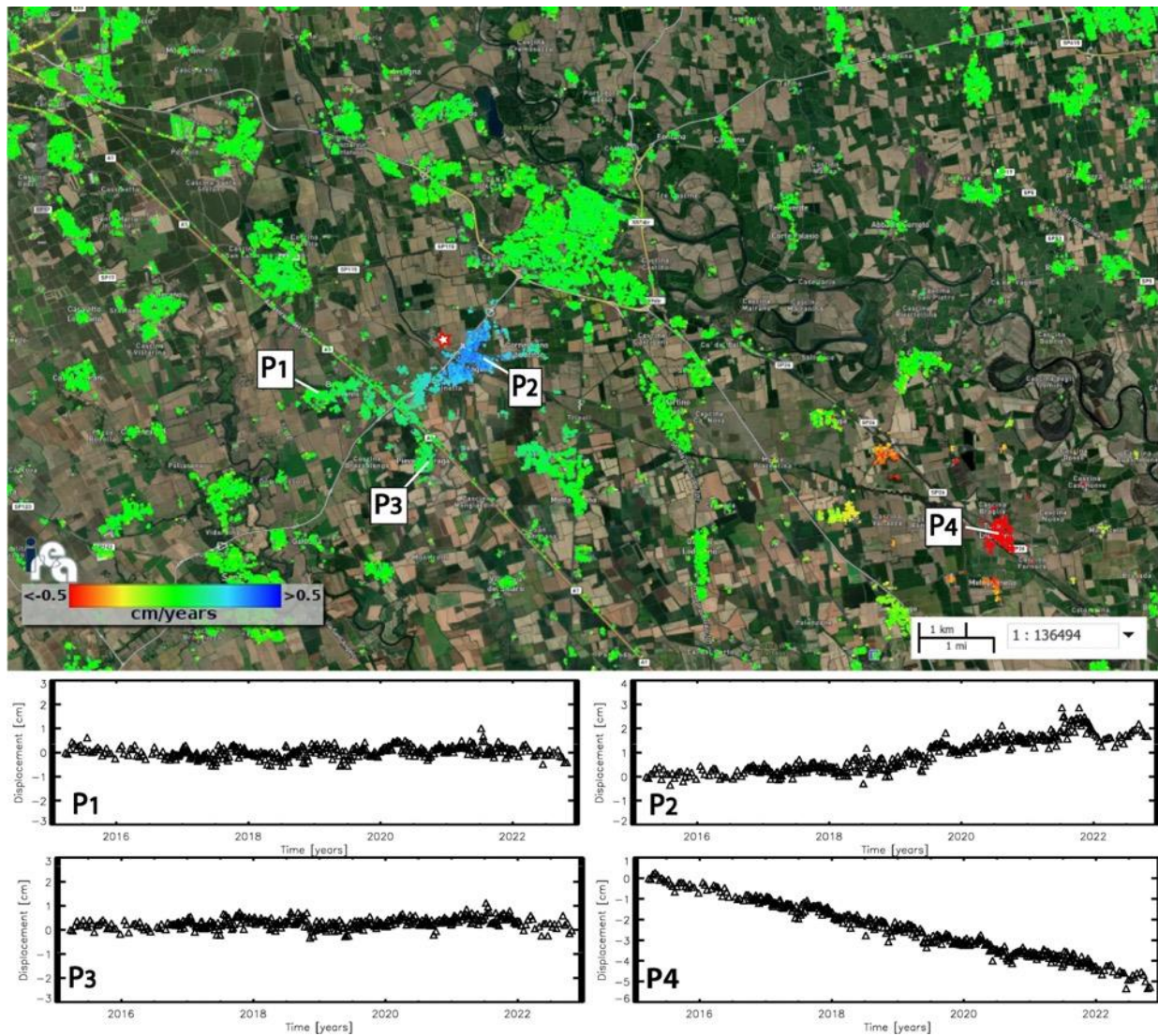
Inoltre, i risultati mostrano un significativo effetto deformativo nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, avente una significativa componente verticale (vedi plot del punto P4) con un tasso il cui valore massimo è di circa 1 cm/anno.



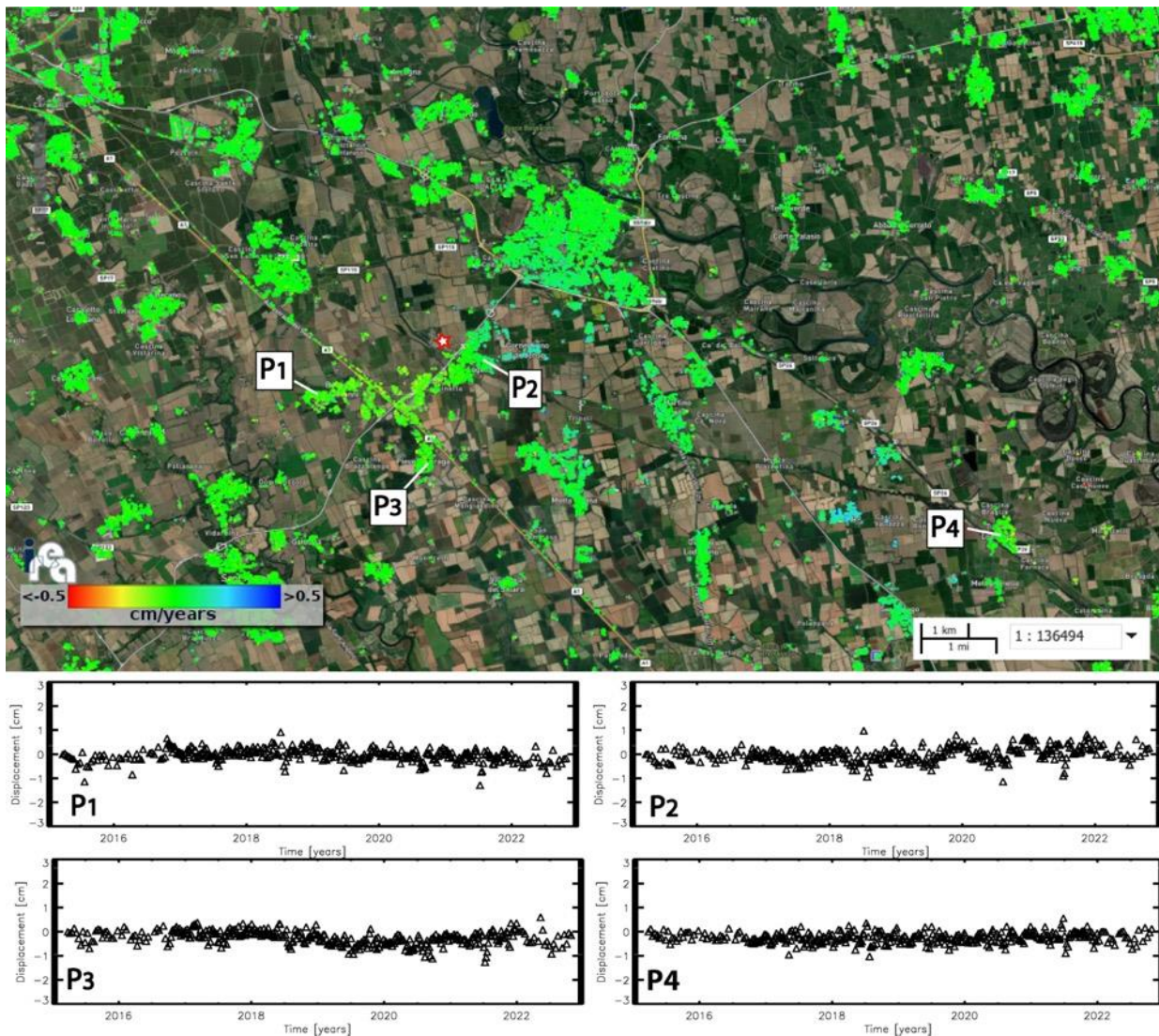
**Figura 21** - Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GNSS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 25](#).



**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 GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GNSS 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 26](#).



