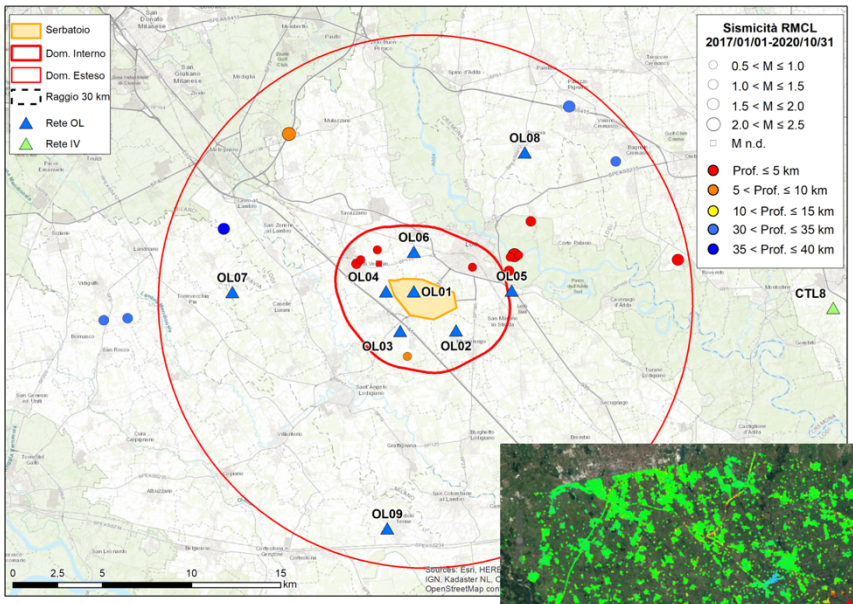
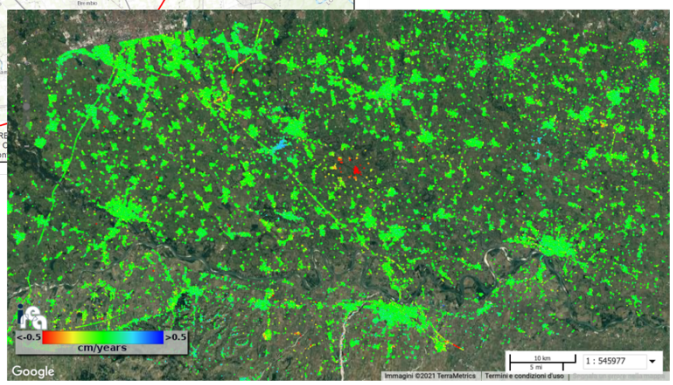
OGS Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

Consiglio Nazionale delle Ricerche
istituto per il rilevamento elettromagnetico dell'ambiente

CONCESSIONE DI STOCCAGGIO DI GAS NATURALE

"CORNEGLIANO STOCCAGGIO"





MONITORAGGIO SISMICO E DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

Anno di esercizio 2021 – Seconda relazione annuale

2021.2

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)

Rel. OGS 2022/57 Sez. CRS 2 SISMIND Sgonico, 21 febbraio 2022

A cura di:

Enrico Priolo[1], Riccardo Lanari[2], Manuela Bonano[2], Claudio De Luca[2], Marco Garbin[1], Mariangela Guidarelli[1], Andrea Magrin[1], Luca Moratto[1], Laura Peruzza[1], Marco Romanelli[1], Maria Adelaide Romano[1], Denis Sandron[1], Marco Santulin[1], Lavinia Tunini[1], Giovanni Zeni[2], Ivana Zinno[2], David Zuliani[1].

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

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

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

Digitally signed by: PAROLAI STEFANO
Date: 25/02/2022 08:21:47

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

Soldovieri Francesco
22.02.2022 16:23:20 GMT+01:00

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

Recapiti ... ii

Recapiti ... ii

Sommario ... 1

1. Monitoraggio sismico ... 2

1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL) ... 3

1.2 Operatività della rete sismica ... 9

1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio ... 10

2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali ... 16

2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01 ... 17

2.1.1 Dati elaborati ... 17

2.1.2 Risultati ottenuti ... 20

2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2021 (dati SENTINEL-1) ... 31

2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – ottobre 2021) ... 33

2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – ottobre 2021) ... 37

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 ... 48

Bibliografia ... 50

Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL ... 52

Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione ... 56

Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08 ... 58

Appendice D – Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense ... 65

Elenco delle abbreviazioni

AE. Area Esterna di rilevazione della rete di monitoraggio

BSI Bollettino Sismico Italiano

CPTI15 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15)

CSI1.1 Catalogo della Sismicità Italiana (https://csi.rm.ingv.it/)

DBMI15 Database Macrosismico Italiano (https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/)

DE Dominio Interno di rilevazione della rete di monitoraggio (MiSE-UNMIG, 2014)

DI Dominio Esteso di rilevazione della rete di monitoraggio (MiSE-UNMIG, 2014)

