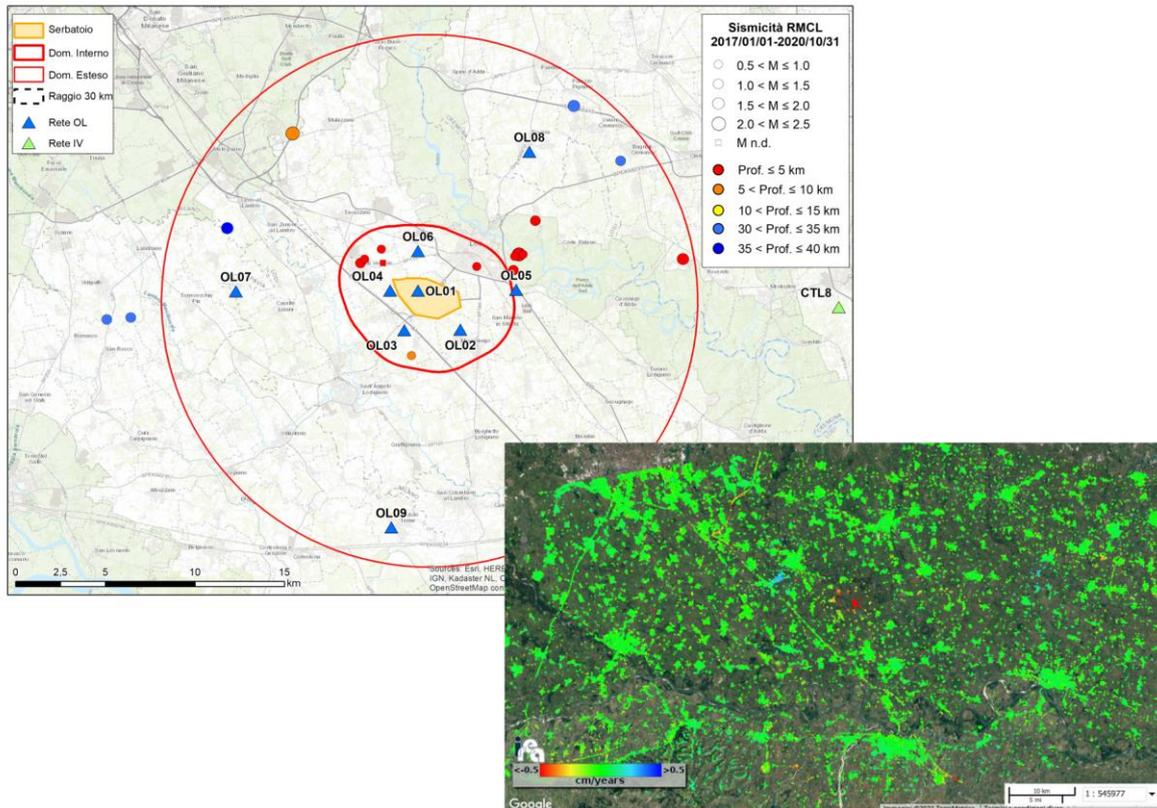


CONCESSIONE DI STOCCAGGIO DI GAS NATURALE "CORNEGLIANO STOCCAGGIO"



MONITORAGGIO SISMICO E DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

Anno di esercizio 2020 – Seconda relazione annuale
2020.2

Struttura Preposta al Monitoraggio:

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

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

A cura di:

Enrico Priolo¹, Riccardo Lanari², Manuela Bonano², Claudio De Luca², Marco Garbin¹, Mariangela Guidarelli¹, Laura Peruzza¹, Andrea Magrin¹, Marco Romanelli¹, Maria Adelaide Romano¹, Denis Sandron¹, Lavinia Tunini¹, Giovanni Zeni², Ivana Zinno², David Zuliani¹

¹OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale
Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)

²IREA-CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Coordinatore della Struttura Preposta al Monitoraggio e responsabile scientifico
per l'OGS: *Dott. Enrico Priolo*

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

Visto e approvato: Per l'OGS
il Direttore della Sezione Scientifica CRS
Prof. Stefano Parolai

Per l'IREA-CNR
il Direttore dell'IREA-CNR
Dott. Ing. Riccardo Lanari

Recapiti

OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica
Sperimentale
Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)
Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico (Trieste)

Dott. Enrico Priolo
Tel.: 040 2140351; Cell.: 320 4324734
e-mail: epriolo@inogs.it skype: epriolo

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

Sommario	1
1. Monitoraggio sismico	3
1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)	4
1.2 Operatività della rete sismica	10
1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio	11
2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali	17
2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01	18
2.1.1 Dati elaborati	19
2.1.2 Risultati ottenuti	20
2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2020 (dati SENTINEL-1).....	29
2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2020)	31
2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2020)	36
2.2.3 Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale	40
2.2.4 Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense.	45
3. Conclusioni	47
Bibliografia	49
Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL.....	51
Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione....	55
Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08	57
Appendice D – Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense.....	63

Elenco delle abbreviazioni

- AE Area Esterna di rilevazione della rete di monitoraggio
- BSI Bollettino Sismico Italiano
- CPTI15 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Rovida et al., 2016)
- CSI1.1 Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006)
- DBMI15 Database Macrosismico Italiano (Locati et al., 2016)
- 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 (Basili et al., 2018; DISS Working Group, 2018)
- 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 di 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. 5
- Figura 2** - Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana si riconoscono le stazioni di INGV 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 e dalla 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. 8
- Figura 3** - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-31/10/2020, a distanza ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (pannello 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; la freccia rossa indica l'evento ML1.7 del 28/10/2020. 12
- Figura 4** - Forme d'onda registrate per l'evento ML1.7 del 28/10/2020 ore 09:28:29 avvenuto nell'Area Esterna. 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, OL04, OL02, OL03 e OL09. 14
- Figura 5** - Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in metri cubi standard all'ora) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in entrata e uscita. (c) Volume complessivo del gas contenuto nel serbatoio naturale durante le attività dell'impianto, normalizzato al valore di volume massimo. i valori assoluti del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato commerciale sensibile e riservato. Continua alla pagina successiva. 15
- Figura 6** - La rete utilizzata per l'inquadramento della stazione GNSS OL01. Essa comprende le stazioni GNSS MILA (Milano), PAVI (Pavia), CREM (Cremona) e CREA (Crema). 19
- Figura 7** - Serie temporale di OL01 secondo il sistema di riferimento EURA. Nel primo grafico in alto è presente lo spostamento nella direzione NORD della stazione OL01 durante il periodo di misura. 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 la retta interpolante la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, che è 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). Nei due grafici successivi sono riportate le stesse informazioni per gli spostamenti in direzione EST e in verticale. 23
- Figura 8** - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 24
- Figura 9** - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 25
- Figura 10** - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 26
- Figura 11** - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 27

- Figura 12** - Serie temporali NORTH, EAST, UP delle cinque stazioni considerate OL01 (punti blu), CREA (punti arancioni), CREM (punti magenta), MILA (punti verdi) e PAVI (punti rossi) al netto dei trend di velocità calcolati secondo il sistema di riferimento europeo EURA; le serie temporali sono state sovrapposte al file di identificare eventuali spostamenti locali. 28
- Figura 13** - 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. 29
- Figura 14** - 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. 32
- Figura 15** - 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 2020. La stellina bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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 16. 33
- Figura 16** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 14 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) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. 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 2020. 35
- Figura 17** - 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. 36
- 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 ascendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2020. La stellina bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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 19. 37
- 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) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. 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 2020. 39
- Figura 20** - 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 bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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). 41

Figura 21 - 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 bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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)..... 42

Figura 22 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 20 in corrispondenza del riquadro 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) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. I grafici riportano l'andamento temporale della componente verticale dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). 43

Figura 23 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 21 in corrispondenza del riquadro 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) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. I grafici riportano l'andamento temporale della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). 44

Figura 24 - *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) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.* 45

Indice delle Tabele

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).	4
Tabella 2 - Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.	6
Tabella 3 - Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale gestita dall'INGV e alla Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale gestita dall'OGS.	7
Tabella 4 - <i>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.</i>	10
Tabella 5 - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica.	10
Tabella 6 - <i>Coordinate ETRF2000(2008.0) delle stazioni PAVI, MILA, CREM e CREA utilizzate per la georeferenziazione del sito OL01.</i>	20
Tabella 7 - <i>Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. In grassetto e colore rosso le stime ottenute per la stazione OL01.</i>	22
Tabella 8 - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.	30
Tabella 9 - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati.	31

Sommario

Il presente documento descrive le attività effettuate nel periodo 1/5/2020-31/10/2020 per l'esercizio del monitoraggio integrato svolto dall'OGS e dall'IREA-CNR presso la concessione di stoccaggio gas naturale denominata "Cornegliano Stoccaggio". Esso costituisce il primo rapporto previsto per l'anno di esercizio 2020, 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 1/1/2017-31/10/2020 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 prime elaborazioni svolte sui dati acquisiti. La seconda parte (Cap. 2.2) descrive l'analisi interferometrica delle deformazioni del suolo completa fino alla data del 31/10/2020.
- 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: i 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 nove stazioni sismometriche e da una stazione geodetica GNSS permanente. Le stazioni sono indicate con la sigla OL01-OL09, 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 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.

Tutte le stazioni 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 di 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
OL01	45.291	9.464	72	Cornegliano Laudense (Cluster A)
OL02	45.266	9.485	71	Massalengo
OL03	45.266	9.453	70	Cascina Castagna
OL04	45.290	9.435	78	Cascina Taietta
OL05	45.293	9.526	75	Cascina Cavrigo
OL06	45.309	9.464	77	Cascina Bracca
OL07	45.291	9.325	77	Gugnano
OL08	45.362	9.539	75	Dovera
OL09	45.170	9.438	70	Miradolo

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).

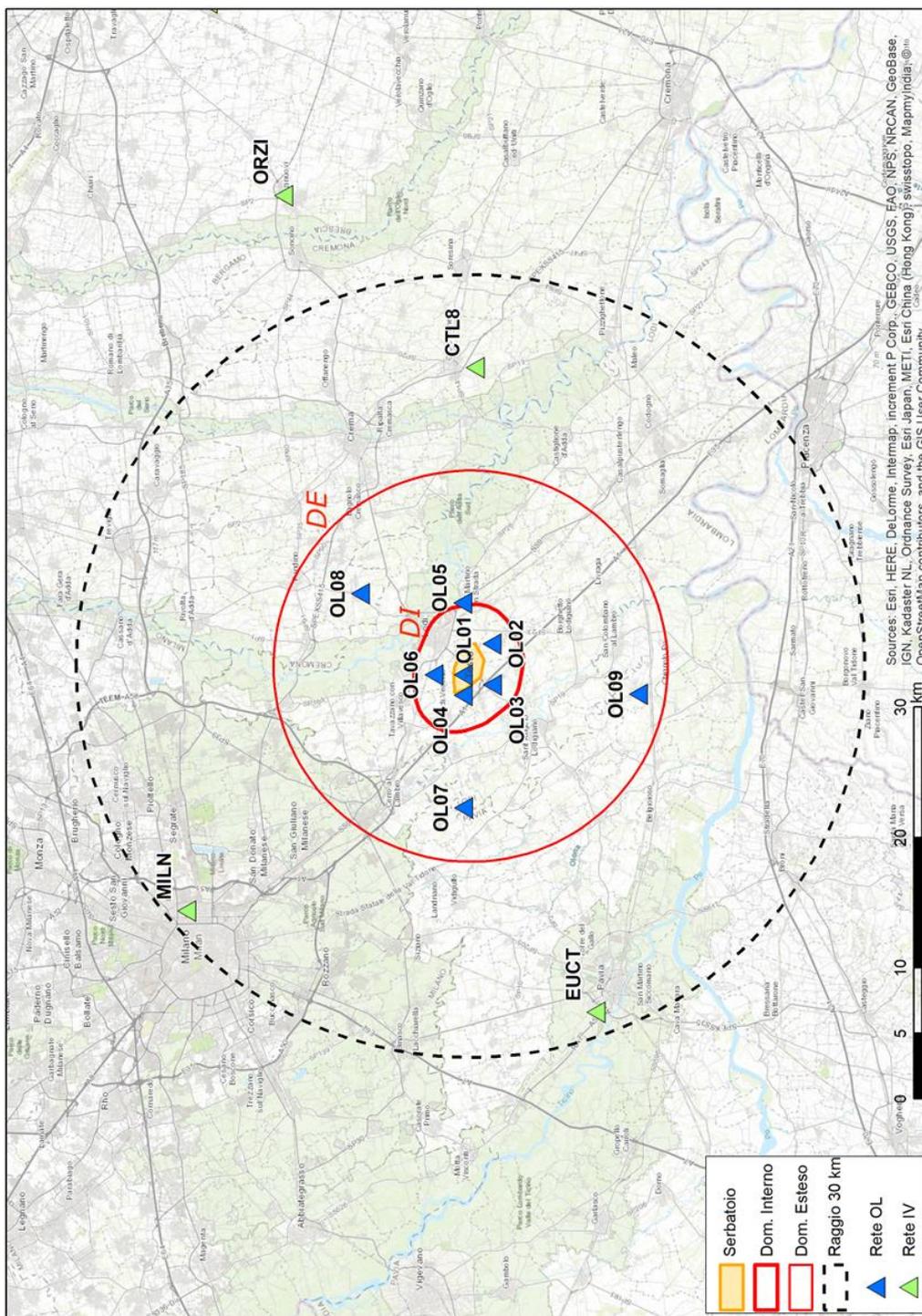


Figura 1 - Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee 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>Acquisitore: Guralp-Minimus Caratteristiche: 6 canali, 24 bit</p>		<p>Accelerometro: Guralp-Fortis Componenti: 3 Fondo scala: ± 2.0 g Banda: DC-200 Hz</p>	
<p>Sismometro da pozzo: Guralp-Radian 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 acquisiti vengono archiviati in tempo reale in formato *mseed* su un sistema di archiviazione di rete (NAS di marca QNAP) con capacità complessiva di circa 20 TB che è montato direttamente come *file system* dai sistemi di acquisizione ed elaborazione. La rete RMCL accumula approssimativamente 1.2 GB di dati al giorno, quindi circa 0.5 TB all'anno. Tutte le informazioni relative ai siti e alla strumentazione installata sono anche caricate nel database che gestisce i dati sismologici strumentali dell'OGS, denominato OASIS (oasis.crs.inogs.it) 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](#)). 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 Domino 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.

**OGS**Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale

Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

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
CTL8	Castelleone (CR)	45.2763	9.7622	60	IV
EUCT	Pavia	46.1516	12.3630	598	IV
MARN	Marana (VI)	45.6378	11.2099	785	OX
MDI	Monte di Nese (BG)	45.7697	9.716	954	IV
MILN	Milano	45.4803	9.2321	125	IV
ORZI	Orzinuovi (BS)	45.4056	9.9307	83	IV
PRMA	Parma	44.7637	10.3131	78	IV
QUIN	Quinzano D'Oglio (BS)	45.2982	10.0337	121	OX
SARZ	Sarezzano (AL)	44.8673	8.9136	266	IV
VARA	Monte Varagna (TN)	45.8260	10.8965	1735	OX

Tabella 3 - Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale gestita dall'INGV 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*[®] 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.

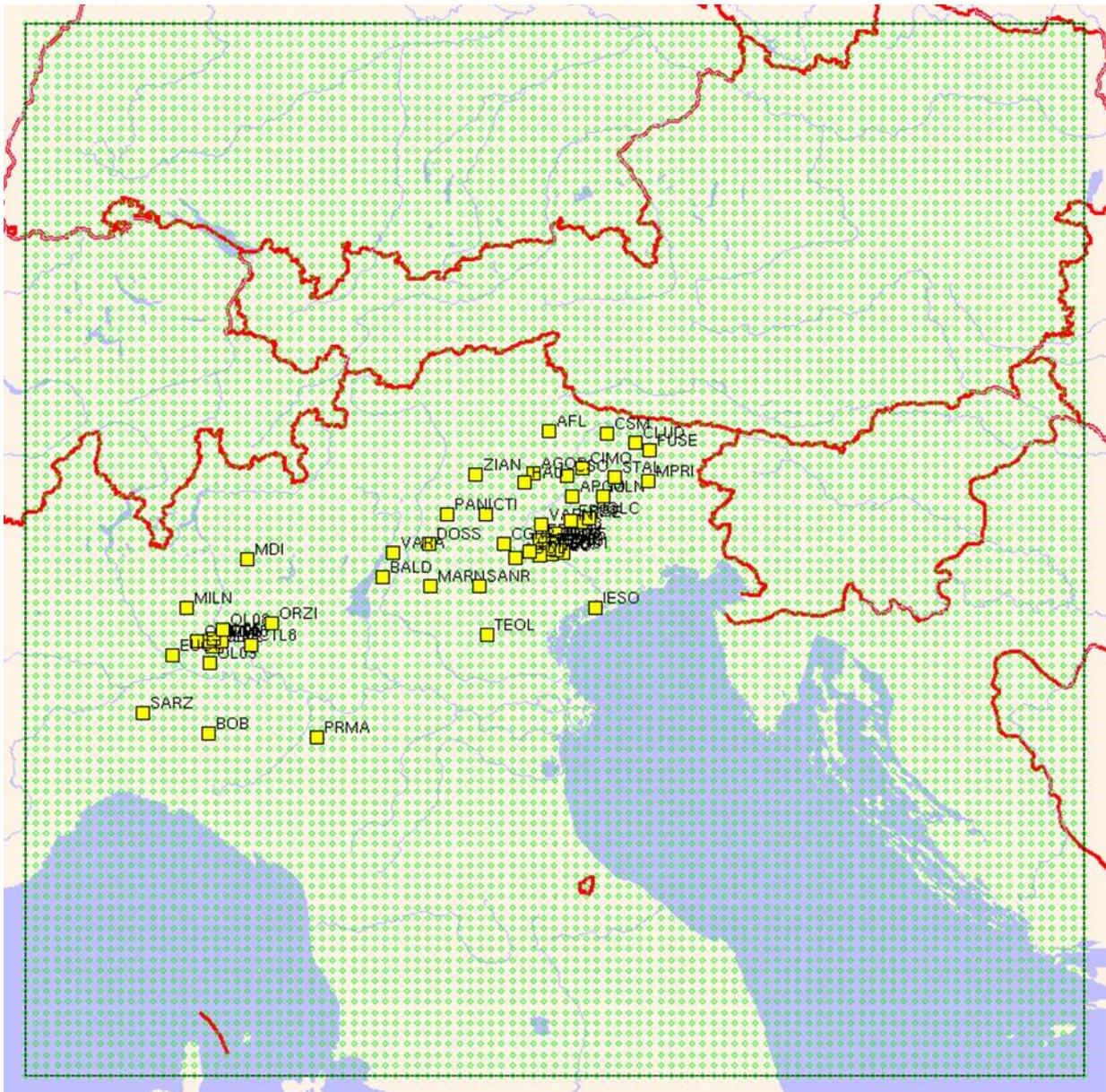


Figura 2 - Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana si riconoscono le stazioni di INGV più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite dall'OGS nel periodo di tempo considerato, anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia e dalla 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 ad una soglia prestabilita, esegue le procedure di notifica (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 alquanto 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 di capacità di rilevazione della rete. 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 del 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 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.

	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 (1/05/2020-31/10/2020) 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, eccetto che per alcune stazioni in alcuni periodi limitati. La disponibilità dei dati acquisiti mese per mese, nel periodo considerato, è riassunta dalle tabelle riportate in Appendice A.

Per quanto riguarda l'esercizio delle stazioni, oltre all'ordinaria manutenzione operata da remoto, è stato effettuato un intervento in loco per la sostituzione e integrazione di alcune componenti delle stazioni, come indicato in [Tabella 5](#).

Data	Stazione	Intervento
23/07/2020	OL01	sostituzione scheda SIM danneggiata con SIM nuova
23/07/2020	OL07	installazione velocimetro Radian (#TR4016) a -1.5m, e installazione di un secondo Minimus (#665A), collegato al Radian (#T39) posto a fondo pozzo

Tabella 5 - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica.