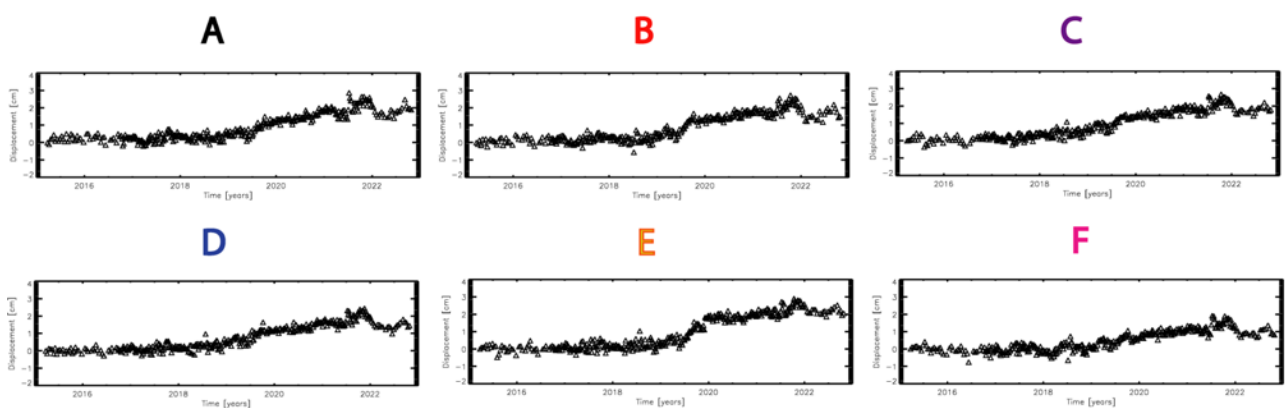
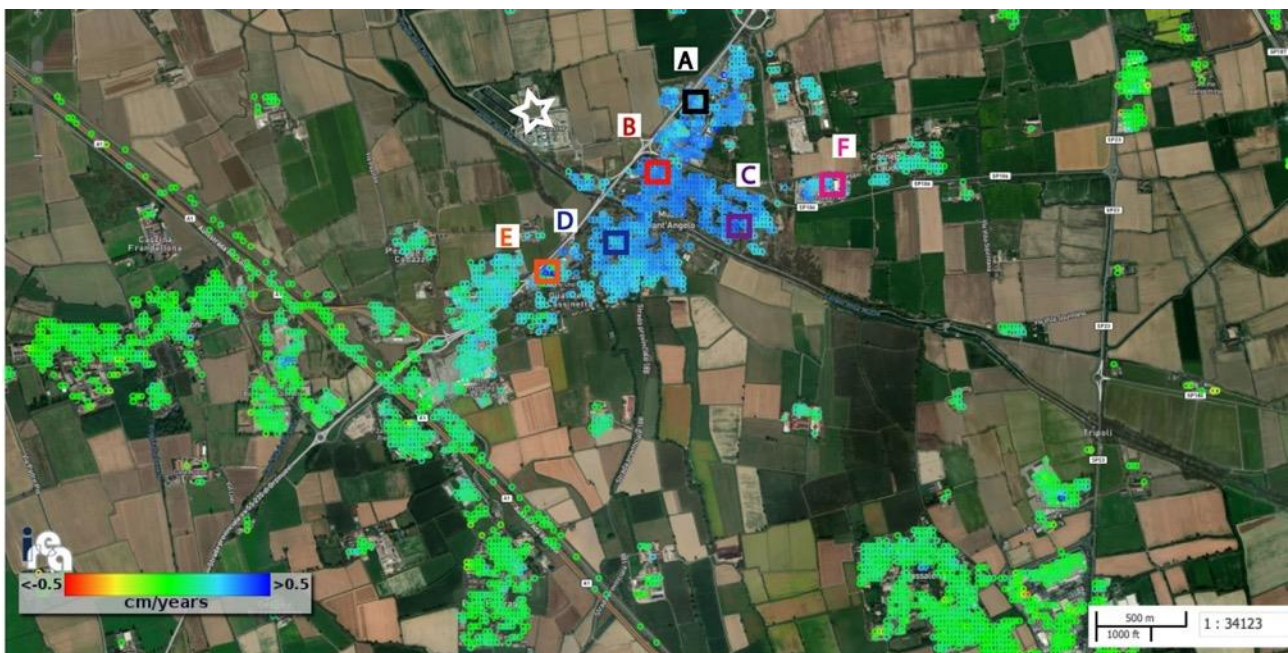
**Figura 23** - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di [Figura 23](#) in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (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).



**Figura 24** - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione [Figura 24](#) 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).

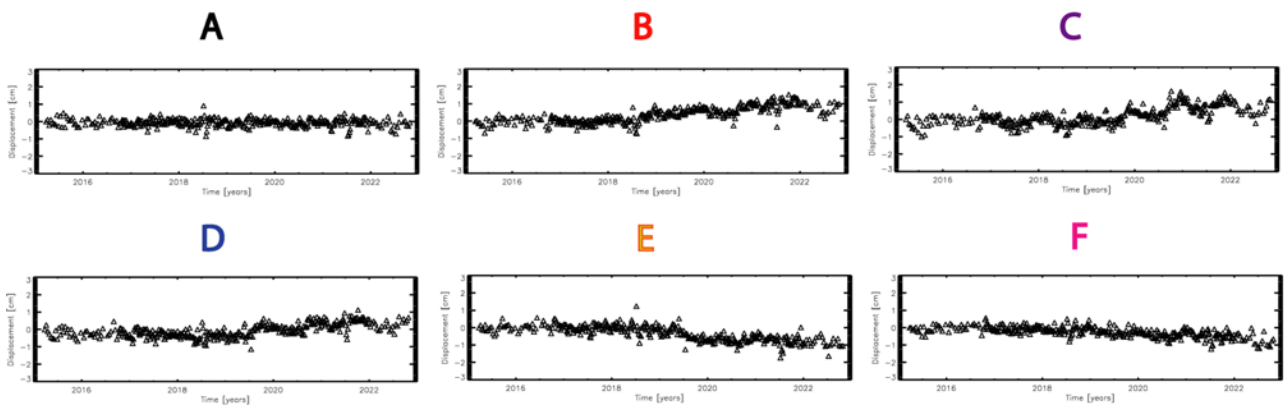
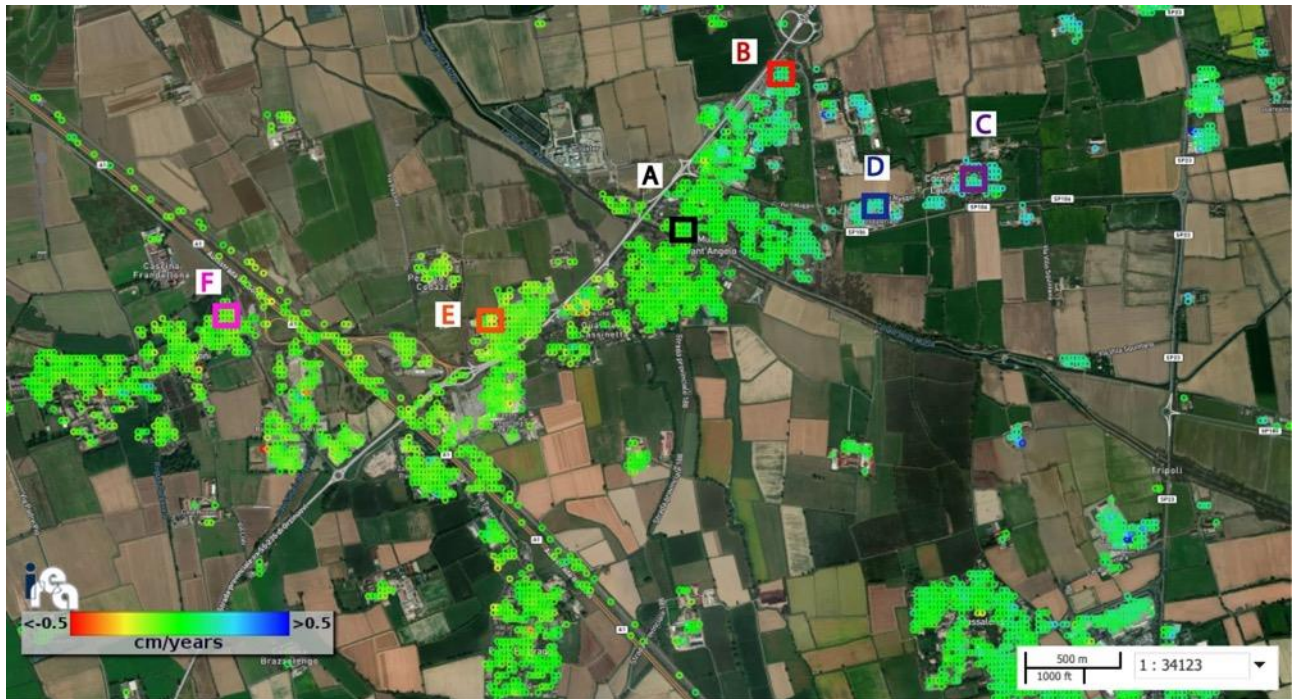
## 2.2.4 Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense.

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 19, 22, 25 e 26](#), 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 27 e 28](#) 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, completati 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.

Nella [Figura 27](#) si rappresentano 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 poco inferiore a 3 cm raggiunta nei periodi di settembre/ottobre 2021 e 2022.

Nella [Figura 28](#) 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 massimi di circa 1.5 cm (punti B, C e D di [Figura 28](#)), mentre nella zona ad Ovest del sito di stoccaggio si rilevano degli spostamenti in direzione Ovest con valori di circa 1 cm (punti E ed F di [Figura 28](#)). Dall'osservazione congiunta delle Figure 27 e 28 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 1/5/2022-31/10/2022 e corrisponde alla fase di iniezione del quinto anno di stoccaggio.

Nei sei mesi rendicontati l'infrastruttura di monitoraggio ha operato correttamente senza interruzioni di rilievo. Dal 24/5/2022 è operativa la nuova stazione sismometrica OL10, in Comune di Cavenago d'Adda, provincia di Lodi. Nel semestre cui si riferisce la presente relazione è stato localizzato un solo evento sismico nelle aree di rilevazione della RMCL. Tale evento rientra 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 31/10/2022 nei due sistemi di riferimento ITRF08, riferito al centro di massa della Terra, ed EURA, solidale con la placca continentale europea. La stazione OL01 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 OL01 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 di minore entità nell'estate del 2022.

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 31/10/2022.

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 velocità variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno, ed un'escursione massima di poco inferiore ai 3 cm raggiunta ad ottobre 2021; è presente anche una lieve componente Est-Ovest che raggiunge un massimo di 1.5 cm nella zona ad Est del sito di stoccaggio.

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 ridottissimi ricadente quindi entro la massima deformazione accettabile. Questa quantità sarà stimata con maggiore accuratezza successivamente, 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 0.5 cm, risultando quindi assolutamente in linea con l'accuratezza della tecnica SBAS riportate in letteratura.



## Bibliografia

- Altamimi, Z., Métivier, L., Collilieux, X., 2012. ITRF2008 plate motion model. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 117(B7):n/a–n/a. B07402.
- Blewitt, G., and D. Lavallée, 2002. Effect of annual signal on geodetic velocities, *J. Geophys. Res.*, 107, 2145, doi: 10.1029/2001JB000570, 2002.
- Bragato, P. L. and Tonto, A., 2005. Local Magnitude in Northeastern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(2):579–591.
- 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.
- 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.
- 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.; [http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/85\\_238.pdf](http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf).
- 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., 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., Spinelli A., 2012. OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. In: M. Mucciarelli (Ed.), *Tecniche Sperimentative 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. *Seismol. Res.*

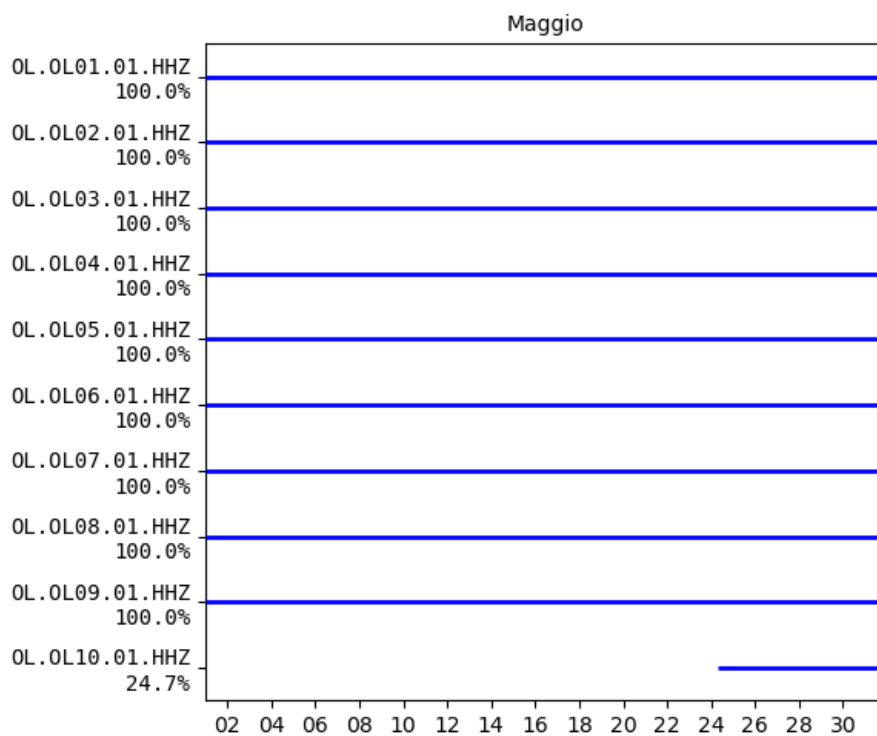
*Lett.*, 86, 1, 109-123 + Electronic Supplement.

- 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.
- Tregoning, P., and van Dam T., 2005. Atmospheric pressure loading corrections applied to GP S data at the observation level. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22310, doi:10.1029/2005GL024104.
- Zhou, P., Yang, H., Wang, B., and Zhuang, J., 2019. Seismological investigations of induced earthquakes near the Hutubi underground gas storage facility. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JB017360>.

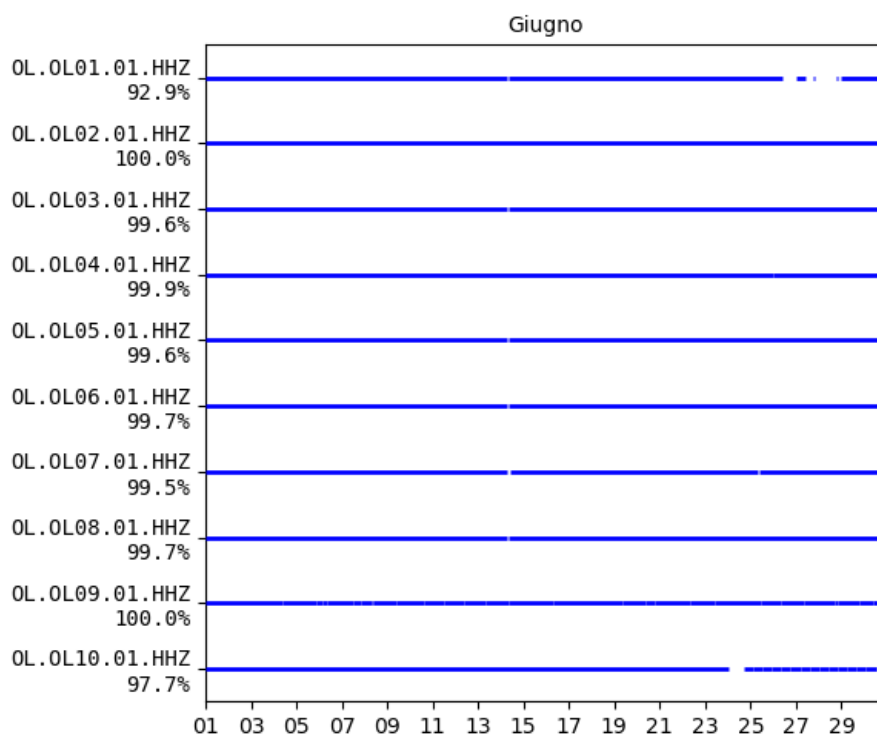
## **Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL**

I grafici raffigurano la disponibilità dei dati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL) nel periodo 1/05/2022-31/10/2022, 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.