1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio

Nel periodo 1/5/2020-31/10/2020 la RMCL ha rilevato un solo evento sismico nei domini di rilevazione, individuato anche dalla Rete Sismometrica dell'Italia Nord-Occidentale dell'Università di Genova.

L'evento è stato localizzato nell'Area Esterna: si è trattato di un evento molto debole (ML 1.7) avvenuto il 28/10/2020 ad una profondità di circa 13 km. Nella [Figura 3](#) riportiamo per completezza, la mappa con gli eventi sismici rilevati nei precedenti periodi di rendicontazione, sottolineando ancora come le attività di stoccaggio non abbiano fino ad ora dato origine ad attività sismica rilevabile dalla rete RMCL. La lista di tutti gli eventi rilevati a partire dal 1/11/2017 è riportata nella Appendice B.

La [Figura 4](#) mostra, a titolo di esempio, i sismogrammi registrati dalla rete per l'evento ML1.7 del 28/10/2020 ore 09:28:29 avvenuto nell'Area Esterna. La distanza epicentrale delle stazioni visualizzate è compresa tra 16 e 31 km.

La [Figura 5](#) mostra i dati medi dell'attività di stoccaggio del gas con un campionamento orario. I due grafici rappresentano la pressione media (unità in bar) misurata al collettore dei pozzi e la portata (unità in metri cubi standard all'ora) durante le attività dell'impianto. I grafici sono aggiornati quotidianamente. I dati sono forniti da Ital Gas Storage. Nel cluster A sono attivi 6 pozzi, nel cluster B sono stati attivi 4 pozzi fino al 31/3/2020 poi a partire dal 1/4/2020 sono attivi 6 pozzi. Dai grafici si può notare come nel periodo di avvio dello stoccaggio ci sia stata una sequenza alternata di fasi di iniezione e fasi di fermo delle attività che ha l'effetto di ridurre l'accumulo locale di stress. La Figura 5 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.

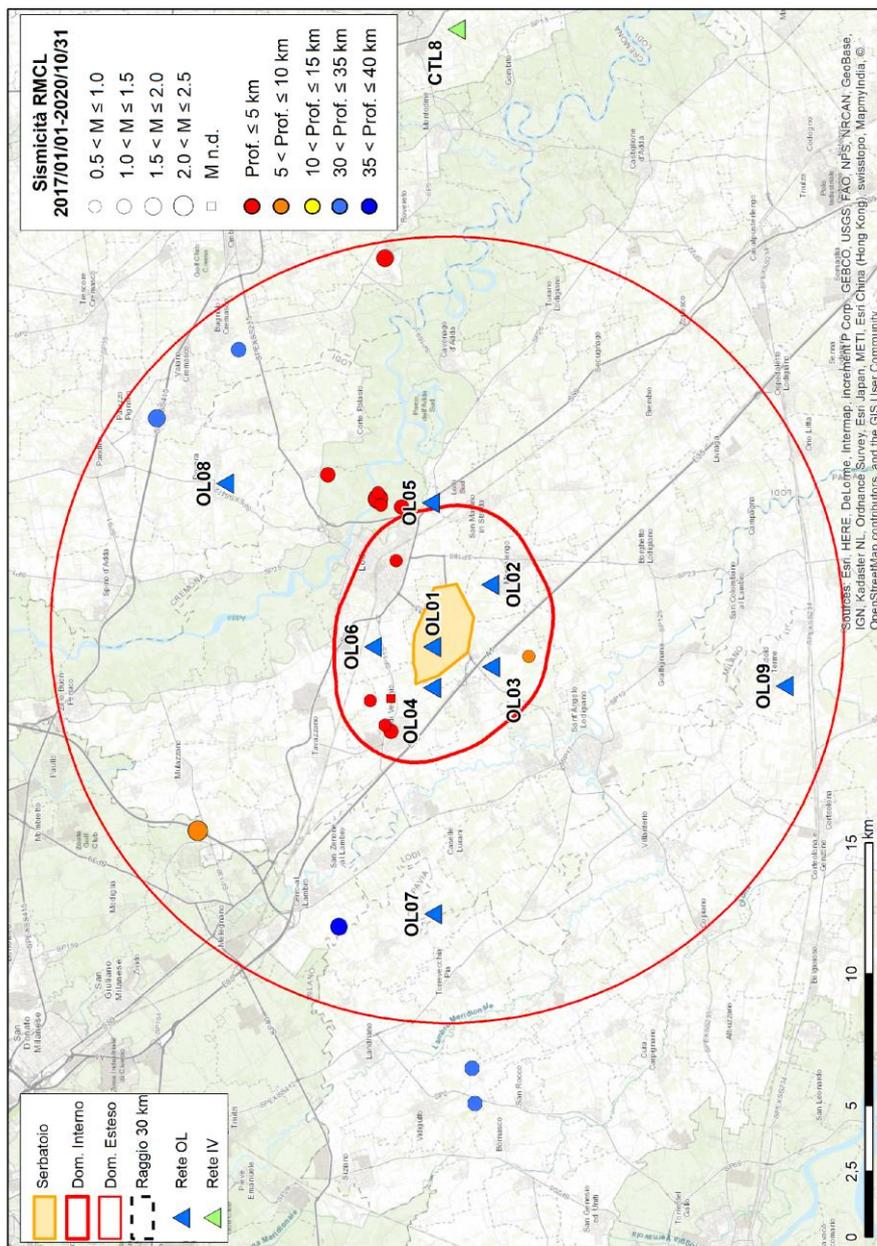


Figura 3 – continua dalla pagina precedente.

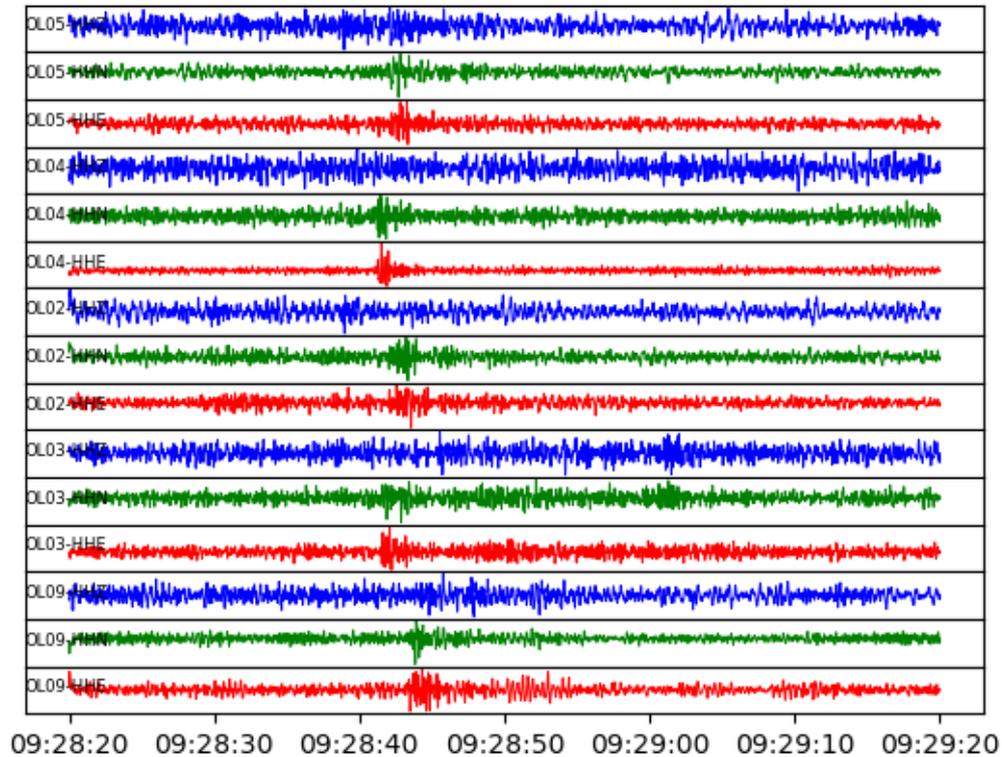


Figura 4 - Forme d'onda registrate per l'evento ML1.7 del 28/10/2020 ore 09:28:29 avvenuto nell'Area Esterna. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL05, OL04, OL02, OL03 e OL09.

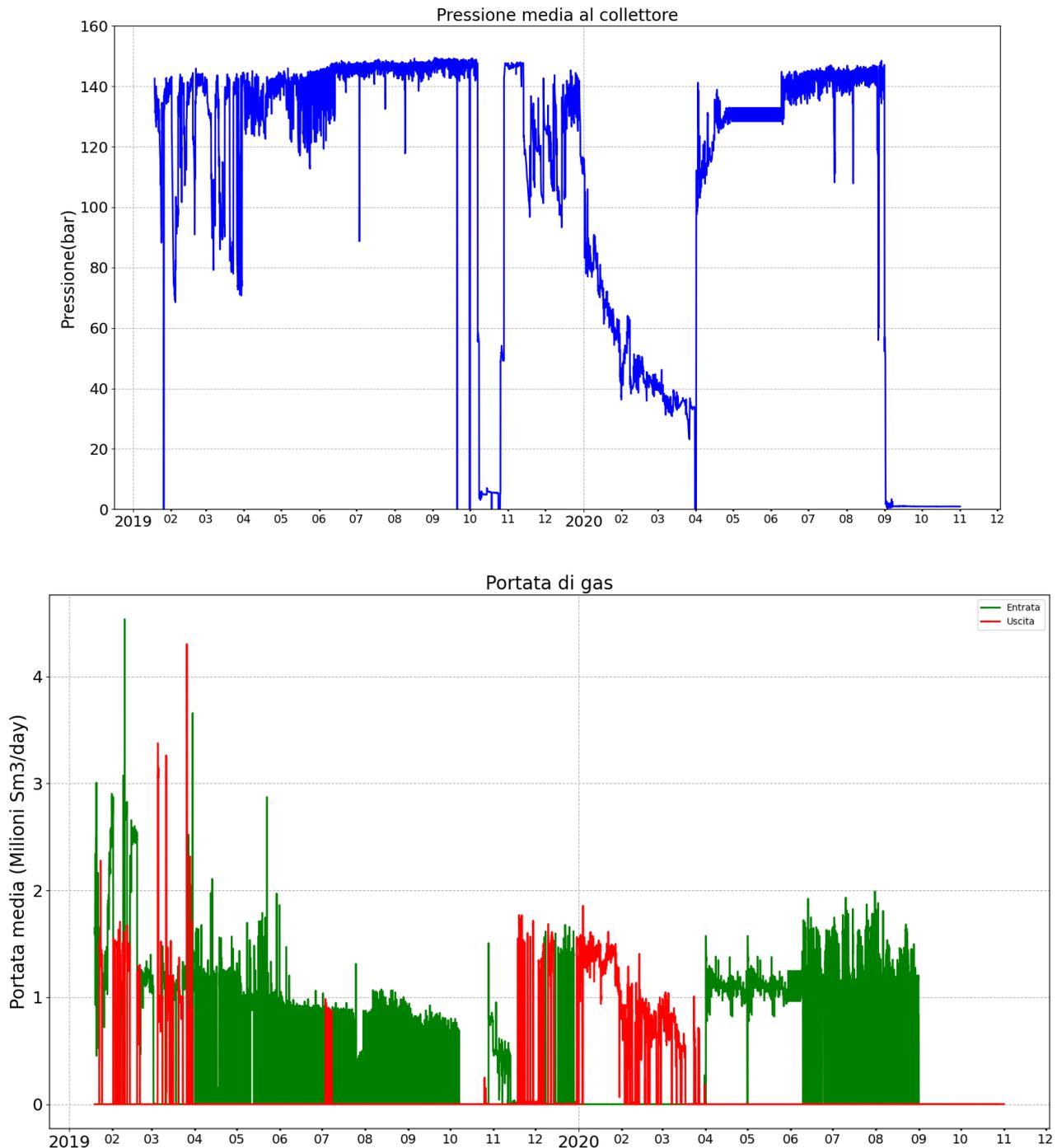


Figura 5 - Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in metri cubi standard all'ora) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in entrata e uscita. (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.

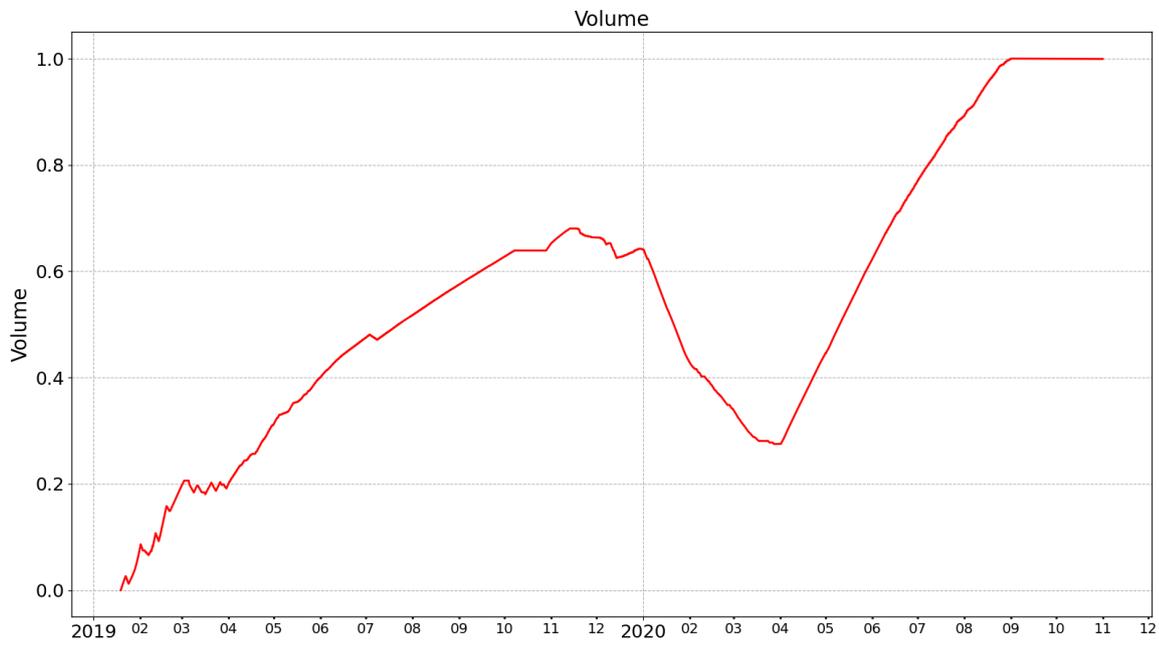


Figura 5 – Continua dalla pagina precedente.

2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali

2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01

La stazione OL01, ubicata vicino al 'Cluster A' dell'impianto di Cornegliano Laudense, ospita sia la stazione sismometrica sia la stazione GNSS (Global Navigation Satellite System). La stazione GNSS è operativa da fine ottobre 2016 ed è in grado di ricevere i segnali dei seguenti sistemi satellitari di navigazione: GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, SBAS e BeiDou.

I dati (file RINEX, Receiver Independent Exchange Format) della stazione GNSS OL01, sono stati elaborati al fine di ottenere delle stime giornaliere delle coordinate e conseguire le serie temporali secondo due sistemi di riferimento: il sistema internazionale ITRF08 (International Terrestrial Reference Frame 2008, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/) e quello europeo EURA (Altamimi et al., 2012).

La stazione OL01 è stata inquadrata rispetto:

- al sistema di riferimento globale ITRF08 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.
- al sistema di riferimento europeo EURA 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.

Ai segnali della stazione OL01 è stata applicata l'elaborazione standard del software GAMIT/GLOBK; di seguito sono riportate le configurazioni principali di GAMIT/GLOBK utilizzate per la stima delle serie temporali come già evidenziato al paragrafo 2.1.1 della precedente relazione (Priolo et al., 2020). Si segnala che, 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. I dati e le elaborazioni delle stazioni utilizzate per l'inquadramento sono disponibili fino alla data del 31/10/2020.

2.1.1 Dati elaborati

Il *dataset* della stazione OL01, registrato in file di formato RINEX, è disponibile in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane). Si ricorda che, per consentire una riduzione dell'errore sulla componente verticale, è necessario inserire nel calcolo modelli atmosferici (Tregoning et al., 2005) prodotti dal MIT (Massachusetts Institute of Technology) e disponibili con un ritardo compreso tra le due e le tre settimane (<ftp://everest.mit.edu>). A causa di questo vincolo si è potuto procedere all'elaborazione dei dati acquisiti sino al 31/10/2020. I file RINEX di OL01 registrati fino al 31/10/2020 sono 1072, così come le giornate elaborate. Dalle serie temporali si nota la mancanza di dati sia all'inizio dell'anno 2017 dovuta a problemi riconducibili all'alimentazione del ricevitore GNSS, ma successivamente risolti, che la mancanza di intervalli di dati tra il 01/06/2019 e il 10/01/2020, dovuti a un difetto nel sistema di sincronizzazione tra i server di scarico dei file RINEX e quello di backup. È da notare che tali lacune nei dati non hanno inficiato i risultati ottenuti. L'elaborazione dei dati ha infatti prodotto, per OL01, 1061 soluzioni pari all'utilizzo del 98,97% 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 un gruppo di stazioni permanenti che abbiamo denominato Rete GNSS LODI ([Figura 6](#)) utilizzando le seguenti 4 stazioni appartenenti al Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia (Rete SPIN):

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



Figura 6 - Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadratura di OL01. Queste stazioni sono MILA (Milano), PAVI (Pavia), CREM (Cremona) e CREA (Crema).

Queste stazioni sono a loro volta inquadrare 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 7. 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/>). La stazione MILA, i cui dati sono stati elaborati fino al 08/02/2019, è qui riportata solo per completezza. La stazione è stata dismessa e sostituita da MIL2 (con coordinate 45° 28' 42.145091" N, 09° 13' 45.193712" E, Quota: 191.119 m e disponibile nelle elaborazioni dal 06/03/2019) ed è in fase di valutazione l'utilizzo di tale stazione per l'analisi dei dati. Si ritiene importante valutare la serie temporale di MIL2 per almeno 2.5 anni dalla data del primo dato disponibile come suggerito in Blewitt and Lavallée, 2002.

SITE CODE	LOCALITA'	RICEVITORE	ANTENNA	LAT LON	QUOTA [m]
PAVI	Pavia	TPS NET-G5 (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°12'10,73212"N 9°08'10,10393"E	143,636
MILA	Milano	TPS NET-G3 (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°28'47,94818"N 9°13'45,62699"E	187,275
CREM	Cremona	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°08'47,92729"N 10°00'07,02572"E	102,736
CREA	Crema	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°21'15,59235"N 9°41'07,09675"E	129,818
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) delle stazioni PAVI, MILA, CREM e CREA utilizzate per la georeferenziazione del sito OL01.

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 1/1/2017 - 31/10/2020.

Le serie temporali sono disponibili in due sistemi di riferimento diversi: quello internazionale ITRF08 (le cui serie sono mostrate in Appendice B) e quello europeo EURA (le cui serie sono mostrate nelle Figure 7-11). 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; 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 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.

Per facilitare il confronto fra la stazione OL01 e gli altri siti elaborati, sono state costruite delle serie temporali contenenti solo i giorni che presentano dati della stazione OL01. Confrontando le serie delle stazioni della Rete GNSS LODI, si nota un andamento congruente tra i sistemi ITRF ed EURA. In particolare la stazione OL01 si comporta, in special modo sulla direzione UP, come le stazioni CREA, CREM, MILA e PAVI; questo fatto evidenzia il fatto che i dati e le misure effettuate presso la stazione OL01 siano rappresentative per una larga parte del territorio su cui la stazione è installata.

La Tabella 8 mostra le stime di velocità della deformazione per le 5 stazioni del frame di riferimento. Nel sistema di riferimento ITRF, dove ci attendiamo spostamenti molto più marcati, i valori sono simili per tutte le stazioni GNSS (dai 15.76 mm/anno ai 17.69 mm/anno sulla coordinata Nord e dai 19.31 mm/anno ai 20.70 mm/anno sulla coordinata Est).