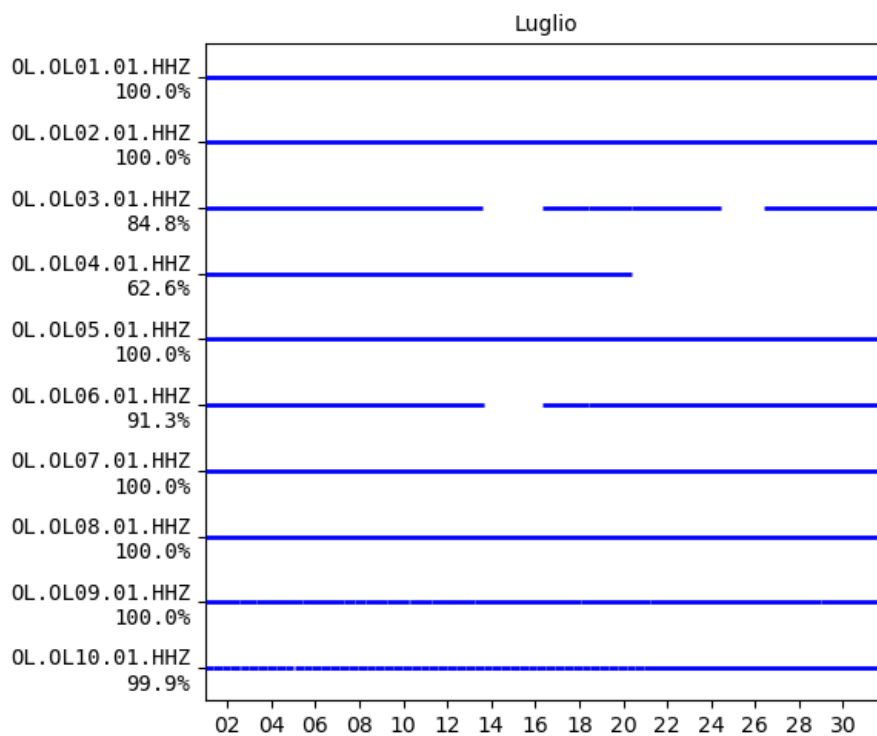
### Maggio 2022



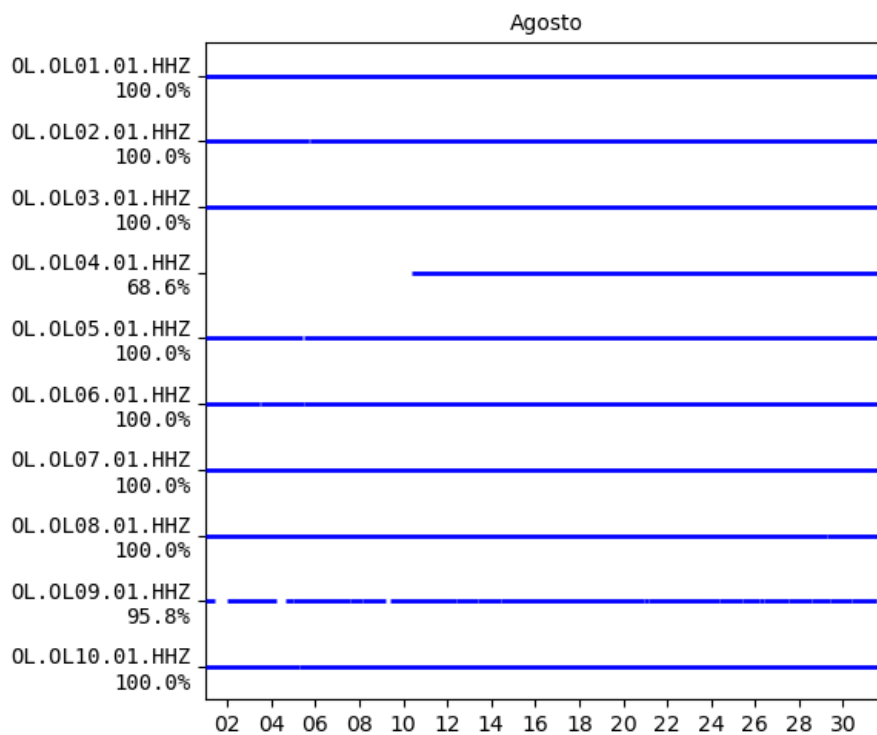
### Giugno 2022



### Luglio 2022

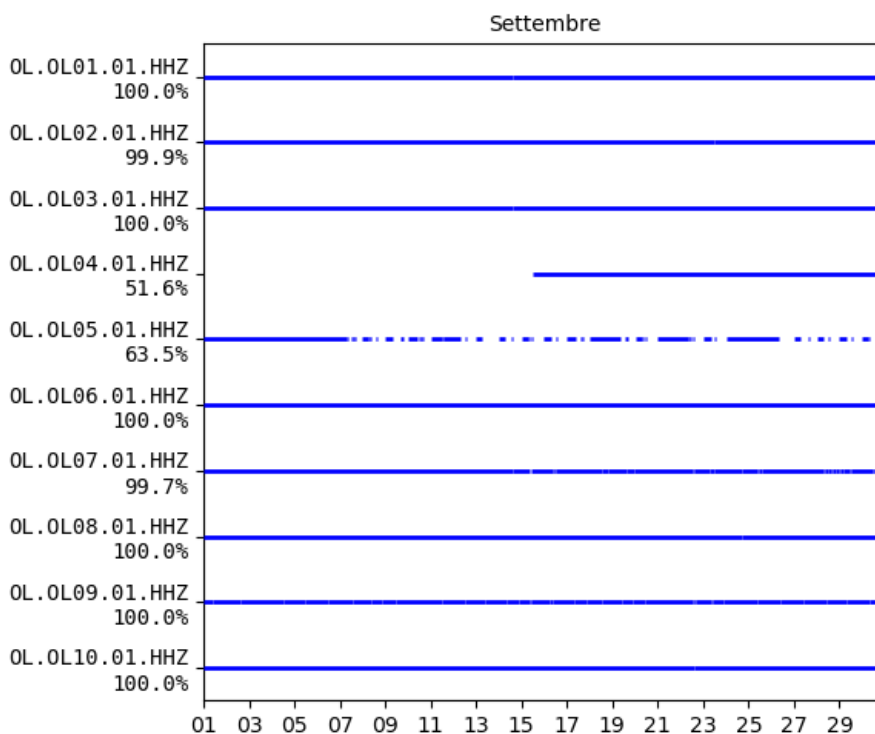


### Agosto 2022

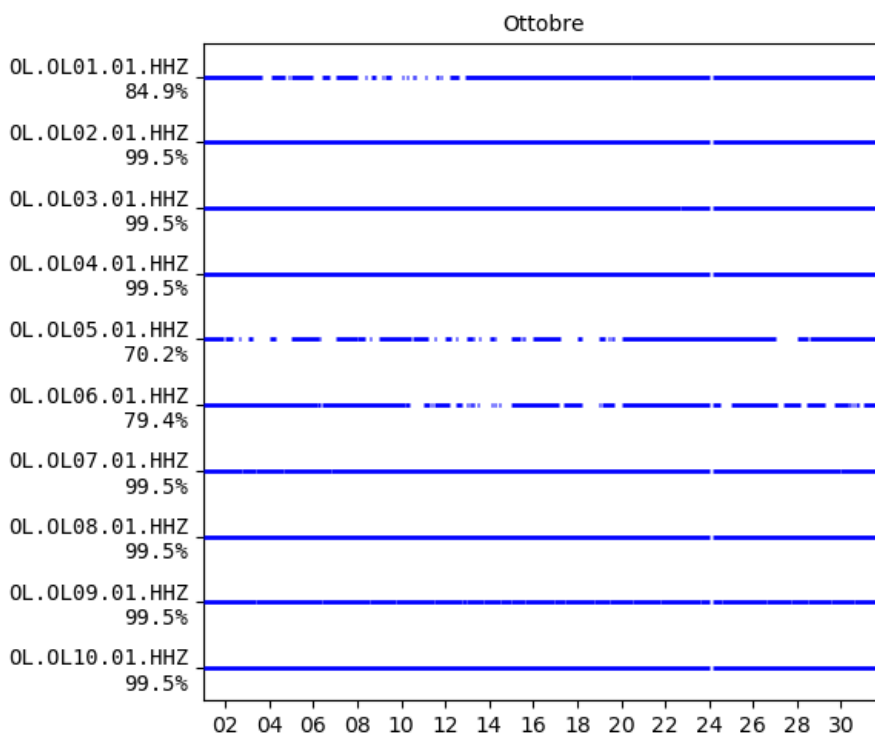




### Settembre 2022



### Ottobre 2022



## 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.



OGS

Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale



Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento elettromagnetico dell'ambiente

# Cornegliano Laudense Seismic Network Event List

# File generated on: 2023-01-20 13:46:17.402845
# Location Method: Hypoellipse
# Earth Model: cornl

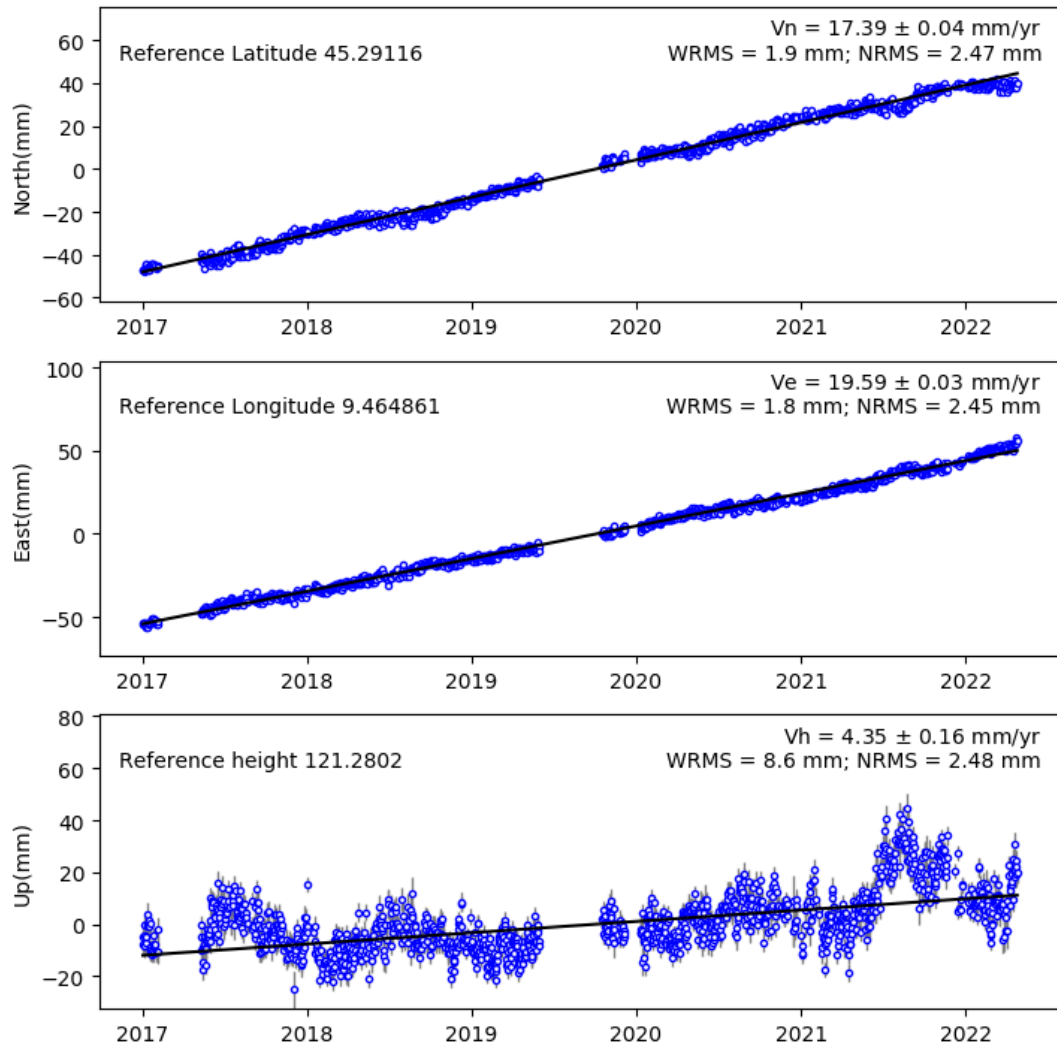
Table with columns: id, Area, date, time, lat, lon, depth, Ml, Q, GAP, No, Ns, errh1, errh2, errz, rms, distance, Location. Contains 33 rows of seismic event data.

## **Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08**

In questa sezione sono riportate le serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08. 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.

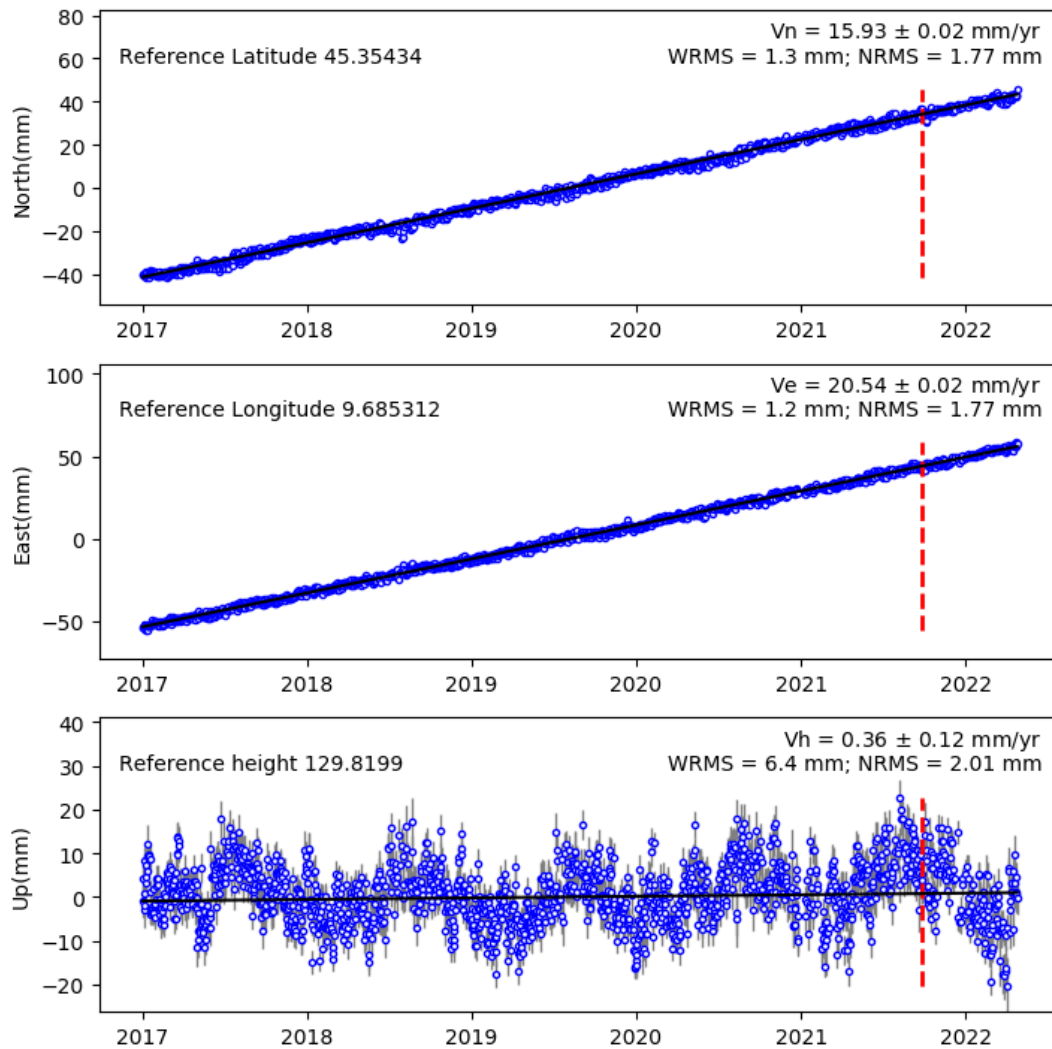
Sul grafico è presente anche la retta interpolante, la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, visibile sullo stesso grafico in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).