Per il riferimento Euroasiatico (EURA) le stime di velocità della stazione OL01 devono essere considerate ancora preliminari per due principali motivi. Il primo è che la quantità di dati disponibili è esigua rispetto ai piccoli valori di velocità di deformazione stimati. Quindi è necessario disporre di un periodo di osservazione più lungo. Il secondo è che il sito è di nuova fattura e l'intervallo di tempo per cui sono disponibili i dati rientra nel periodo di stabilizzazione della monumentazione. Si può notare che la velocità nella direzione UP non subisce grosse variazioni nei due sistemi di riferimento ITRF ed EURA, e oscilla fra valori pari a -0.86 mm/anno (MILA) e 2.17 mm/anno (OL01). Una osservazione importante da fare è che in generale, rispetto alla precedente relazione, tenendo conto dei nuovi dati che arrivano fino al 31/10/2020, si nota che i valori della componente verticale della velocità sono nettamente minori e compresi tra -0.86 mm/anno (MILA) e 2.17 mm/anno (OL01). Nel precedente documento, infatti, questi valori erano compresi tra -5.7 mm/anno (MILA) e -6.09 mm/anno (CREA). Riteniamo che gli alti valori della componente verticale della velocità riportati nel documento precedente siano da imputarsi a problematiche nella stabilizzazione del sistema di riferimento, come emerso da diversi test effettuati negli ultimi mesi. I risultati di questi test e l'affinamento della tecnica di elaborazione dati, ci porta a sostenere che i risultati riportati nel presente documento sono da considerarsi più robusti dei precedenti.

I risultati ottenuti fino a qui relativi alle stazioni analizzate (Rete GNSS LODI) saranno di supporto per verificare la presenza di anomalie di carattere strettamente locale nei movimenti della stazione OL01.

	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]
OL01	17.69	19.31	2.23	1.83	-0.70	2.17
CREA	15.76	20.46	0.00	-0.08	0.42	-0.05
CREM	16.31	20.70	0.03	0.50	0.55	-0.03
MILA	16.28	20.03	-0.82	0.40	0.12	-0.86
PAVI	16.09	20.44	0.06	0.20	0.47	0.00

Tabella 7 - Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. In grassetto e colore rosso le stime ottenute per la stazione OL01.

Un ultimo confronto ([Figura 12](#)) è stato fatto comparando le cinque stazioni OL01, CREA, CREM, MILA e PAVI; in particolare sono state confrontate le serie temporali di velocità nelle diverse componenti togliendo da ciascuna il proprio trend precedentemente calcolato (rispetto al sistema di riferimento EURA). La [Figura 11](#) mostra, al netto di ciascuna velocità, le variazioni e gli spostamenti marcatamente locali.

Osservando il grafico si nota come per quanto riguarda gli spostamenti sia sul piano che in quota, tutti e cinque i siti si comportino allo stesso modo: l'andamento delle serie temporali risulta quasi sovrapponibile e non si evincono spostamenti locali significativi. Tutti i siti sono affetti da un segnale comune detto common-mode che include fenomeni su scala regionale (Kumar et al. 2020) e che potrebbe nascondere il sollevamento mostrato dall'InSAR. Sono in corso ulteriori analisi per rimuovere efficientemente il common-mode dal segnale GNSS e verificare se il dato residuo è compatibile con le misure ottenute dalle mappe satellitari.



OGS

Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

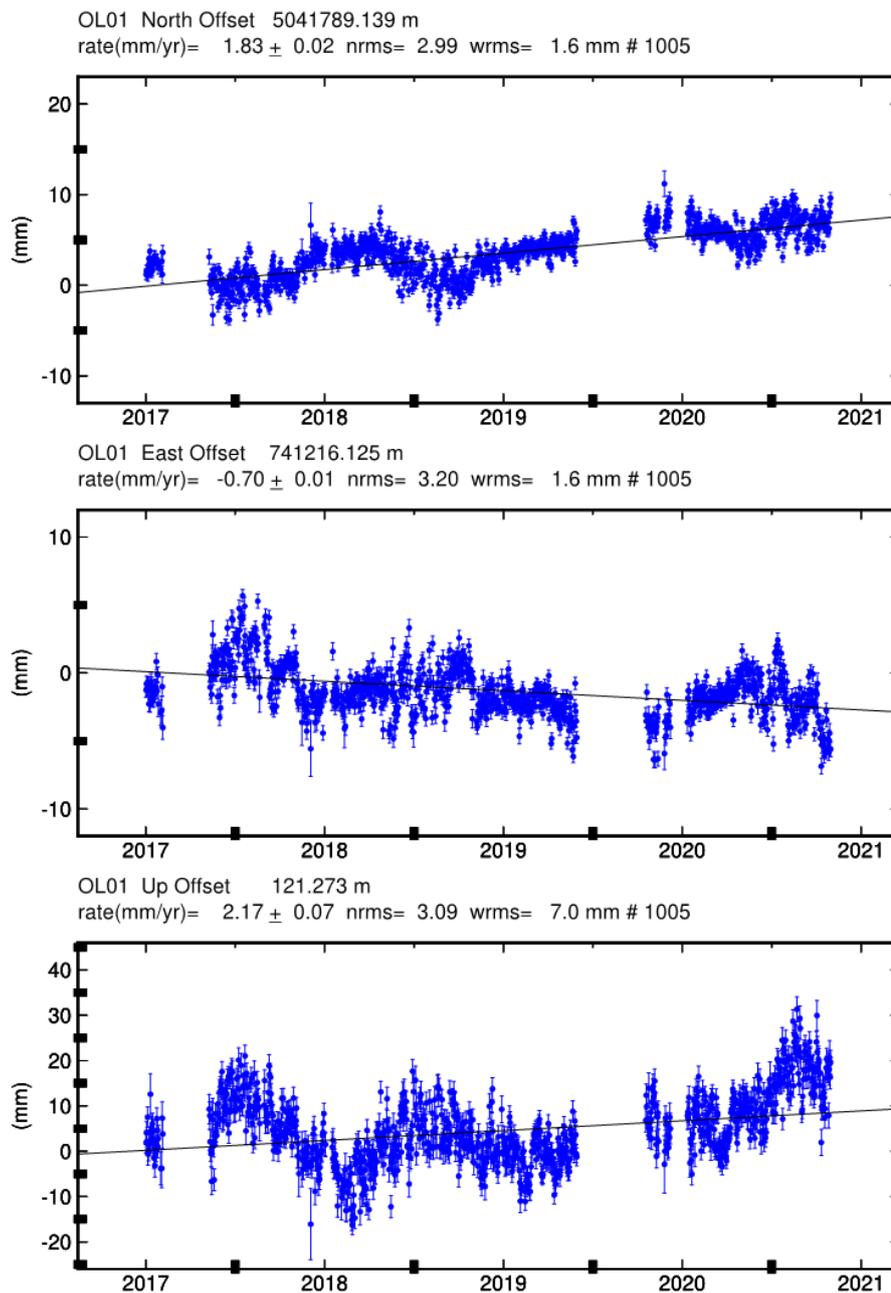


Figura 7 - Serie temporale di OL01 secondo il sistema di riferimento EURA. Nel primo grafico in alto è presente lo spostamento nella direzione NORD della stazione OL01 durante il periodo di misura. Ogni punto sul grafico è lo spostamento stimato giornaliero in mm. Ad ogni punto è sovrapposta la barra di errore che rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. Sul grafico è presente la retta interpolante la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, che è 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). Nei due grafici successivi sono riportate le stesse informazioni per gli spostamenti in direzione EST e in verticale.

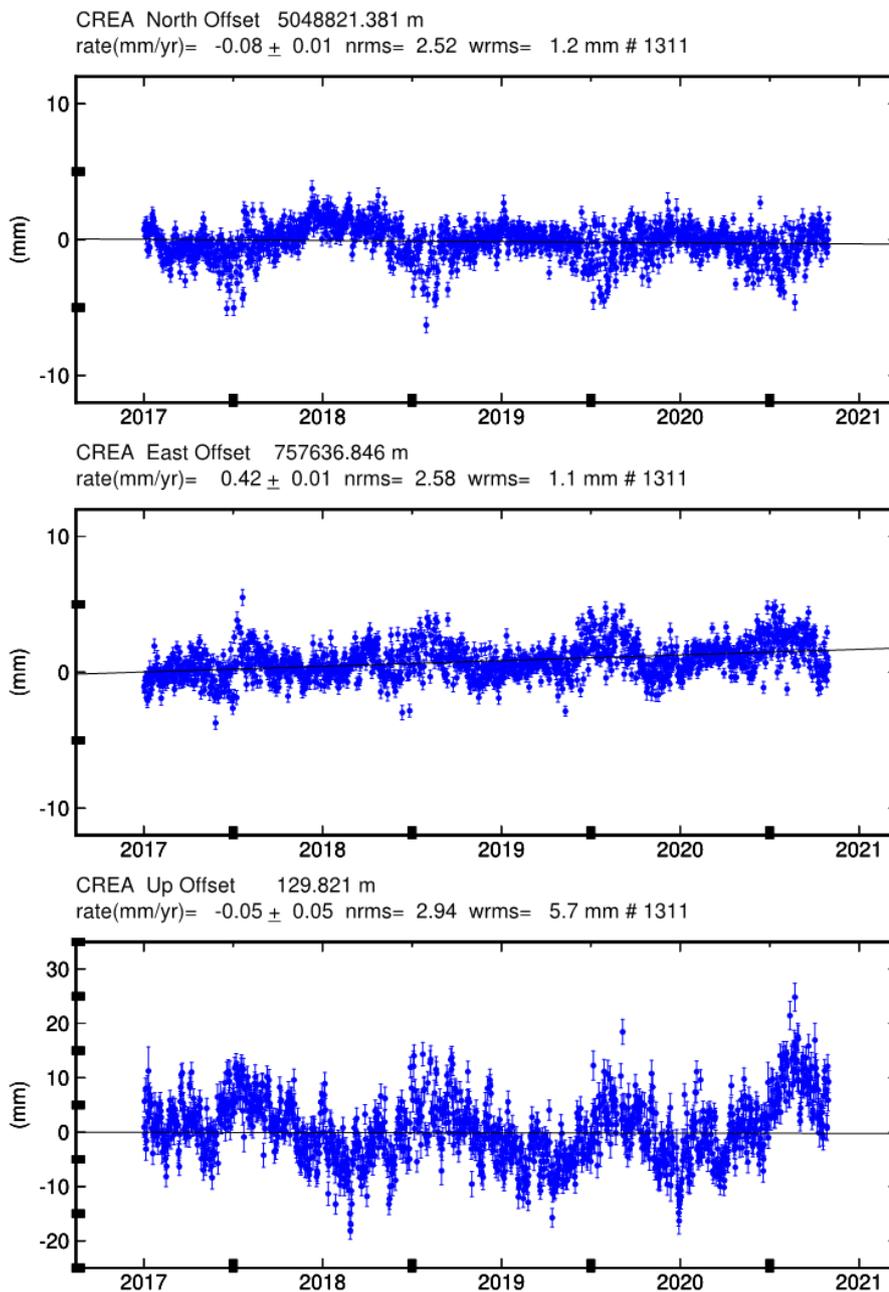


Figura 8 - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

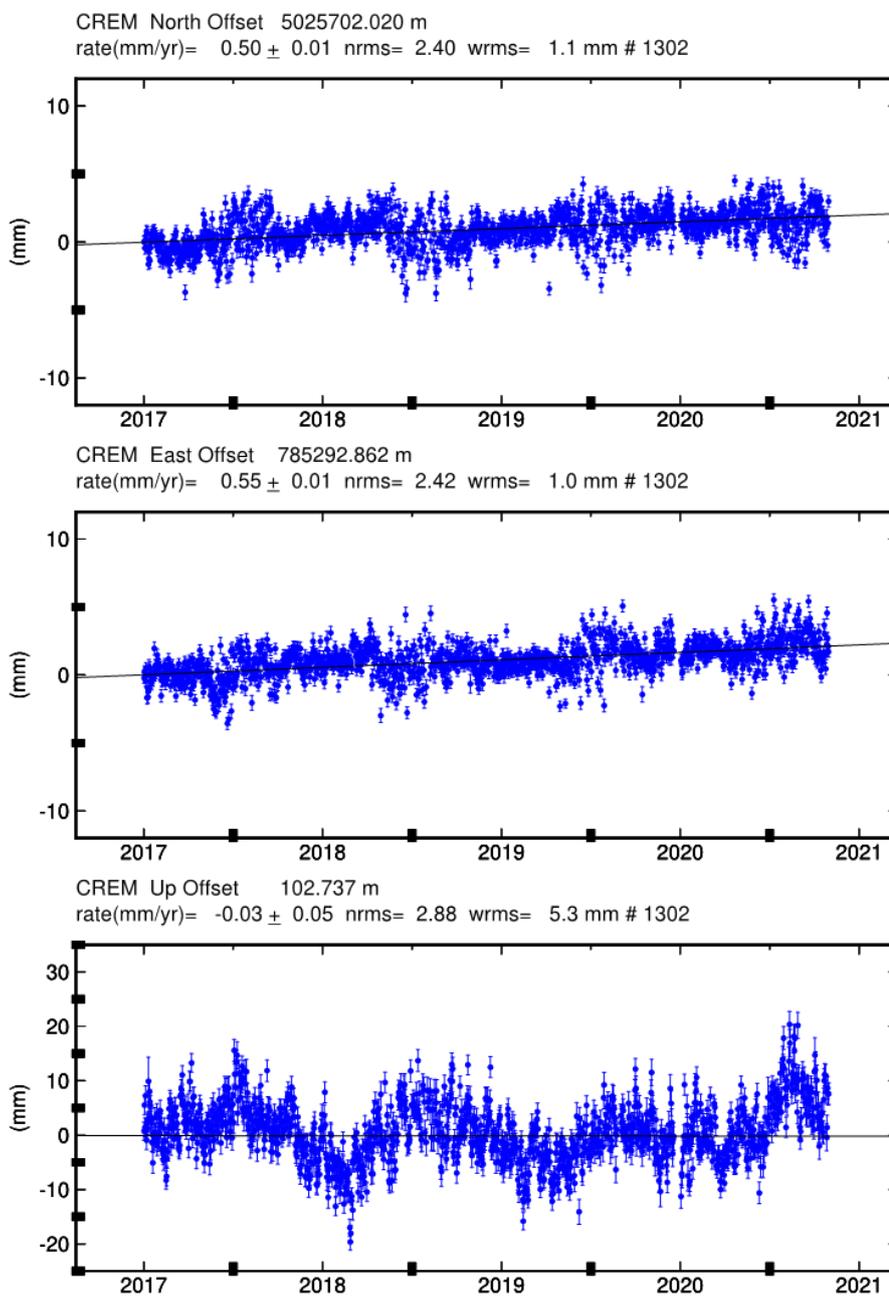


Figura 9 - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

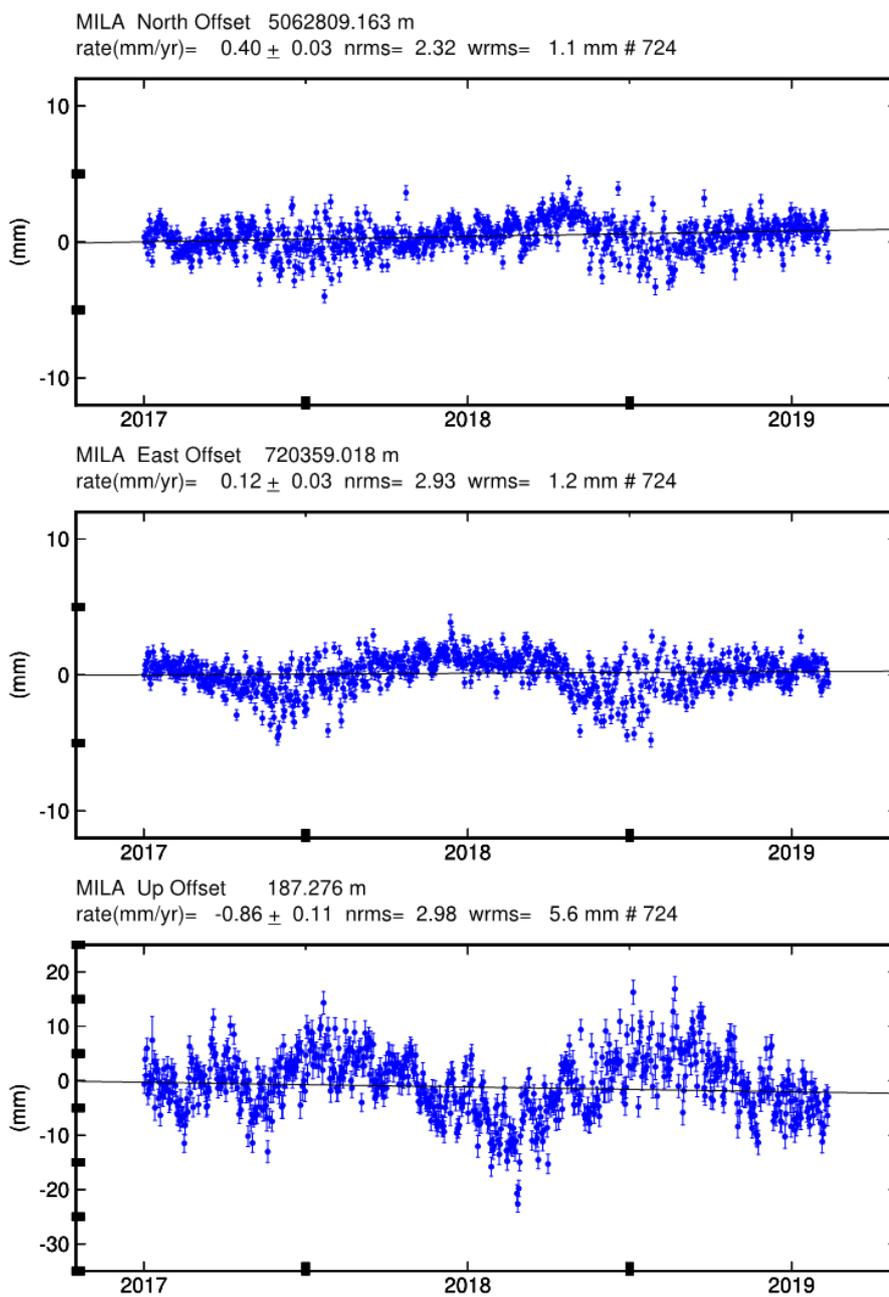


Figura 10 - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

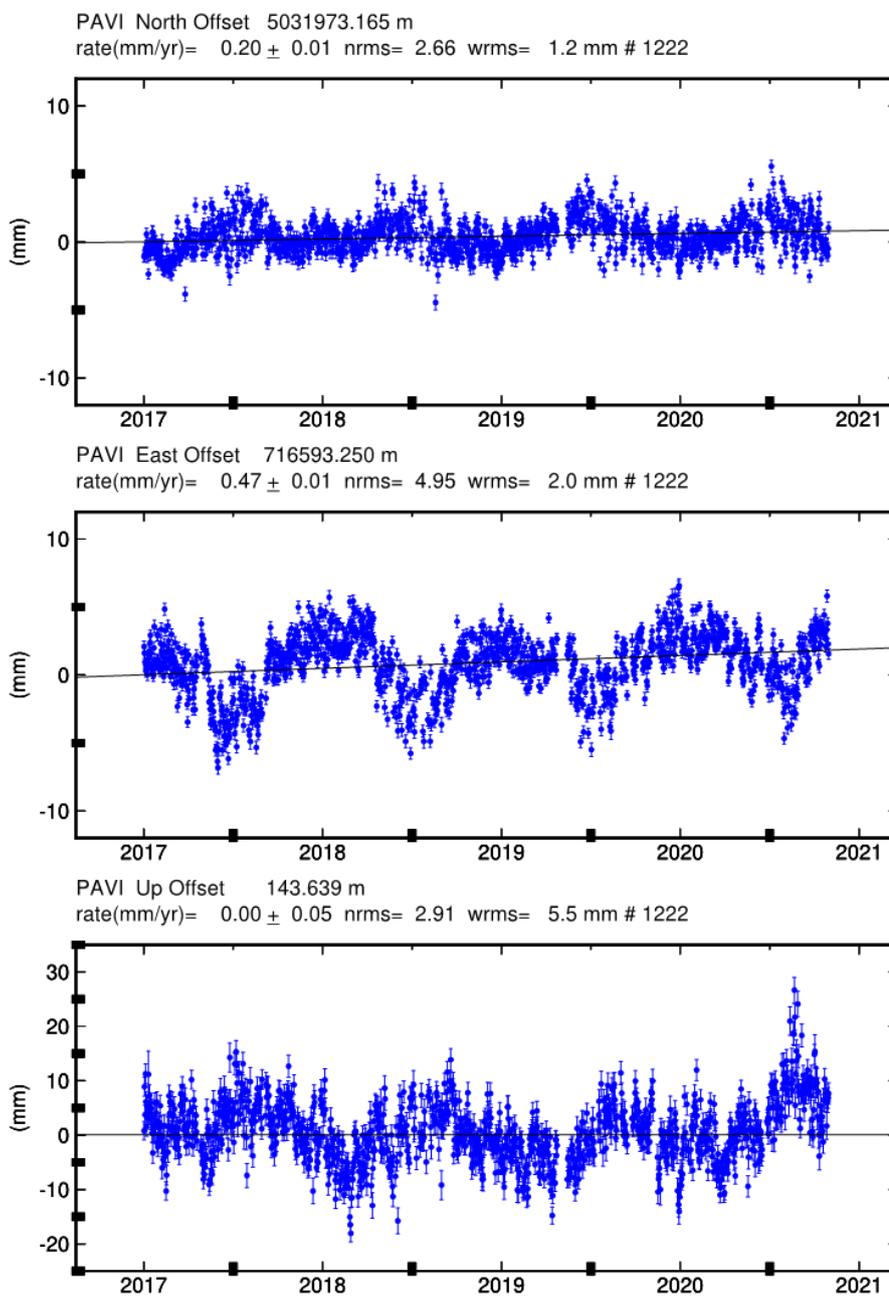


Figura 11 - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

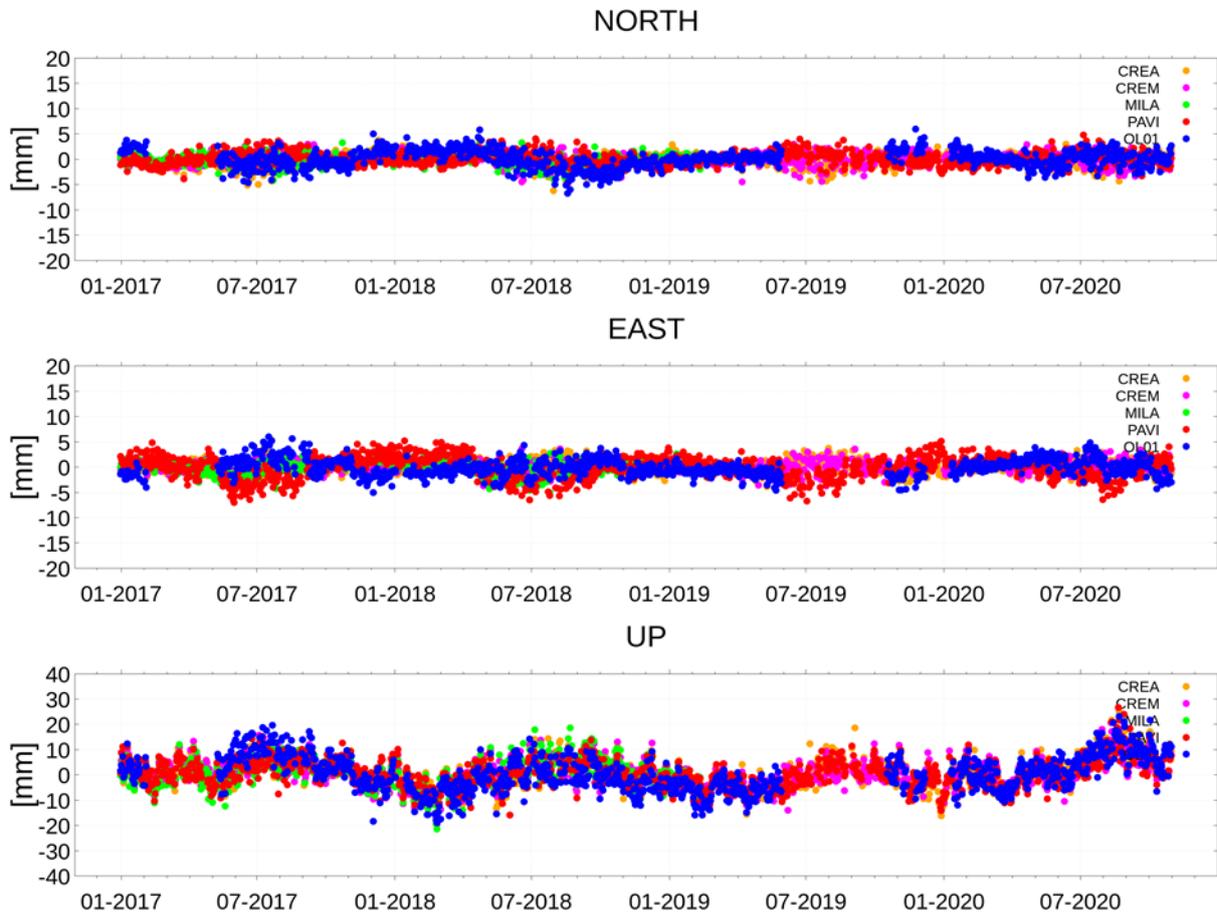


Figura 12 - Serie temporali NORTH, EAST, UP delle cinque stazioni considerate OL01 (punti blu), CREA (punti arancioni), CREM (punti magenta), MILA (punti verdi) e PAVI (punti rossi) al netto dei trend di velocità calcolati secondo il sistema di riferimento europeo EURA; le serie temporali sono state sovrapposte al fine di identificare eventuali spostamenti locali.

2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2020 (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 278 immagini acquisite lungo orbite ascendenti e 289 lungo orbite discendenti, relative al periodo marzo 2015 - ottobre 2020; in [Figura 13](#) è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 773 e 812 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.

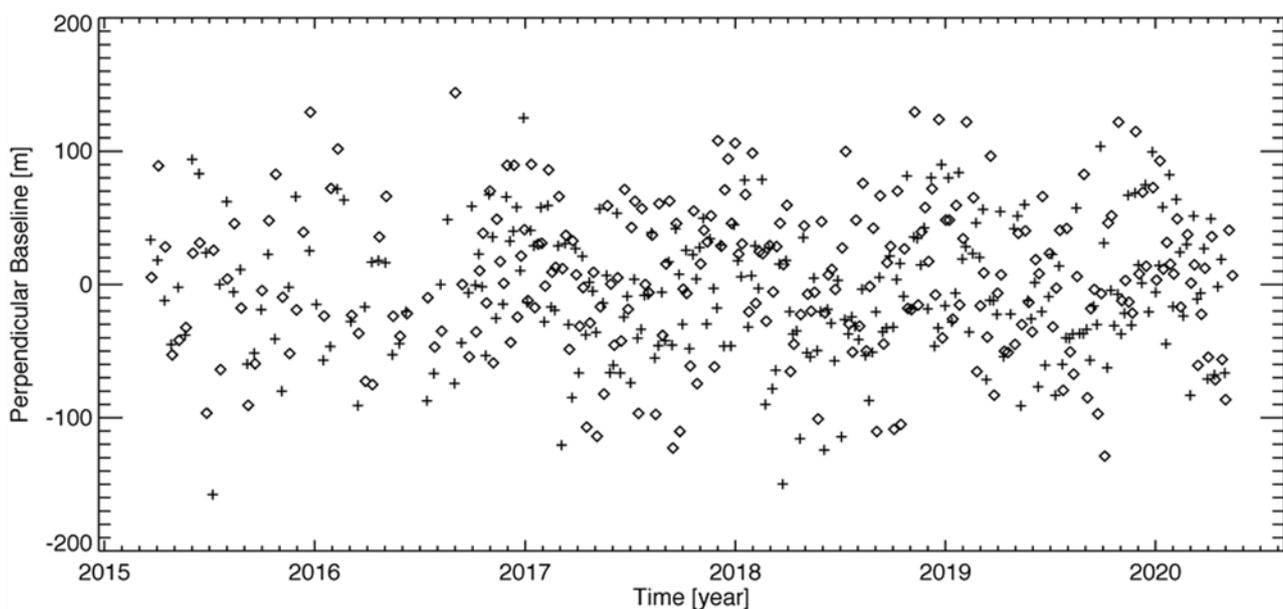


Figura 13 - Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.

Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato il DEM SRTM dell'area con una spaziatura 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 campionati sulla stessa griglia del DEM utilizzato per l'elaborazione. L'estensione spaziale dell'area analizzata è di circa 190 km x 70 km. Poiché, diversamente dalle mappe e serie temporali di deformazione ottenute dai dati ERS-1/2 e ENVISAT, non esiste ancora una validazione estesa dei prodotti DInSAR generati a partire dai dati S-1 (anche a causa della ancora ridotta estensione temporale delle serie acquisite) è stata effettuata una validazione dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS rese disponibili da OGS.

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

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

Si sottolinea che tutti i risultati mostrati fanno riferimento all'area comune ed ai pixel comuni alle analisi effettuate sui dati acquisiti dalle orbite discendenti ed ascendenti da parte dei satelliti Sentinel-1A (S-1A) e Sentinel-1B (S-1B) che compongono la costellazione. Si segnala inoltre 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 più elevata (pari a 0.99) rispetto ai report precedenti. 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 2020

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

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-27/10/2020	289	812
Ascendente	23/03/2015-28/10/2020	278	773

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 2020)

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 289 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – ottobre 2020 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 14](#); grazie ad essi sono stati generati 812 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 15](#), 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.

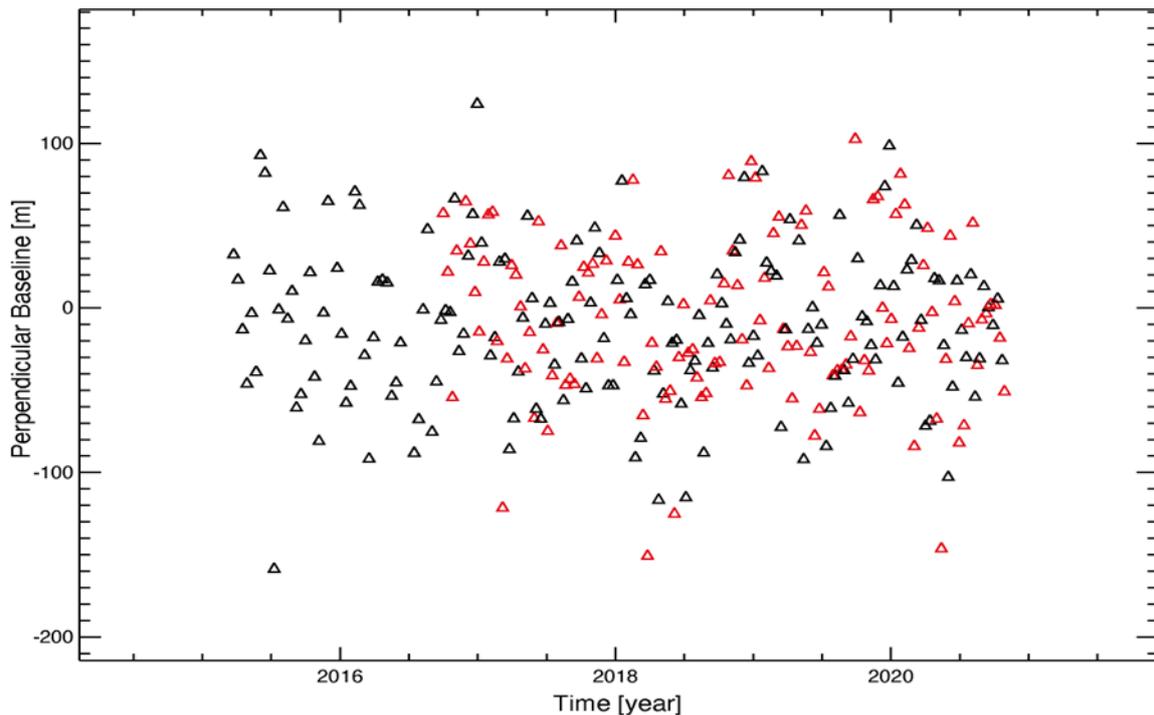


Figura 14 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GPS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in [Figura 15](#) sono evidenziate le posizioni delle tre stazioni GPS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline bianche) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina bianca contornata di nero indica la posizione del sito di stoccaggio.

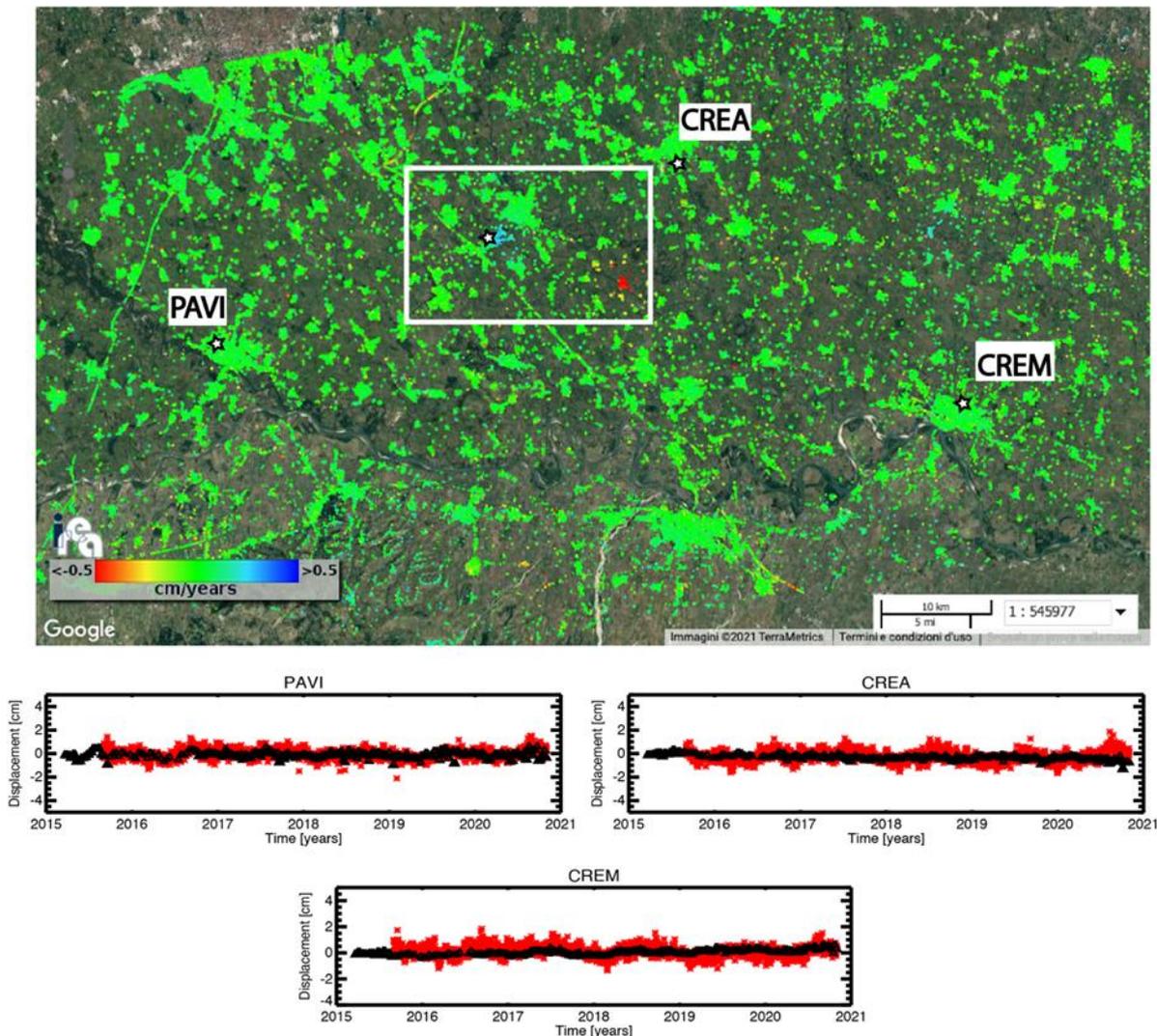


Figura 15 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2020. La stellina bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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 16](#).

Come si evince dai grafici, 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 0.5 cm. Tale valore è consistente, se non migliore, rispetto alla stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In [Figura 16](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di [Figura 15](#) 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 15) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in Figura 15).

L'analisi effettuata evidenzia che, coerentemente con le precedenti analisi, nelle aree identificate dai punti P1 e P3 non si rilevano deformazioni significative (superiori a 2-3 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, fino a settembre 2019, con un'escursione di circa 1-1.5 cm e velocità media di circa 1-1.5 cm/anno. Tale trend sembra poi assumere un andamento costante o lievemente oscillante intorno al valor medio di 1 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 di subsidenza 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.

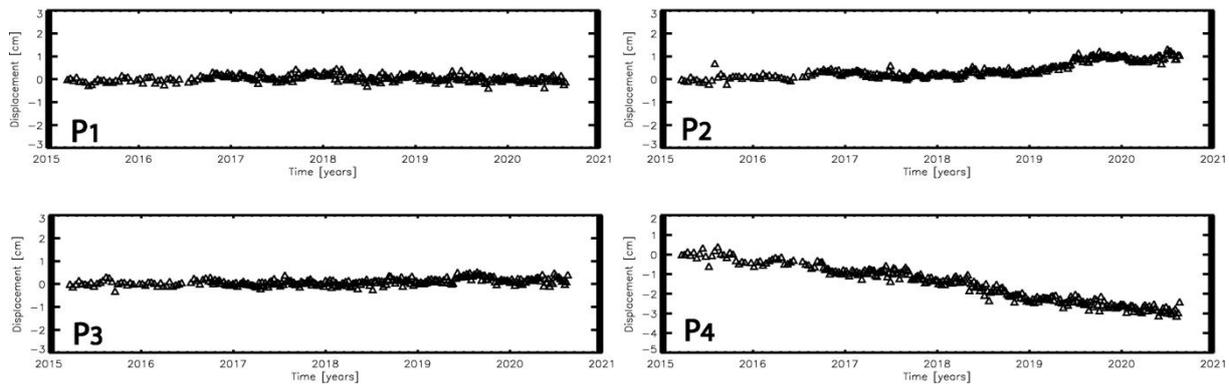
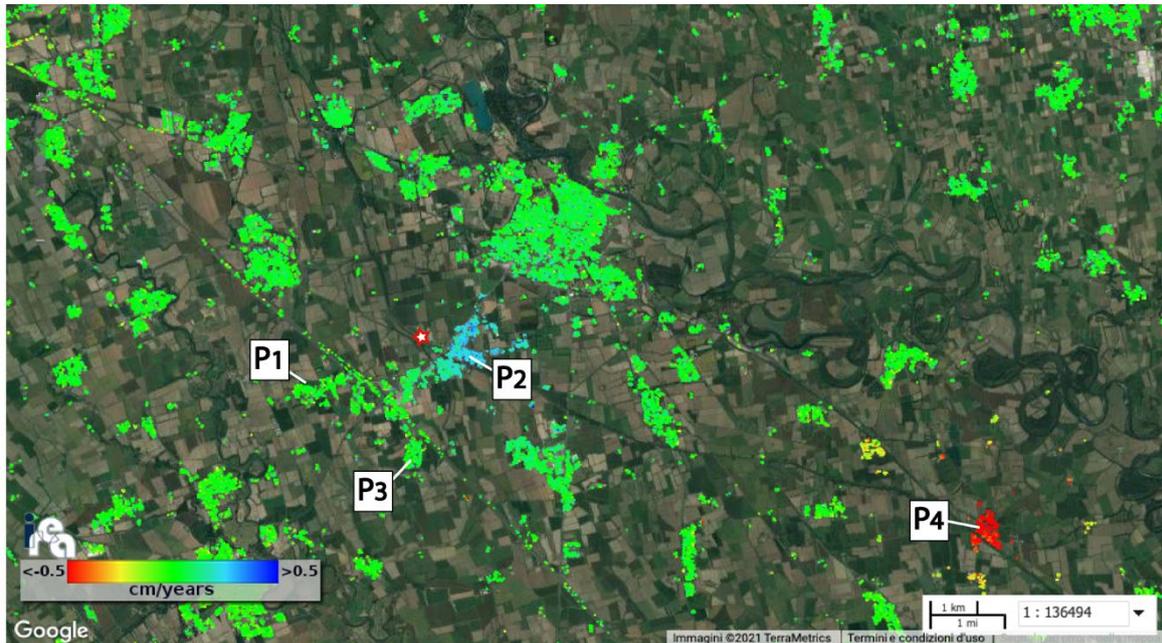


Figura 16 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 14 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. 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 2020.