### OL01



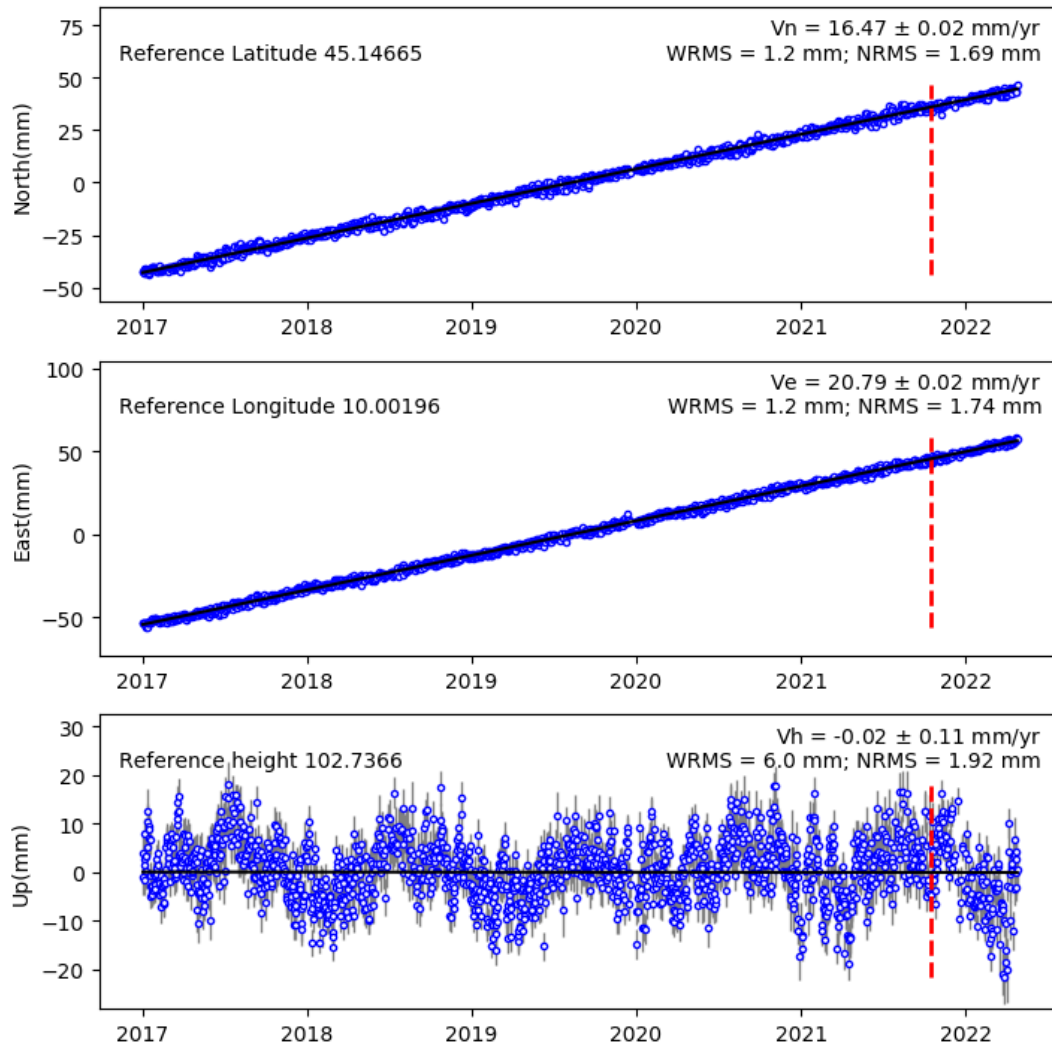
**Figura C.1** – Serie temporale della stazione OL01 secondo il sistema di riferimento ITRF08.

### CREA



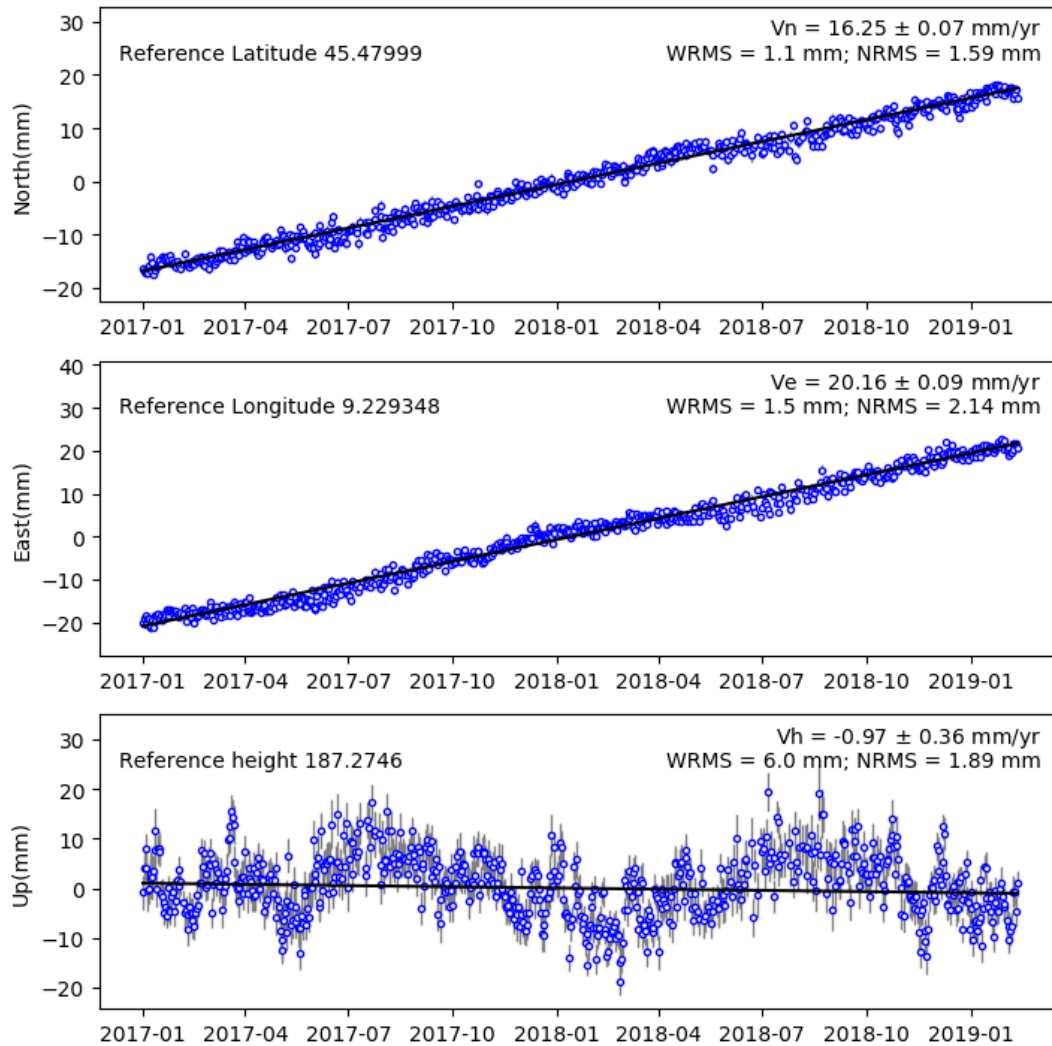
**Figura C.2** – Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF08. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

### CREM



**Figura C.3** – Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF08. 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.