2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2020)

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 2020 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, sono stati utilizzati 278 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 17](#), con i quali sono stati generati 773 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 18](#), 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.

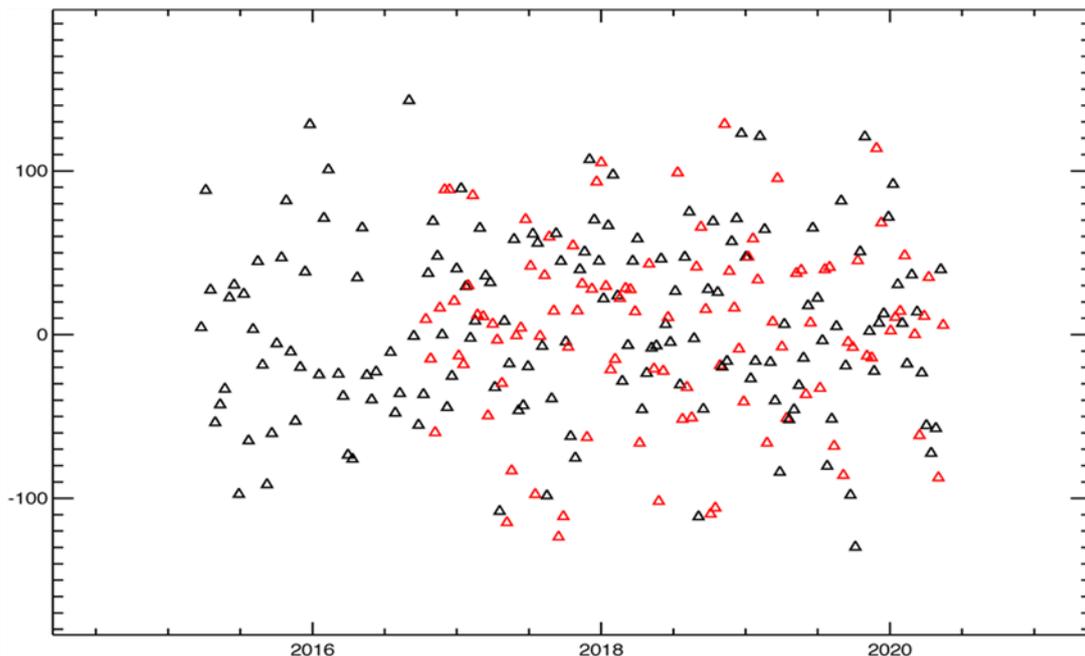


Figura 17 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.

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 GPS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in [Figura 18](#) sono rappresentate le 3 stazioni GPS prese in considerazione (identificate

sulla mappa di deformazione tramite stelline bianche) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina bianca con contorno nero indica la posizione del sito di stoccaggio.

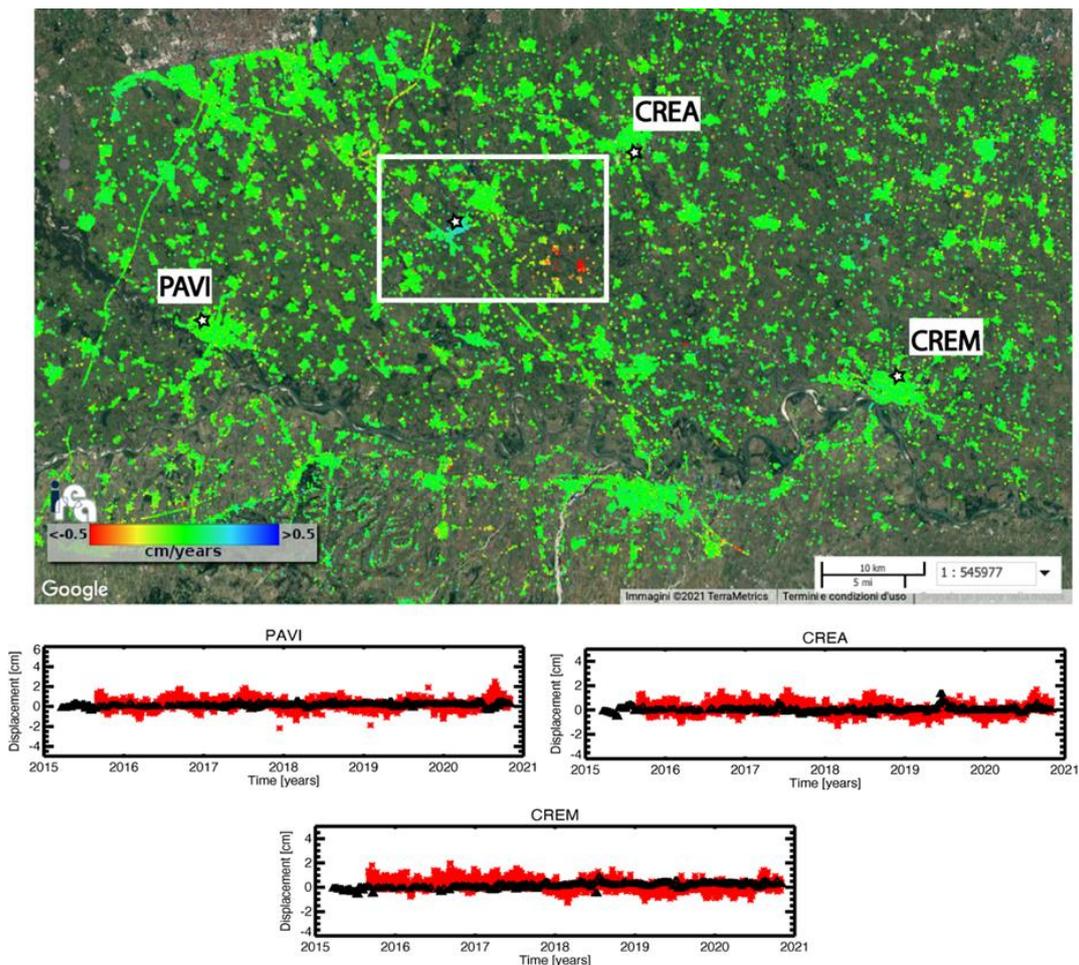


Figura 18 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2020. La stellina bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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 19](#).

Come si evince dai grafici, 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 0.5 cm. Tale deviazione standard è consistente con la stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In [Figura 19](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di [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 nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 di [Figura 19](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 di [Figura 19](#)).

L'analisi effettuata evidenzia che, coerentemente con le precedenti analisi, nelle aree identificate dai punti P1 e P3 non si rilevano deformazioni significative (superiori a 2–3 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, fino circa a settembre 2019, con un'escursione di circa 1-1.5 cm e velocità media di circa 1-1.5 cm/anno. Tale trend sembra poi assumere un andamento costante o lievemente oscillante intorno a un valor medio compreso tra 1-1.5 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 di subsidenza 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.

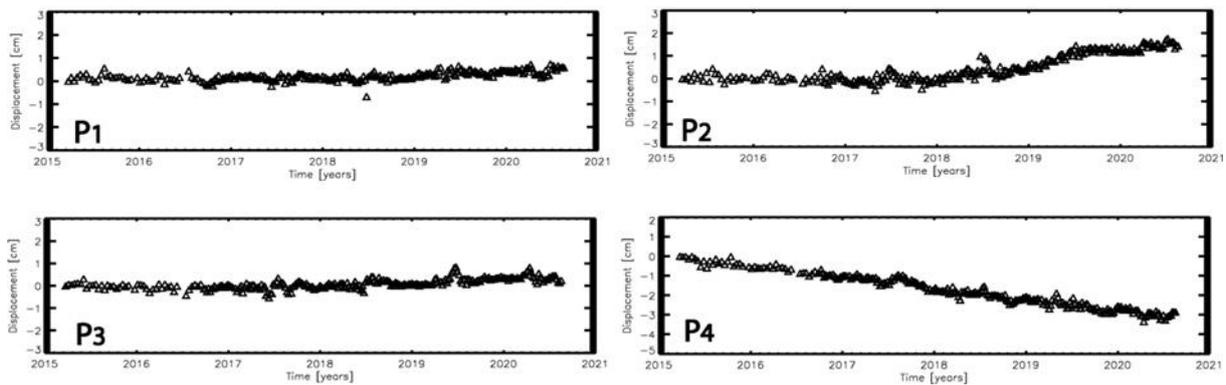
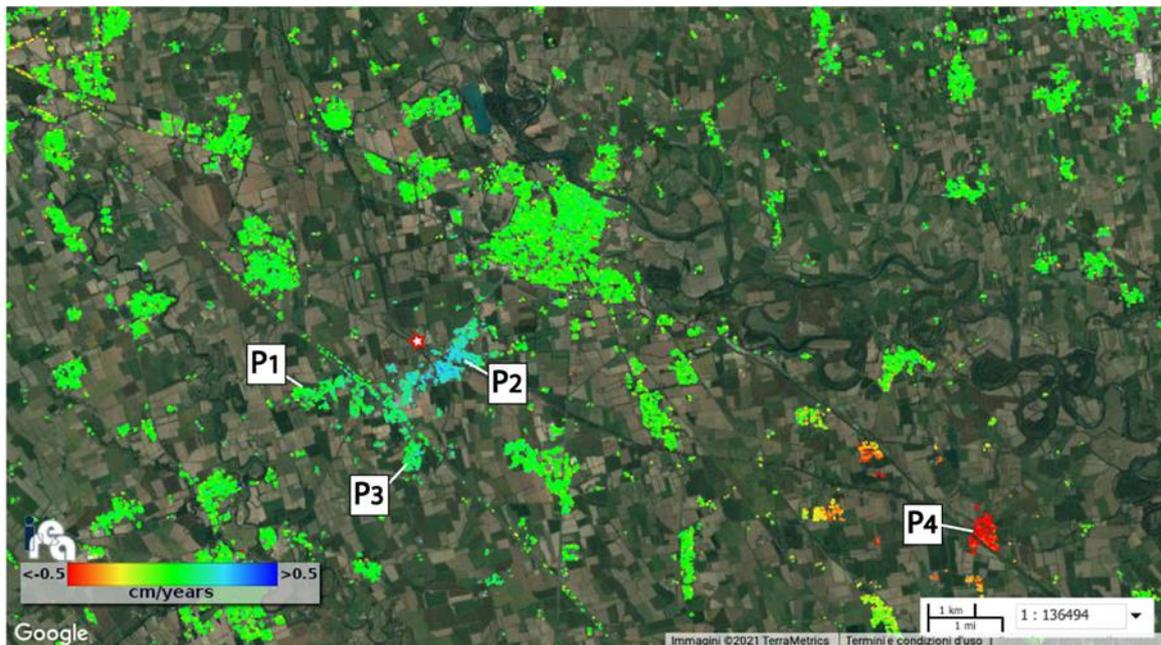


Figura 19 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 18](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. 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 2020.

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 [20](#) e [21](#), rispettivamente. Anche in questo caso, utilizzando le misure delle 3 stazioni GPS rese disponibili da OGS indicate sulle mappe, sono stati effettuati i confronti tra le serie di deformazione GPS e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (asterischi rossi e triangoli neri, rispettivamente). In particolare in Figura 19 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 0.4 cm. In [Figura 21](#), 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 0.3 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 [22](#) e [23](#) 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 [20](#) e [21](#). Sono inoltre rappresentati i grafici relativi all'andamento temporale della deformazione di quattro punti selezionati. L'analisi dei risultati mostrati nelle Figure [22](#) e [23](#) evidenzia che nel periodo marzo 2015-ottobre 2020 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 avente una velocità media di circa 1.5 cm/anno a partire dall'inizio del 2019 fino circa a settembre 2019, periodo a partire dal quale il trend sembra diventare costante o lievemente oscillante intorno a un valor medio di circa 1.5 cm. Tale fenomeno di deformazione è analizzato con maggior dettaglio nel paragrafo che segue.

Inoltre, i risultati mostrano un significativo effetto deformativo di subsidenza 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.

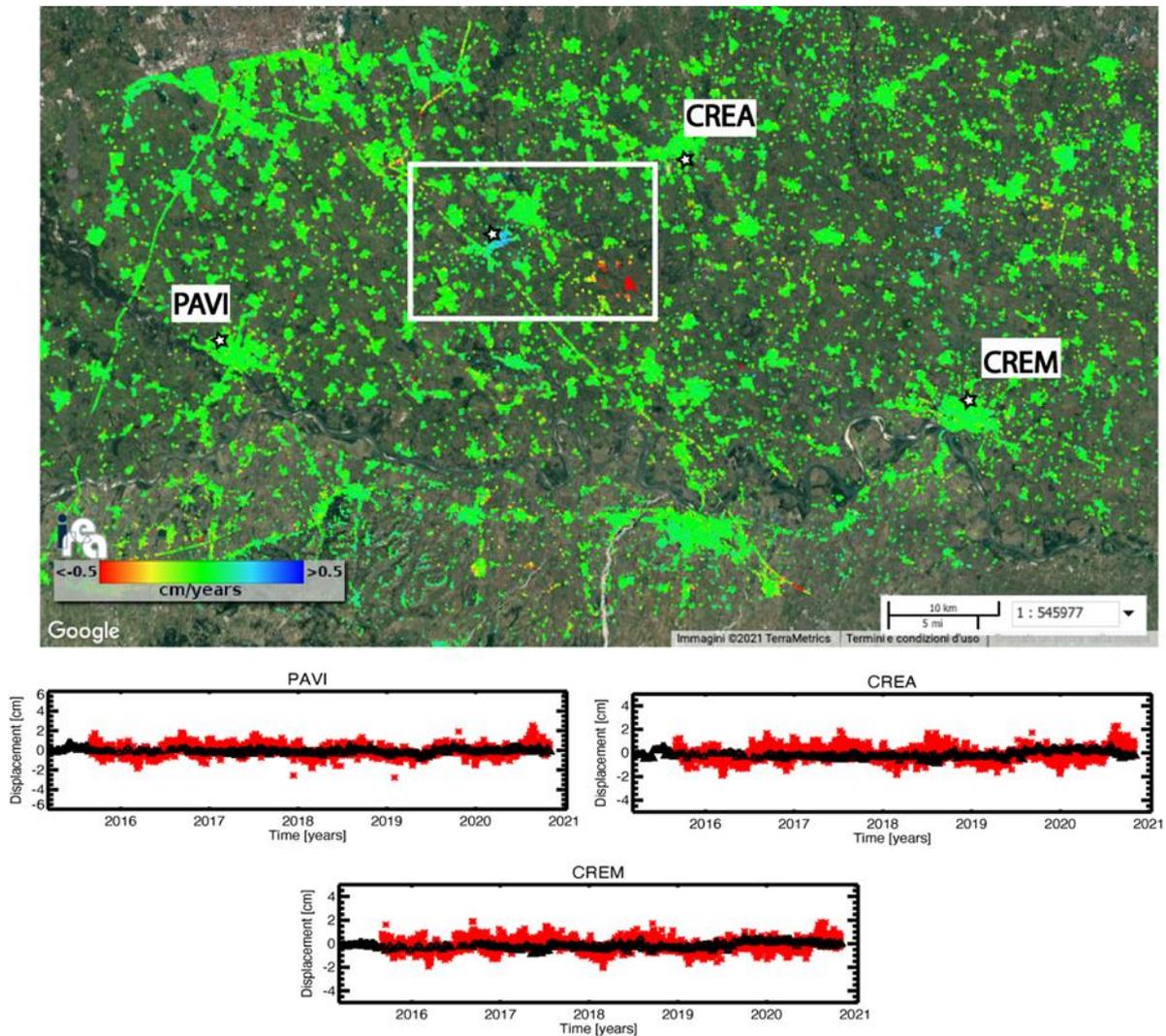


Figura 20 - Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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).

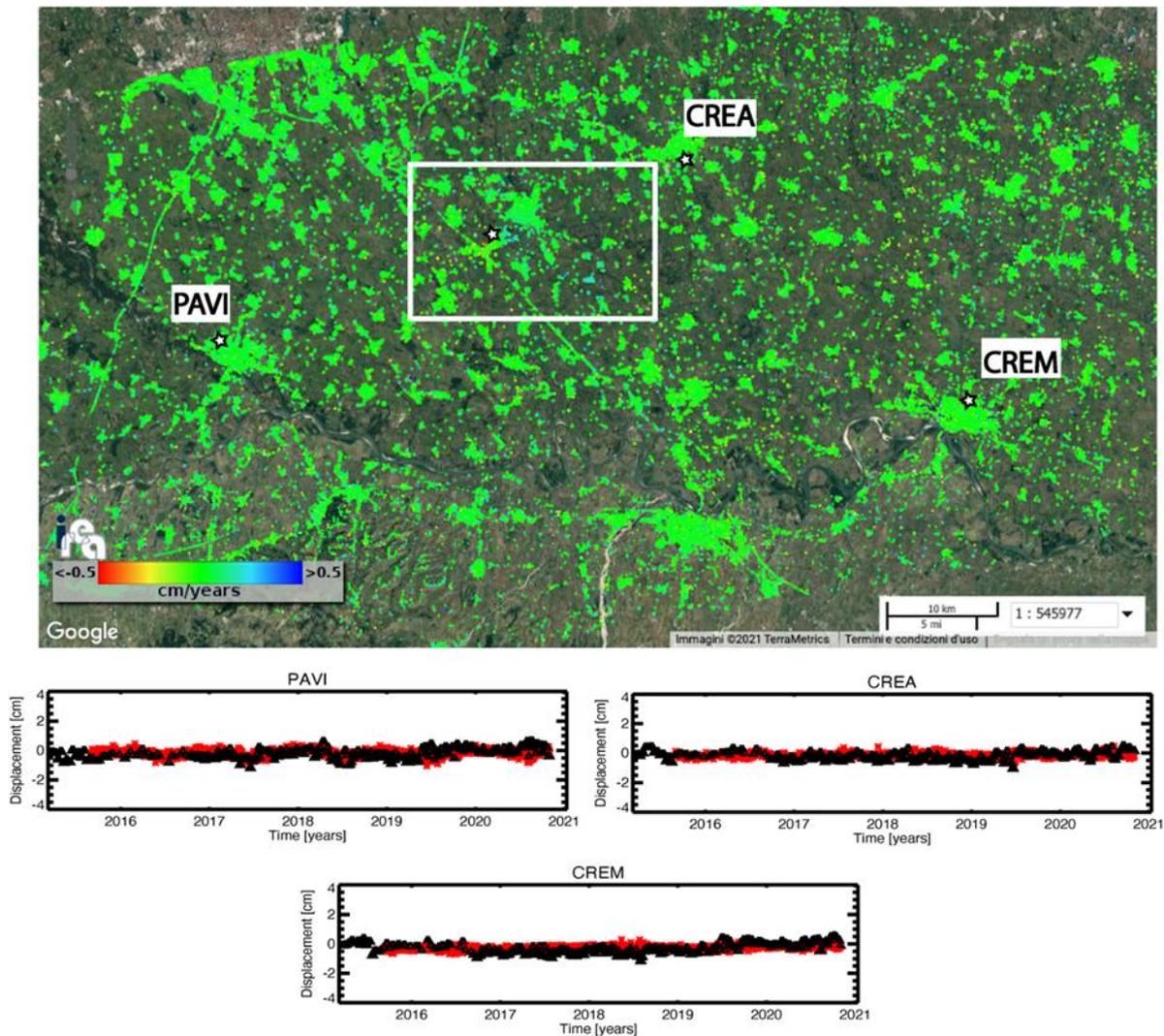


Figura 21 - Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina bianca con contorno nero indica il sito dell'impianto di stoccaggio e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, 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).

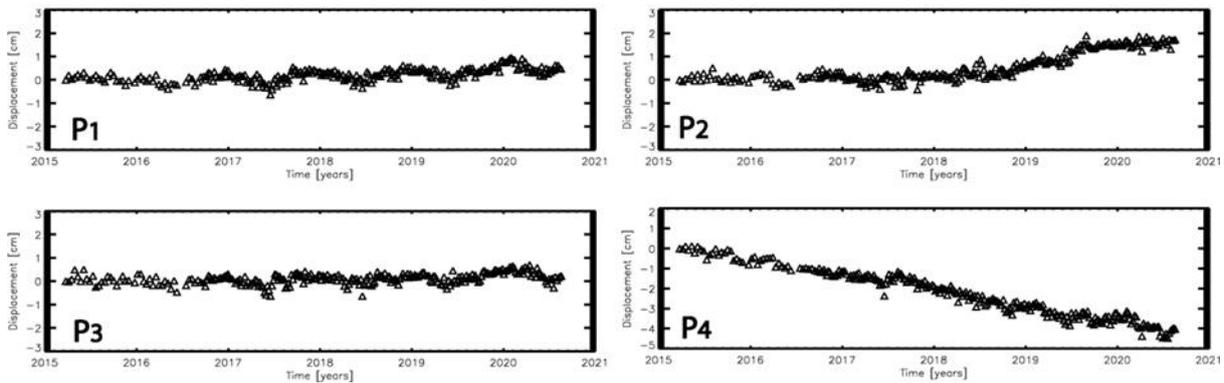
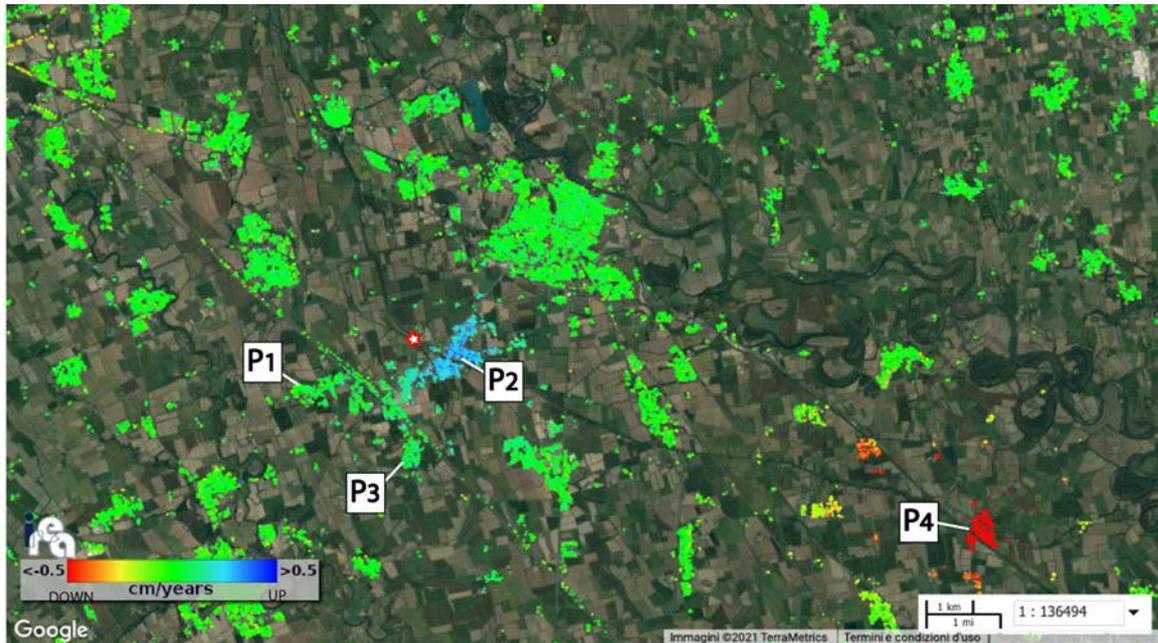


Figura 22 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 20 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. 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).

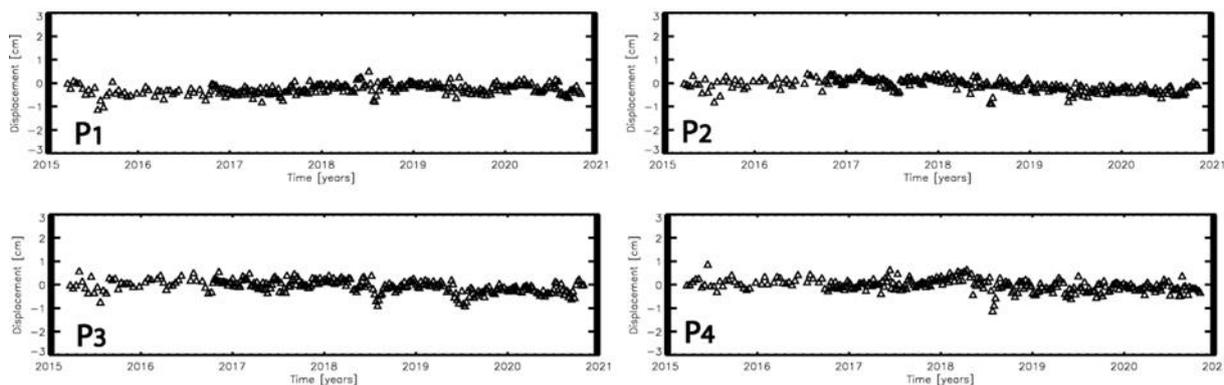
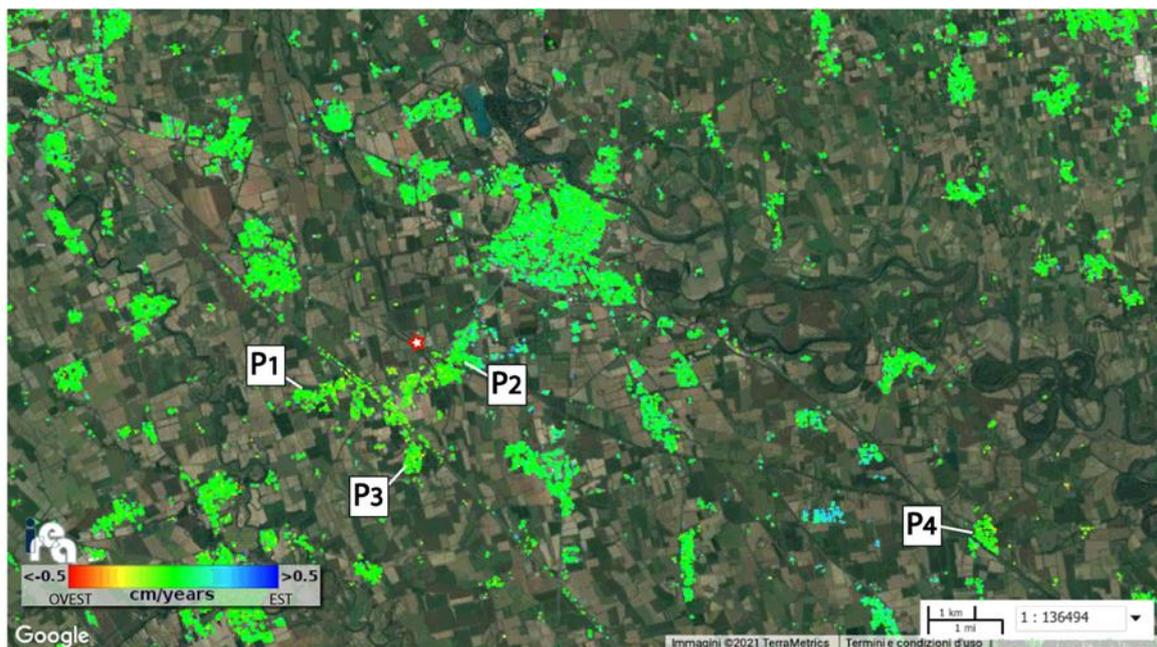


Figura 23 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 21 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. 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 [16](#), [19](#), [22](#) e [23](#), che è quella più vicina all'impianto di stoccaggio, mostra un effetto deformativo di sollevamento del suolo a partire dall'inizio del 2019 fino circa a settembre 2019, periodo a partire dal quale tale sollevamento appare arrestarsi per assumere un andamento costante o lievemente oscillante. Questo paragrafo è finalizzato a mostrare con maggior dettaglio tale fenomeno. In particolare, in [Figura 24](#) è rappresentato uno zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio con le serie temporali dello spostamento superficiale di alcuni pixel scelti nell'area caratterizzata dal maggior sollevamento rilevato.

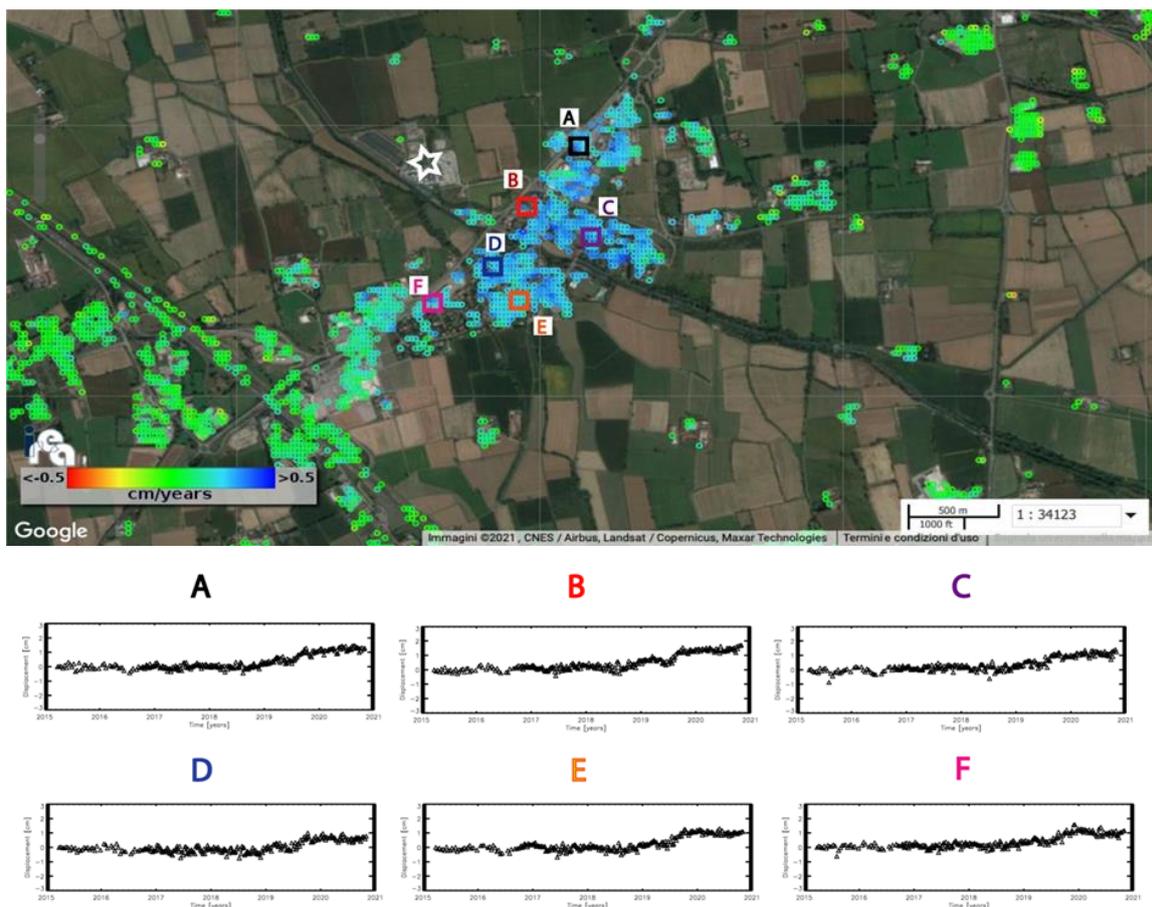


Figura 24 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A) e corrisponde anche alla posizione della stazione OL01. Sono inoltre

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.

In [Figura 24](#) si mostrano le serie temporali della componente verticale dello spostamento del suolo di tali pixel. Dai grafici si evince chiaramente che tutta la zona è caratterizzata da un effetto deformativo prevalentemente in direzione verticale con un sollevamento del suolo di circa 1-2 cm (cfr. componente verticale dello spostamento) nel periodo gennaio 2019-settembre 2019, che corrisponde a una velocità media di deformazione di circa 1,5 cm/anno. A partire da settembre 2019 tale sollevamento appare arrestarsi e in alcuni punti si nota anche un inizio di trend inverso di abbassamento del suolo. Tale comportamento deformativo 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 di deformazione locale ridottissimi e quindi ampiamente entro la massima deformazione accettabile. Questa quantità sarà stimata con maggiore accuratezza successivamente, con il progredire del fenomeno deformativo.

3. Conclusioni

Monitoraggio sismico

L'infrastruttura di monitoraggio denominata RMCL, costituita da 9 stazioni sismometriche strumentate 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 1/5/2020-31/10/2020, e corrisponde alla fase di produzione del secondo anno di stoccaggio.

Nei sei mesi rendicontati l'infrastruttura di monitoraggio ha operato correttamente senza interruzioni di rilievo e non sono stati eventi sismici avvenuti nelle aree di rilevazione della RMCL. La scarsa sismicità rilevata rientra totalmente nella statistica di quella rilevata nei quasi due anni antecedenti l'avvio delle attività di stoccaggio. Non vi sono elementi che indichino nelle aree di rilevazione l'insorgenza di sismicità legata allo stoccaggio del gas nel deposito naturale.

Monitoraggio delle deformazioni superficiali

Per ciascun sito della Rete GNSS Lodi sono state calcolate le serie temporali fino alla data del 25/05/2020 nei due sistemi di riferimento ITRF08, riferito al centro di massa della Terra, ed EURA, solidale con la placca continentale europea.

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 31/10/2019.

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 precedenti fino a Dicembre 2018. 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 lieve 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 un tasso di circa 1,5 cm/anno. Tale trend di sollevamento è atteso e coerente con i comportamenti deformativi del suolo 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., e Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7):n/a–n/a. B07402.
- Blewitt, G., and D. Lavallée, Effect of annual signal on geodetic velocities, *J. Geophys. Res.*, 107, 2145, doi: 10.1029/2001JB000570, 2002.
- Bragato, P. L. e 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.
- Kumar, U., Chao, B. F., & Chang, E. T. Y. (2020). What causes the common-mode error in array GPS displacement fields: Case study for Taiwan in relation to atmospheric mass loading. *Earth and Space Science*, 7, e2020EA001159. <https://doi.org/10.1029/2020EA001159>
- 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.
- 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.
- 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. (2020). Concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio". Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2020 – Prima relazione annuale. Rel. OGS 2020/37 Sez. CRS 11.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2012). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. In: M. Mucciarelli (Ed.), *Tecniche Sperimentali per la Stima dell'Amplificazione Sismica*, Studi teorici ed applicazioni professionali, Aracne Ed., 431-445.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2015a). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. *Seismological Research Letters*, 86, 978-984, doi: 10.1785/0220140175. Available at <http://srl.geoscienceworld.org/content/early/2015/02/18/0220140175.full.pdf>.
- Priolo E., Romanelli M., Plasencia-Linares M. P., Garbin M., Peruzza L., Romano M. A., Marotta

P., Bernardi P., Moratto L., Zuliani D. and Fabris P. (2015b). Seismic Monitoring of an Underground Natural Gas Storage Facility – The Collalto Seismic Network. *Seismological Research Letters*, 86, 1, 109-123 + Electronic Supplement.

Teatini, P., et al. (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.

Zhou, P., Yang, H., Wang, B., & Zhuang, J. (2019). Seismological investigations of induced earthquakes near the Hutubi underground gas storage facility. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JB017360>.

Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL

I grafici raffigurano la disponibilità dei dati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL) nel periodo 1/5/2020-31/10/2020, 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.



OGS

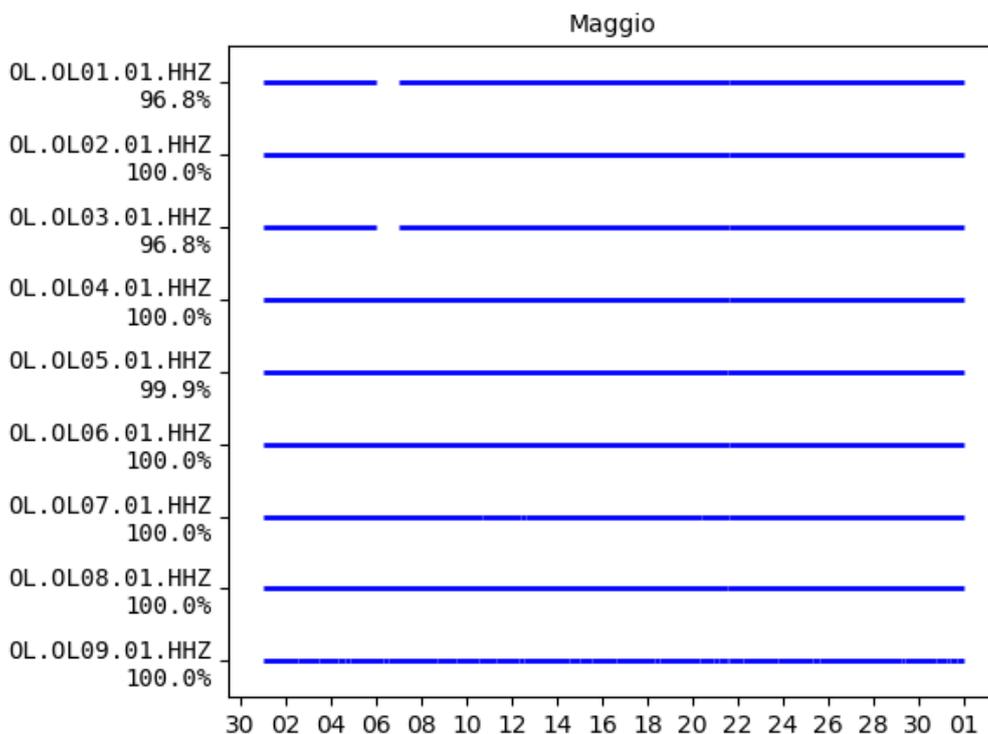
Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