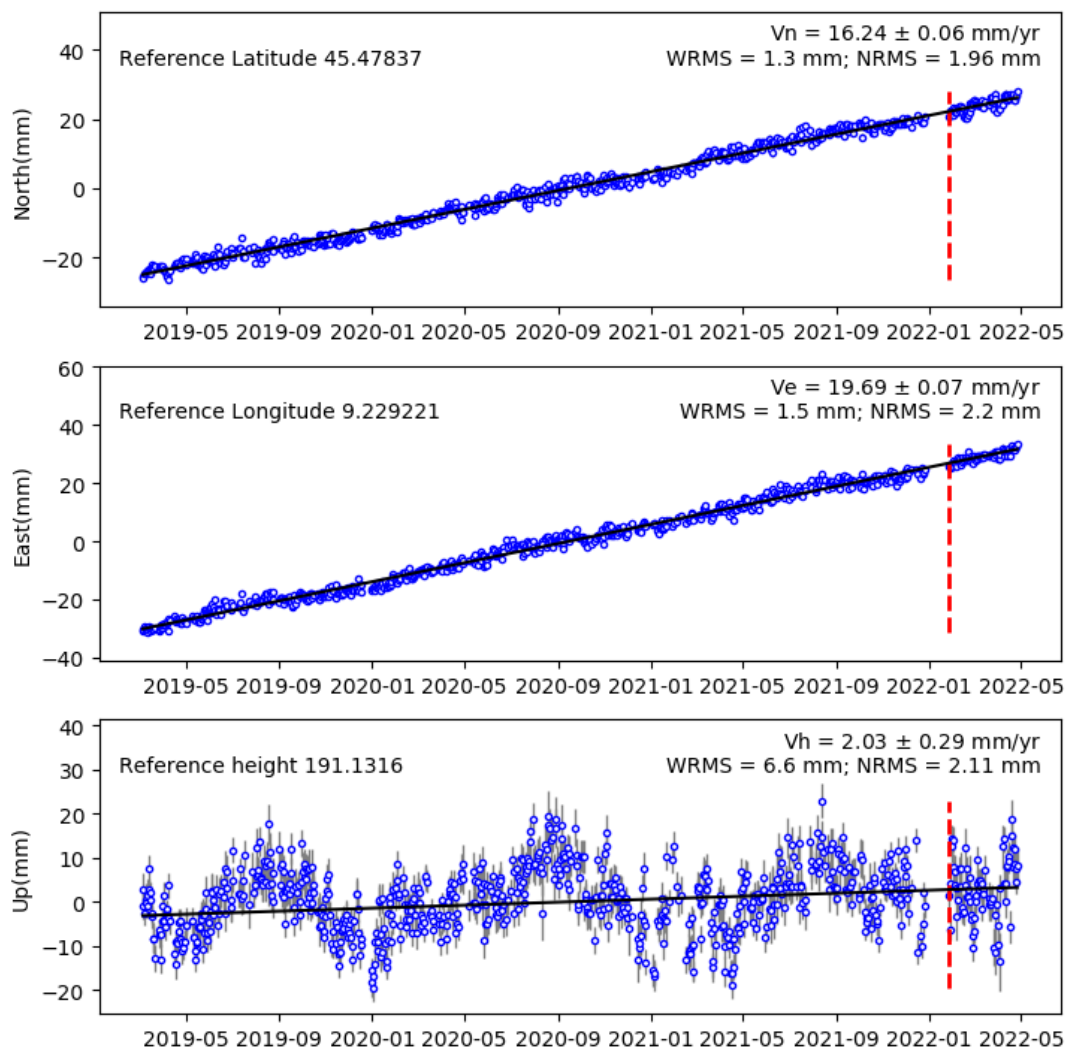
### MILA



**Figura C.4** – Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF08.

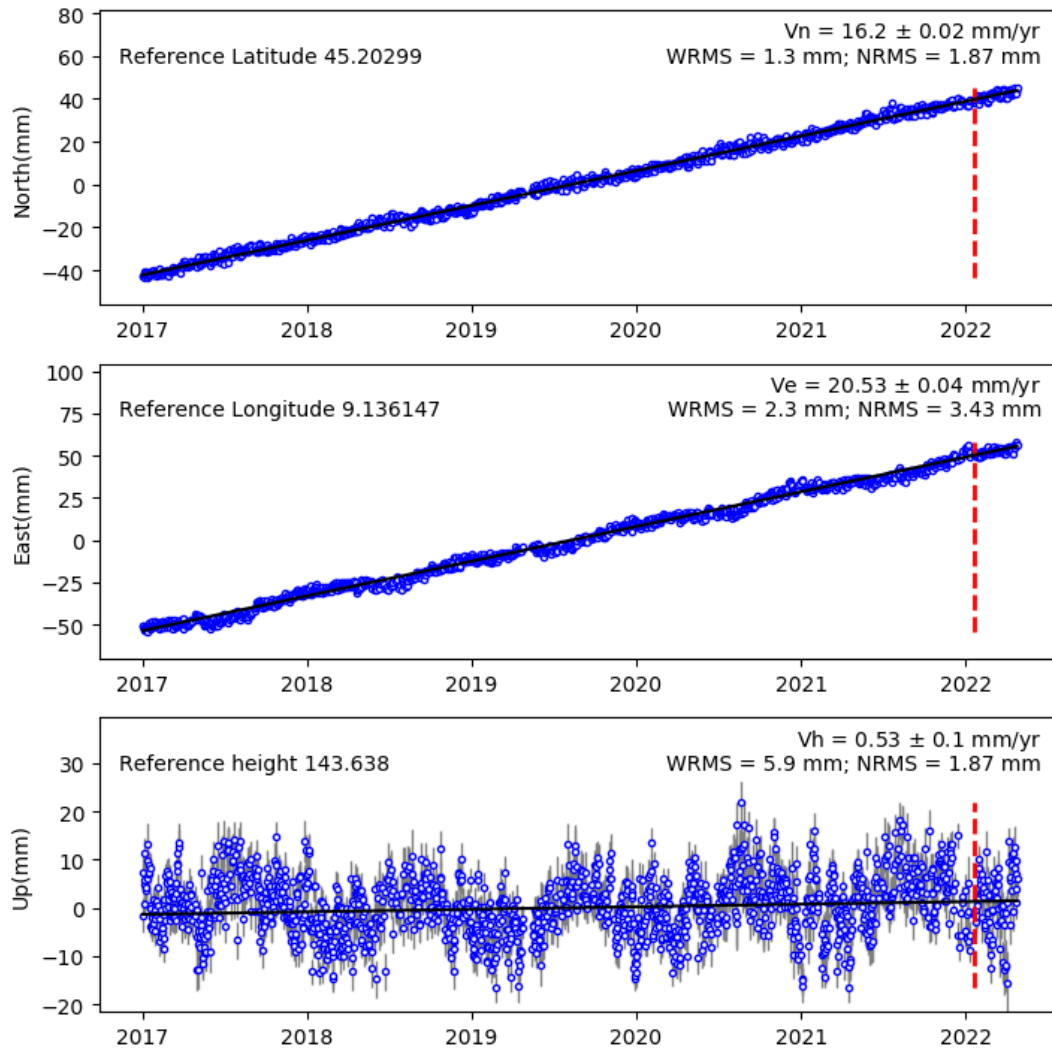


## MIL2



**Figura C.5** – Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ITRF08. 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