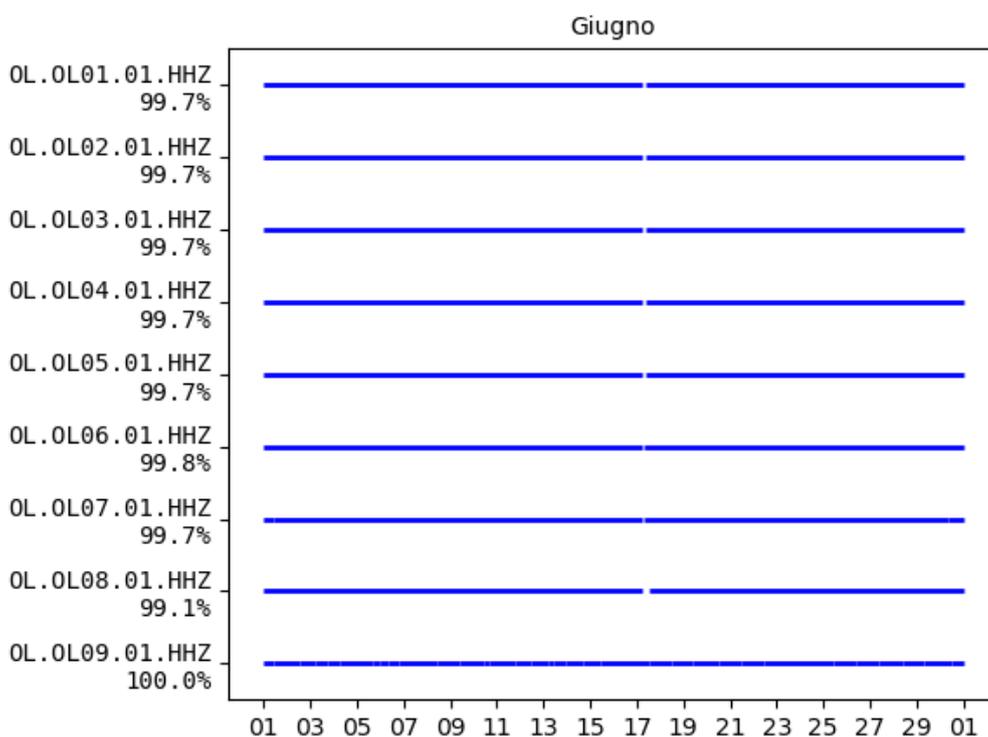
Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

Maggio 2020

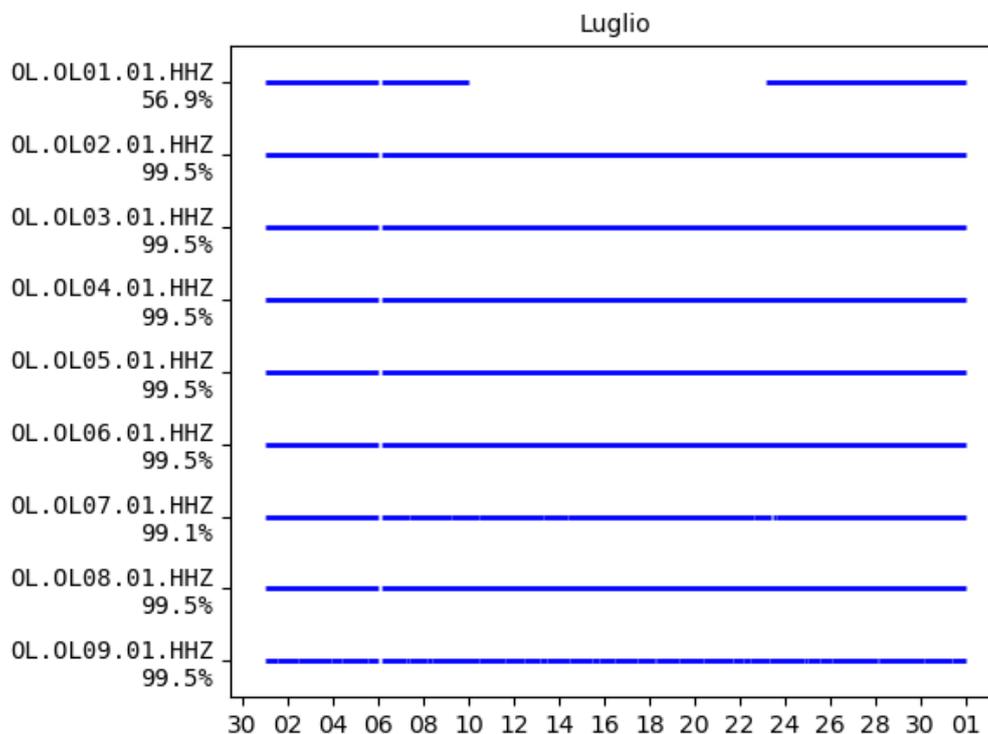


Giugno 2020

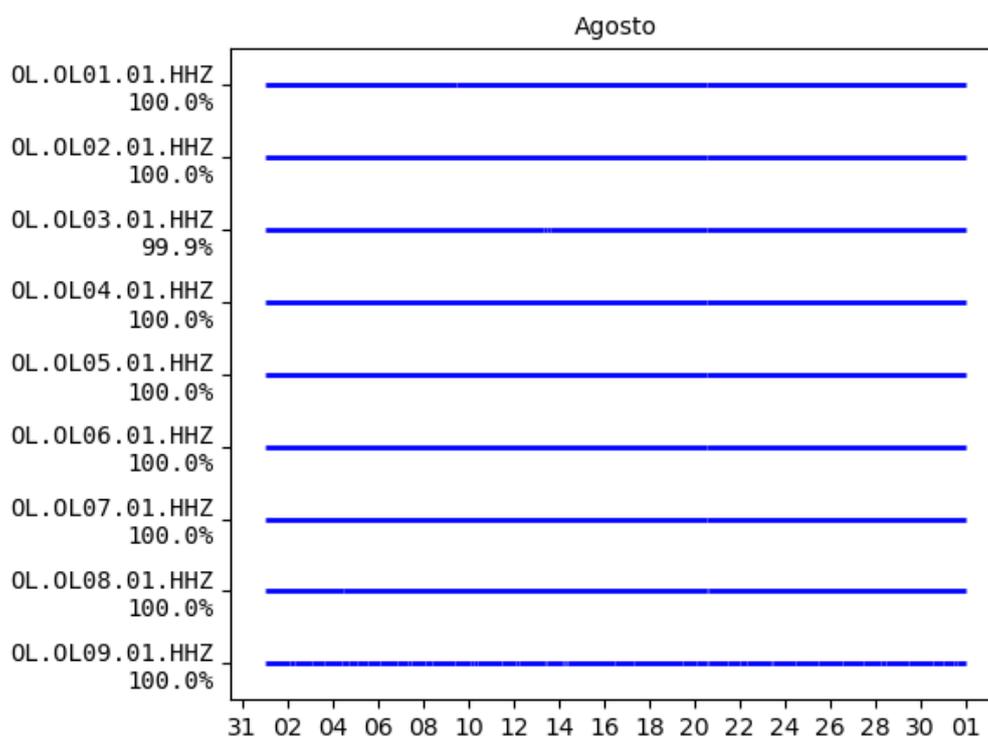




Luglio 2020



Agosto 2020





OGS

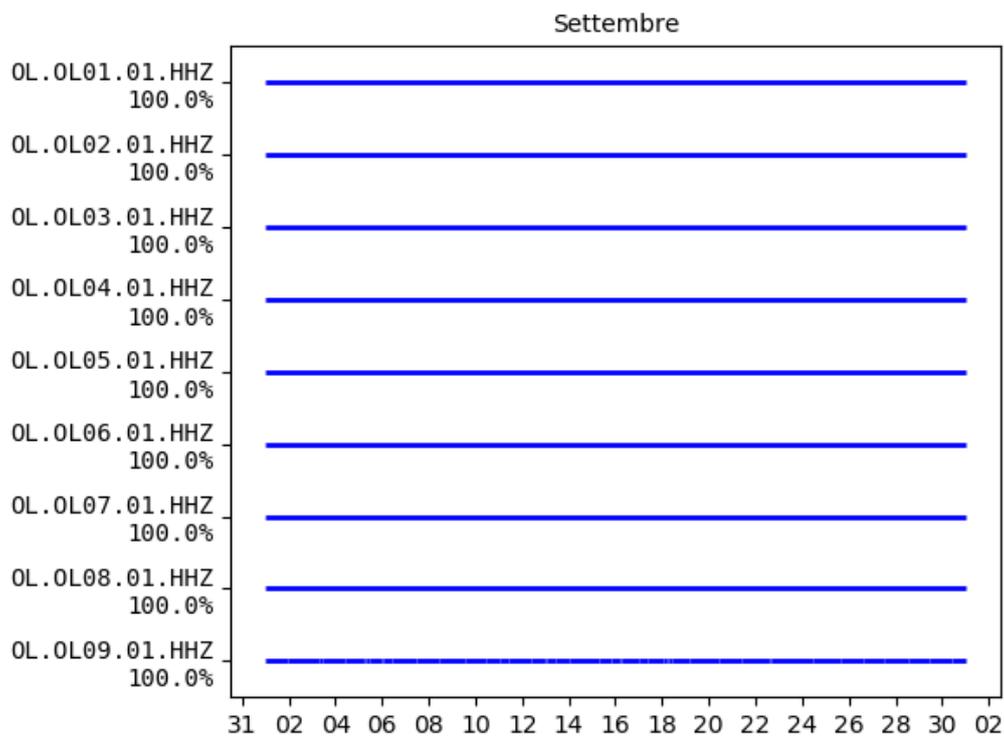
Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



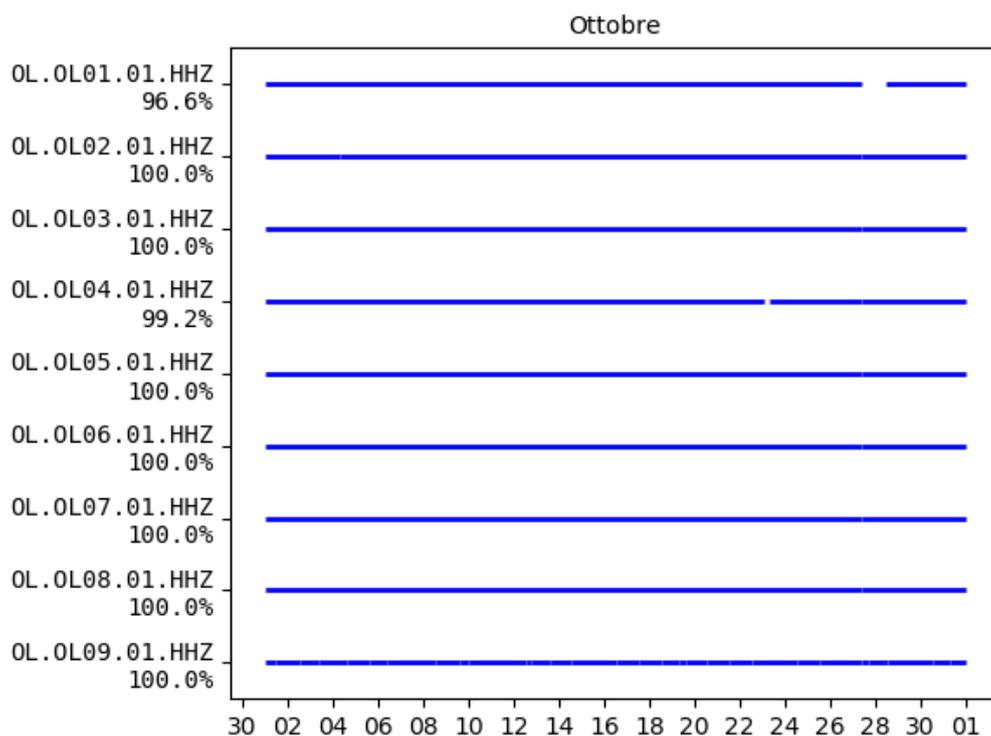
Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

Settembre 2020



Ottobre 2020



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

```

# Corneigliano Laudense Seismic Network Event List
#-----
# File generated on: 2021-02-02 15:14:02.947662
# Location Method: Hypoellipse
# Earth Model: cornl
#-----
# id Area date time lat lon depth depth ML Q GAP No Ns errh1 errh2 errz rms distance Location
1 DE* 2017/03/06 20:12:37.93 45.370 9.371 9.12 37.95 2.2 D 251 7 0 1.77 4.16 99.00 0.41 12.10 Dresano
2 AE 2017/05/23 04:16:32.54 45.448 9.246 37.95 1.9 A 175 16 7 0.44 1.05 0.65 0.15 25.14 Milano
3 DE* 2017/07/11 22:25:03.54 45.306 9.422 1.43 0.9 D 294 8 3 0.11 0.17 99.00 0.07 4.35 Lodi Vecchio
4 DE 2017/07/12 00:17:53.87 45.304 9.419 2.19 1.1 A 156 15 6 0.14 0.20 0.14 0.18 4.43 Lodi Vecchio
5 DE 2017/07/12 00:18:30.95 45.304 9.435 1.25 -- A 256 8 3 0.05 0.25 0.04 0.04 3.30 Lodi Vecchio
6 DE 2017/10/20 21:37:06.65 45.325 9.544 3.22 1.2 C 208 5 2 0.12 0.71 4.97 0.10 7.48 Lodi
7 DE 2018/01/27 04:01:44.44 45.311 9.435 1.51 0.8 A 278 11 5 0.06 0.09 1.16 0.11 3.95 Tavazzano con Villavesco
8 DE 2018/05/27 20:01:35.35 45.257 9.456 5.66 0.7 A 150 13 6 0.14 0.19 0.19 0.14 3.21 Pieve Fissiraga
9 AE 2018/06/18 21:45:20.87 45.276 9.238 33.33 1.3 A 191 18 9 0.40 0.65 0.47 0.37 16.86 Vidigulfo
10 AE 2018/06/20 00:49:07.48 45.276 9.572 34.01 2.0 A 153 22 11 0.39 0.79 0.72 0.17 13.68 Palazzo Pignano
11 DE 2018/10/30 05:03:37.61 45.383 9.532 3.14 2.1 A 284 12 6 0.18 0.22 0.38 0.19 5.66 Lodi
12 DE 2018/11/21 03:26:44.47 45.308 9.583 35.61 1.5 B 197 14 7 0.29 2.29 0.93 0.00 19.43 Vallate
13 AE 2018/12/23 15:06:12.55 45.440 9.605 31.97 1.5 A 255 21 9 0.36 0.59 0.49 0.10 13.21 Bagnolo Cremasco
14 DE 2019/04/25 23:11:31.35 45.355 9.502 1.65 1.0 B 191 10 5 0.11 0.17 1.50 0.16 3.30 Lodi
15 DE 2019/06/12 10:24:02.07 45.302 9.535 2.17 1.0 A 290 10 5 0.10 0.22 0.08 0.21 5.83 Lodi
16 DE 2019/06/21 15:22:39.47 45.308 9.529 2.27 0.9 A 179 10 5 0.08 0.16 0.17 0.16 5.35 Lodi
17 DE 2019/06/21 15:49:01.16 45.307 9.324 35.57 1.9 A 109 28 13 0.26 0.51 0.50 0.14 11.98 Bascapè
18 DE 2019/06/30 12:01:20.46 45.322 9.528 2.49 1.2 A 180 16 8 0.10 0.15 0.06 0.16 5.01 Lodi
19 DE 2019/07/13 03:01:35.97 45.300 9.649 4.24 2.0 A 222 17 7 0.71 0.85 1.02 0.23 14.31 Credera Rubbiano
20 DE 2019/08/17 09:40:07.14 45.305 9.467 12.19 1.7 D 177 5 2 0.58 3.84 99.00 0.21 18.69 Truccazzano
21 AE* 2020/10/28 09:28:30.08 45.453 9.467 12.19 1.7 D 177 5 2 0.58 3.84 99.00 0.21 18.69 Truccazzano

```

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

In questo capitolo 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 anche presente la retta interpolante la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, che è 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).

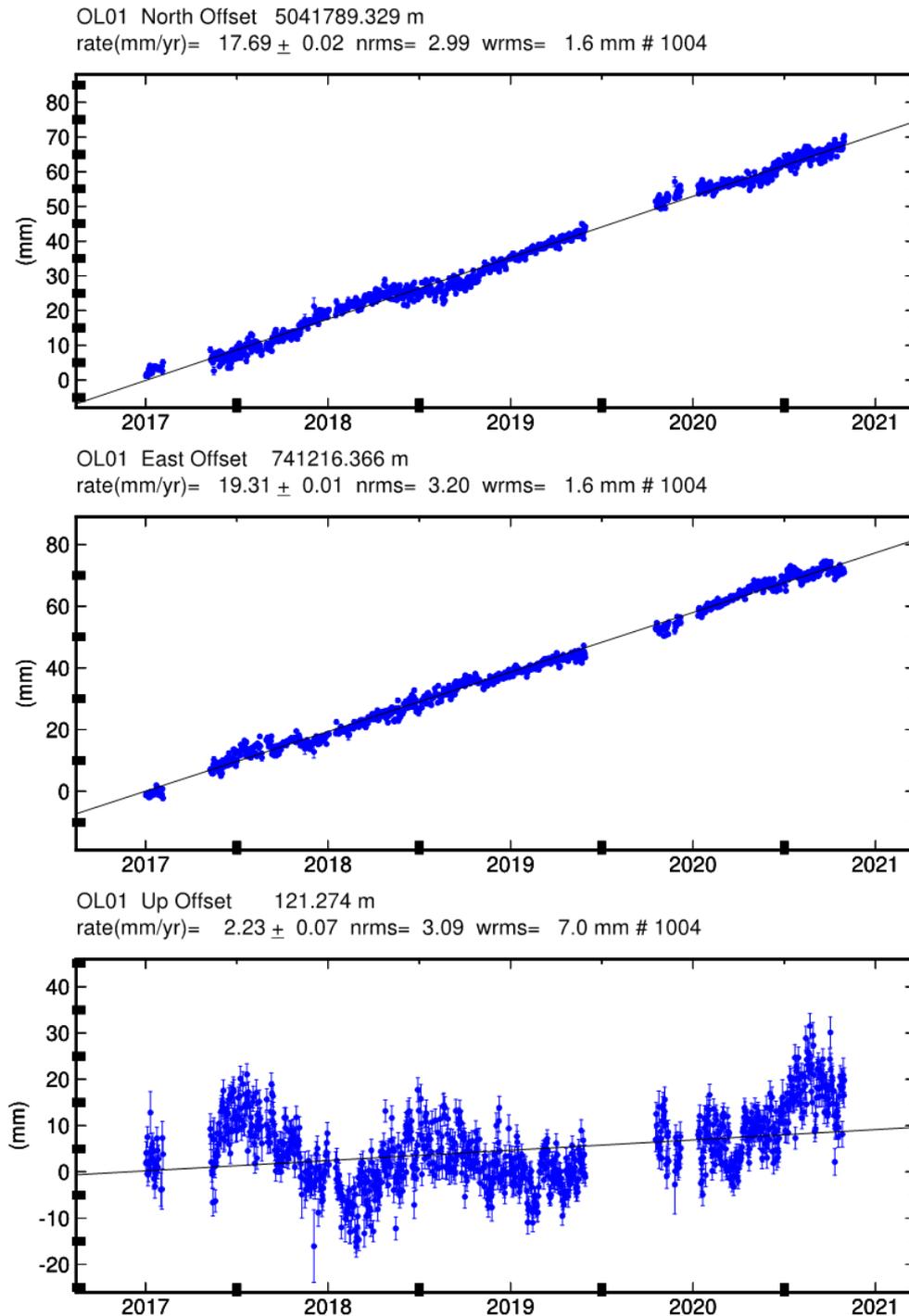


Figura B.1 – Serie temporale della stazione OL01 secondo il sistema di riferimento ITRF08.

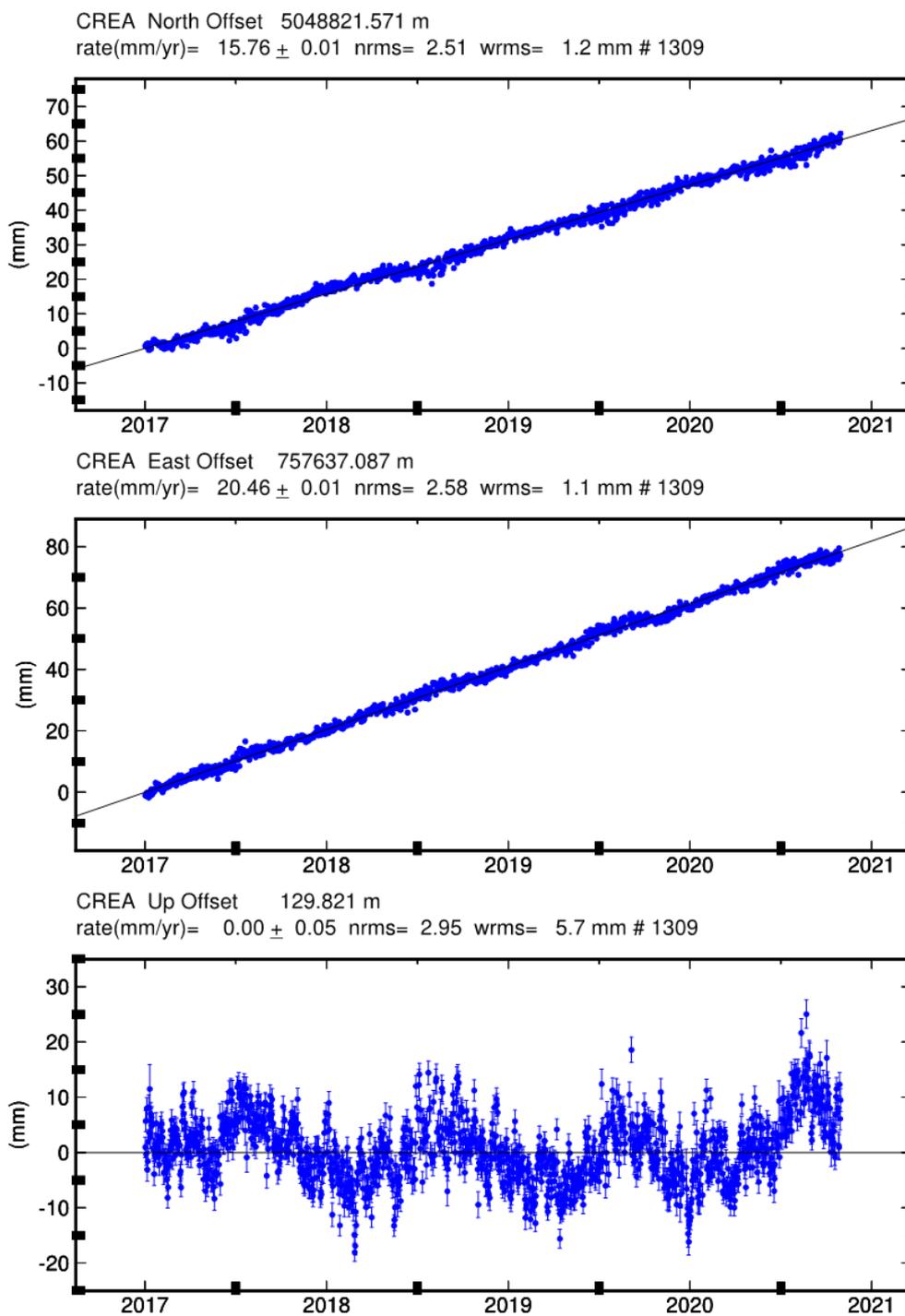


Figura B.2 – Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF08.

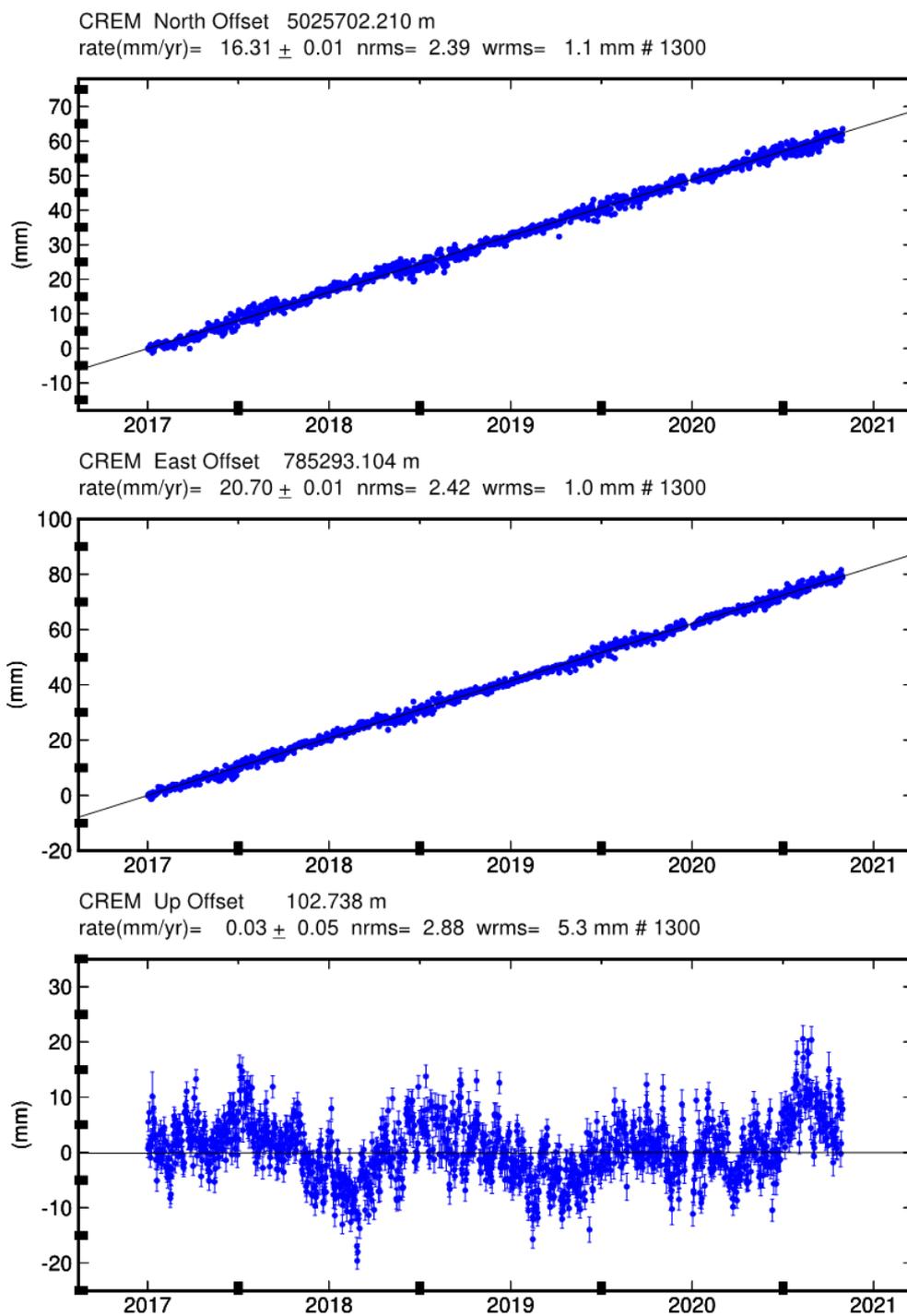


Figura B.3 – Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF08.1

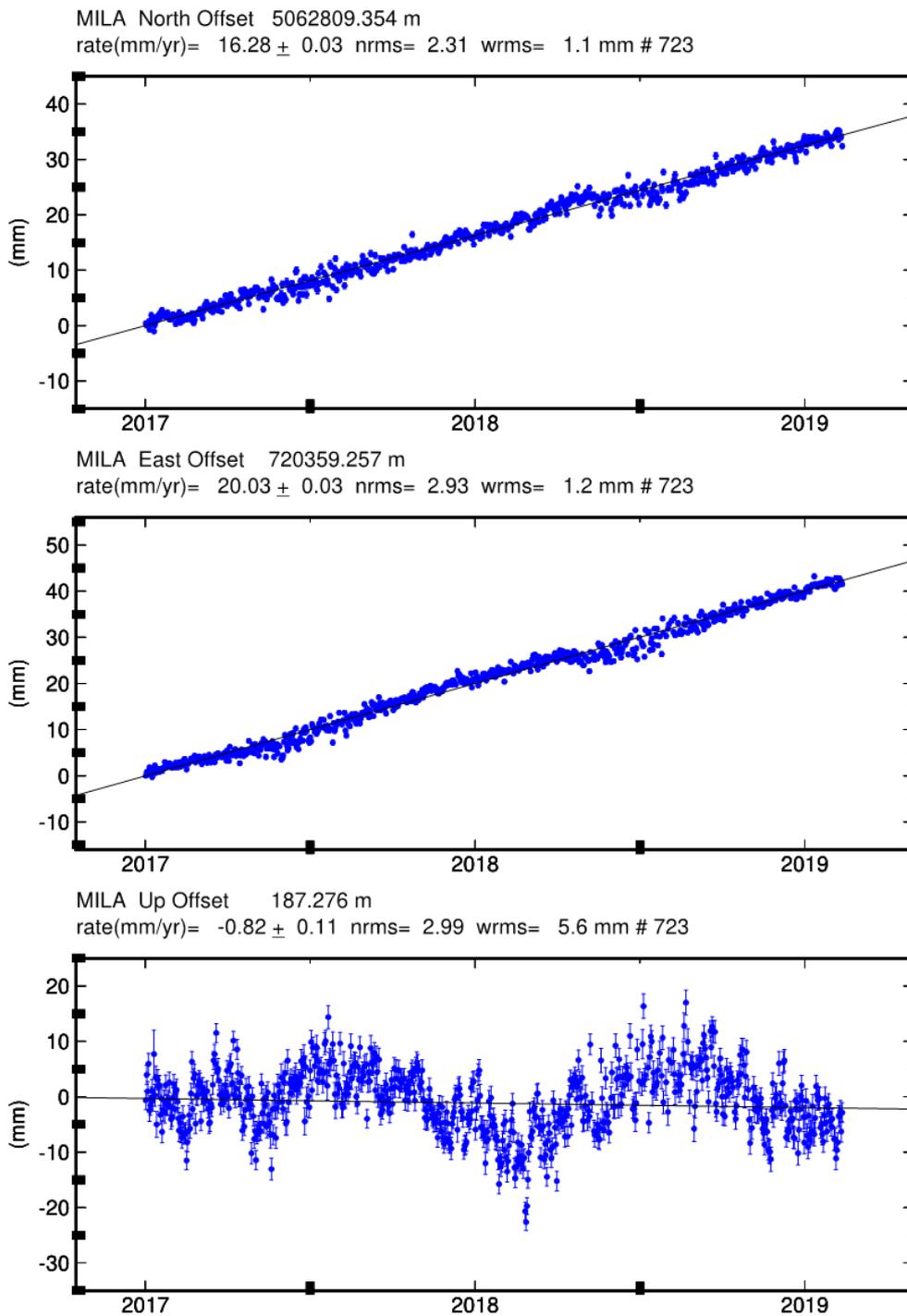


Figura B.4 – Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF08.

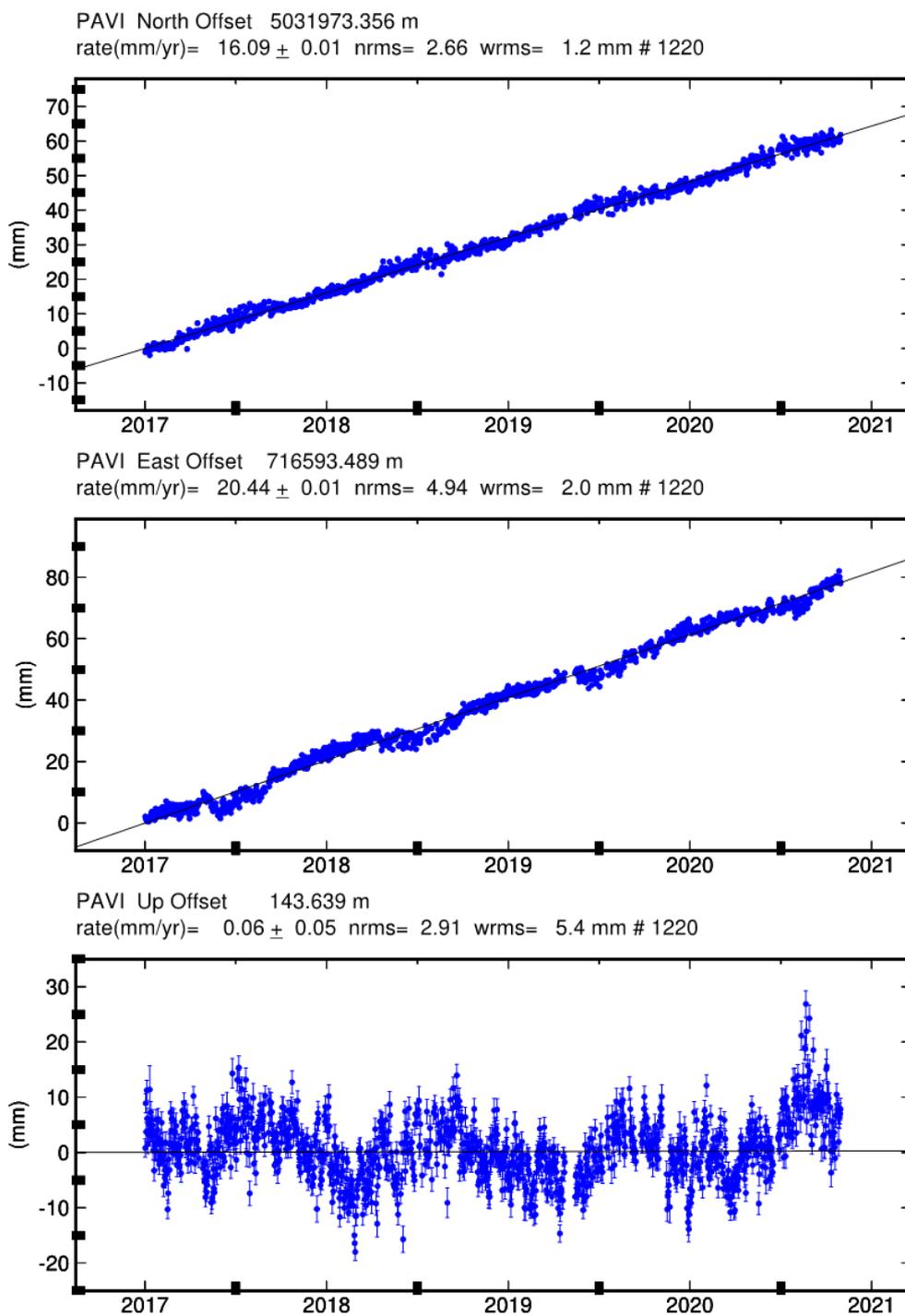


Figura B.5 – Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF08.

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 01/05/2020-31/10/2020 il sito web è stato visitato da 143 utenti, provenienti principalmente dall'Italia, come riportato in Figura D.1. Ricordiamo che i contenuti del sito sono al momento solo in italiano, quindi l'accesso alle pagine da parte di utenti al di fuori del nostro paese può risultare limitato. La traduzione in inglese dei contenuti è in esecuzione al momento della stesura della presente relazione.

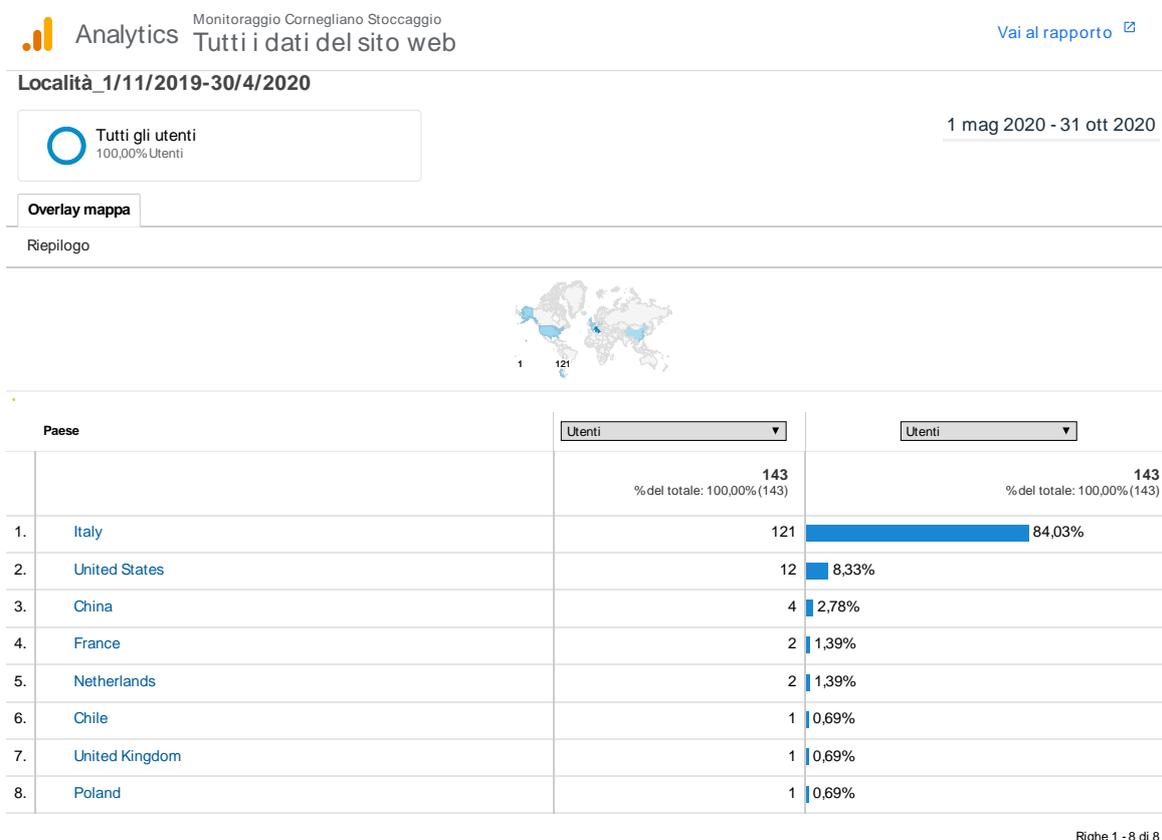


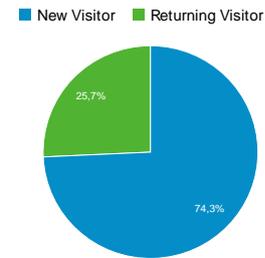
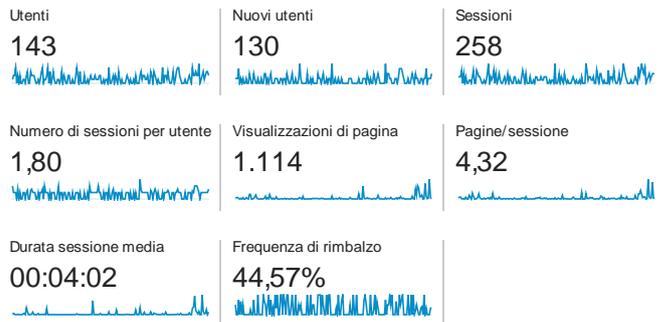
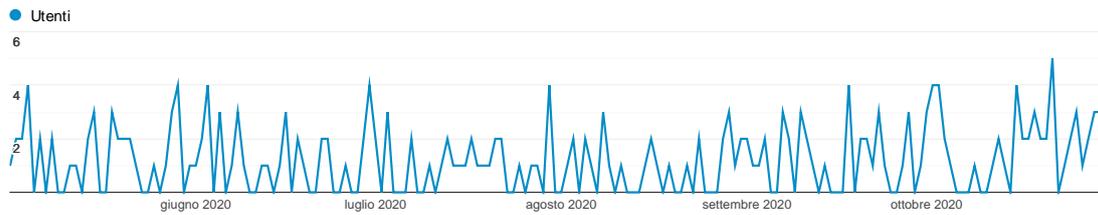
Figura D.1 – Rendiconto delle visite effettuate sul sito web per paese di provenienza (periodo 1/5/2020-31/10/2020).

Panoramica del pubblico

1 mag 2020 - 31 ott 2020

Tutti gli utenti
 100,00% Utenti

Panoramica



Lingua	Utenti	% Utenti
1. it-it	72	50,35%
2. en-us	42	29,37%
3. it	20	13,99%
4. en-gb	5	3,50%
5. fr-fr	2	1,40%
6. es-es	1	0,70%
7. ru	1	0,70%

Figura D.2 – Rendiconto delle visite effettuate sul sito web (periodo 1/5/2020-31/10/2020) per numero di utenti giornalieri nel corso del periodo analizzato, e statistiche complessive di affluenza e lingua di utilizzo.