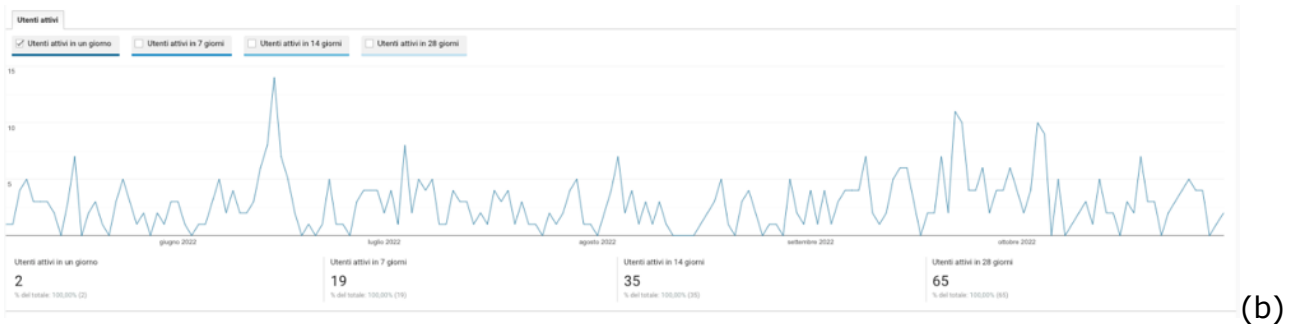
**Figura C.6** – Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF08. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

## 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. Nel periodo 01/5/2022-31/10/2022 sono state aperte circa 1300 sessioni sul sito web, come riportato in Figura D.1. Il picco visibile nella serie temporale del numero di utenti corrisponde a 636 utenti alla data del 6 maggio 2022. In Figura D.1 (b) è riportata la stessa serie temporale a partire dal 7 maggio 2022 in cui si evidenzia con più chiarezza l'andamento degli accessi al sito web; si può notare come gli accessi non siano particolarmente numerosi ma comunque regolari. Come si può notare nella Figura D.2 gli utenti accedono al sito web soprattutto dall'Italia (30,4%) ma è comunque presente una notevole componente di utenti stranieri. Gli accessi al sito vengono effettuati principalmente da computer (v. Figura D.3). Infine, dalla Figura D.4 si può notare come le pagine di maggiore interesse per gli utenti che accedono al sito sono quelle relative al monitoraggio geodetico e alla deformazione superficiale.

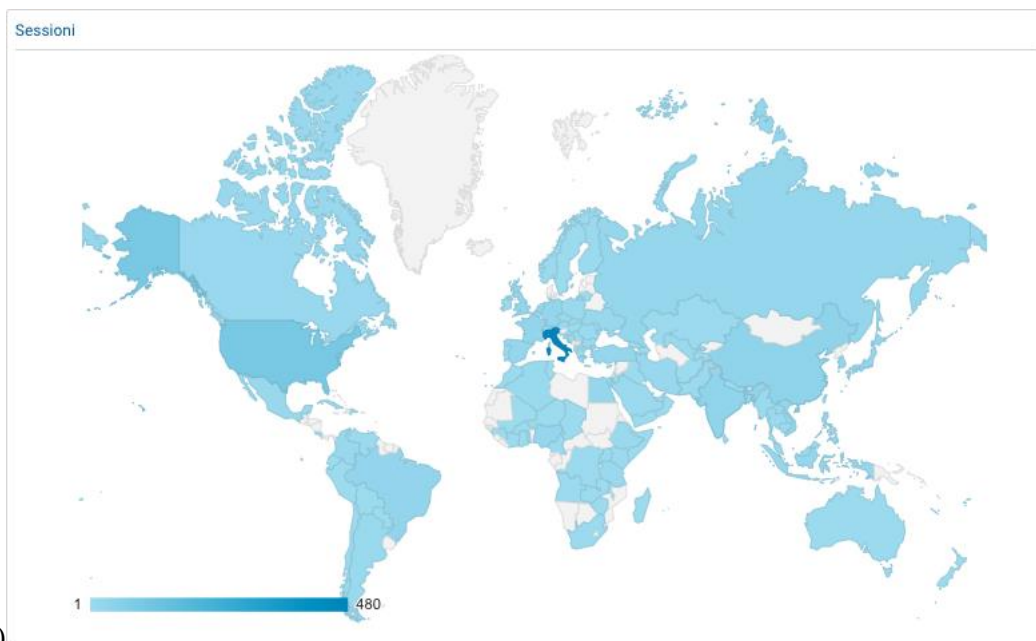


(a)



(b)

**Figura D.1** – (a) Rendiconto delle visite effettuate sul sito web nel periodo 1/5/2022-31/10/2022 e del numero di utenti. Il picco visibile nella serie temporale del numero di utenti corrisponde a 636 utenti alla data del 6 maggio 2022. (b) Stessa serie temporale di (a) senza il picco del 6 maggio 2022.



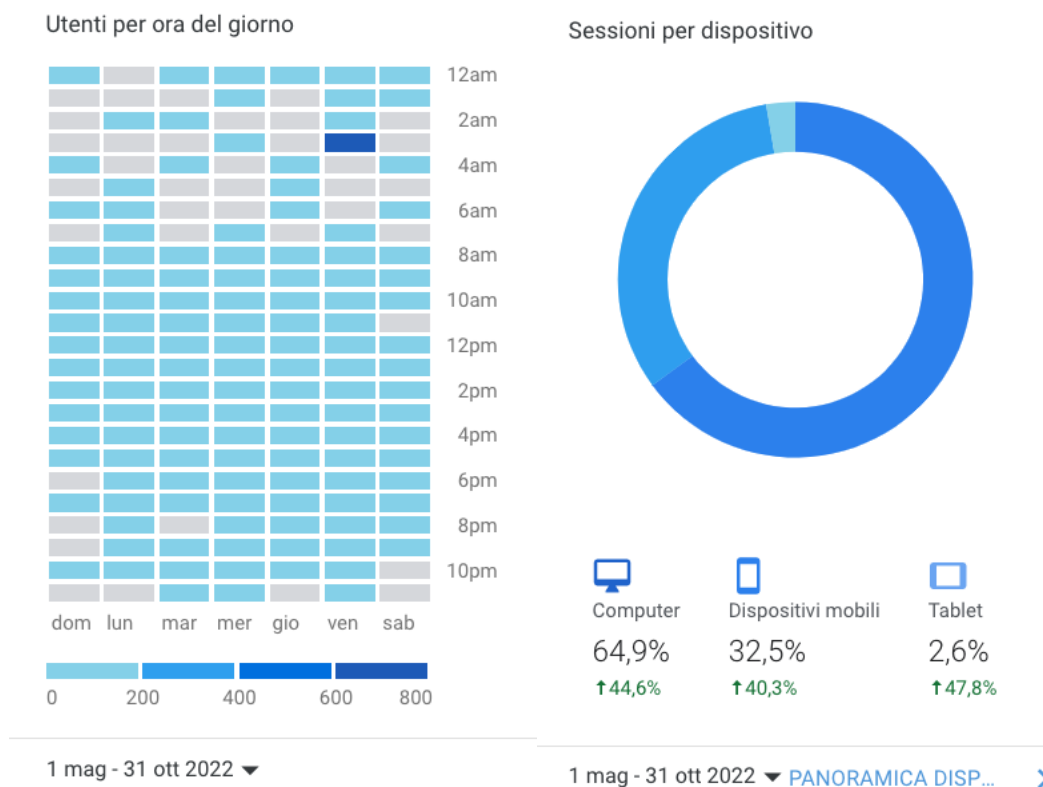
(a)

Sessioni e % nuove sessioni per Paese

Paese	Sessioni	% nuove sessioni
Italy	480	60,21%
United States	97	69,07%
China	35	68,57%
India	33	72,73%
Brazil	28	71,43%
France	28	67,86%
United Kingdom	27	59,26%
Japan	25	80,00%
Vietnam	25	72,00%
Germany	23	69,57%

(b)

**Figura D.2** – (a) Distribuzione del numero di visite effettuate sul sito web nel periodo 1/5/2022-31/10/2022 in funzione del paese di accesso; (b) Lista dei dieci paesi con il numero più alto di accessi al sito nel periodo esaminato.



**Figura D.3** – (sinistra) Distribuzione del numero di utenti in funzione delle ore del giorno nel periodo 1/5/2022-31/10/2022; (destra) percentuale di sessioni in funzione del tipo di dispositivo.



Figura D.4 – Rendiconto delle pagine di maggiore interesse del sito web nel periodo 1/5/2022-31/10/2022.