DInSAR Differential SAR Interferometry

DISS Database delle Sorgenti Sismiche Italiane (https://diss.ingv.it/)

EMSC European-Mediterranean Seismological Centre

GAMIT/GLOBK suite di programmi sviluppato dal MIT per analizzare dati GPS, principalmente per studiare la deformazione della crosta terrestre

GNSS Global Navigation Satellite System

GPS Global Positioning System

LOS Line of sight

MiSE-UNMIG Ministero per lo sviluppo economico - Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse

ML Magnitudo locale

NHNM New High Noise Model (McNamara and Buland, 2004)

NLNM New Low Noise Model (McNamara and Buland, 2004)

PDF Probability Density Function

PSD Power Spectral Density

RMCL Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense

RSNC Rete Sismica Nazionale Centralizzata (gestita da INGV)

RSNI Regional Seismic network of Northwest Italy (gestita dall'Università di Genova)

SAR Synthetic Aperture Radar

SBAS Small BAseline Subset

SPIN Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia

Indice delle figure

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

Figura 2 *- Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana 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.* 7

Figura 3 *- Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-31/10/2021, a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione.* 11

Figura 4 *- Forme d'onda registrate per l'evento ML2.8 del 11/10/2021 ore 23:18:21 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: OL07, OL04, OL03, OL01 e OL06.* 13

Figura 5 *– (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard 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.* 14

Figura 6 *- Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadramento di OL01. Queste stazioni sono MIL2 (Milano), PAVI (Pavia), CREM (Cremona) e CREA (Crema).* 19

Figura 7 *- Serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. La retta interpolante sui grafici fornisce una stima di velocità con il relativo errore, visibile anche in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).* 23

Figura 8 - Zoom della serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) nel periodo dal 01/01/2021 al 31/10/2021. 24

Figura 9 *- Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7.* 25

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

Figura 11 *- Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7.* 27

Figura 12 *- Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7.* 28

Figura 13 - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle della Figura 7. 29

Figura 14 *- Residui delle serie temporali NORTH, EAST, UP delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. I colori utilizzati per le stazioni di riferimento sono: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2021); OL01 (LODI), punti viola. I valori rappresentati sul grafico sono stati ottenuti sottraendo a ciascuna delle serie temporali il proprio trend (calcolato nel sistema ITRF). In viola, in primo piano, la stazione OL01 a cui è stato tolto il trend medio delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per "agganciare" le serie temporali ed evidenziare, graficamente, l'anomalia di OL01 abbiamo considerato come zero la media di OL01 calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati).* 30

Figura 15 - Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti. 31

Figura 16 - 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. 33

Figura 17 - 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 2021. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 18. 34

Figura 18 *- Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 17 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2021.* 36

Figura 19 *- Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.* 37

Figura 20 *- 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 2021. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 21.* 38

Figura 21 *- Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 20 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2021.* 40

Figura 22 *- Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco*

indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). . 42

Figura 23 - Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri)..... 43

Figura 24 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 22 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). I grafici riportano l'andamento temporale della componente verticale dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). 44

Figura 25 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 23 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). I grafici riportano l'andamento temporale della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). 45

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

Indice delle Tabelle

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).....3

Tabella 2 - Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL. 5

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.....6

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.*.....9

Tabella 5 - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica.....10

Tabella 6 *- Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, PAVI e del sito OL01.* 19

Tabella 7 *- Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. Le stime ottenute per la stazione OL01 sono indicate in grassetto e colore rosso. Si ricorda che la migliore accuratezza nella stima delle velocità che si può raggiungere, considerando serie temporali lunghe e monumentazione stabile, è di 0.2 mm/anno sulle componenti orizzontali e 0.5 mm/anno sulla verticale (Masson et al., 2019).* 21

Tabella 8 - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati. 32

Tabella 9 - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati. 32

Sommario

Il presente documento descrive le attività effettuate nel periodo 1/5/2021-31/10/2021 per l'esercizio del monitoraggio integrato svolto dall'OGS e dall'IREA-CNR presso la concessione di stoccaggio gas naturale denominata "Cornegliano Stoccaggio". Esso costituisce il secondo rapporto previsto per l'anno di esercizio 2021, 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 1/1/2017-31/10/2021 con una descrizione della sismicità rilevata.
- il Capitolo 2 descrive il ***monitoraggio delle deformazioni superficiali***. La prima parte del capitolo (Cap. 2.1) descrive la gestione della stazione GNSS OL01 e le elaborazioni svolte sui dati acquisiti. La seconda parte (Cap. 2.2) descrive l'analisi interferometrica delle deformazioni del suolo completa fino alla data del 31/10/2021.
- il Capitolo 3 contiene le ***Conclusioni***.

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

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

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

1. Monitoraggio sismico

1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)

La RMCL è composta da 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 giorno 1/1/2017.

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

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

CODICE	LAT	LON	QUOTA (m s.l.m.)	NOME
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).*

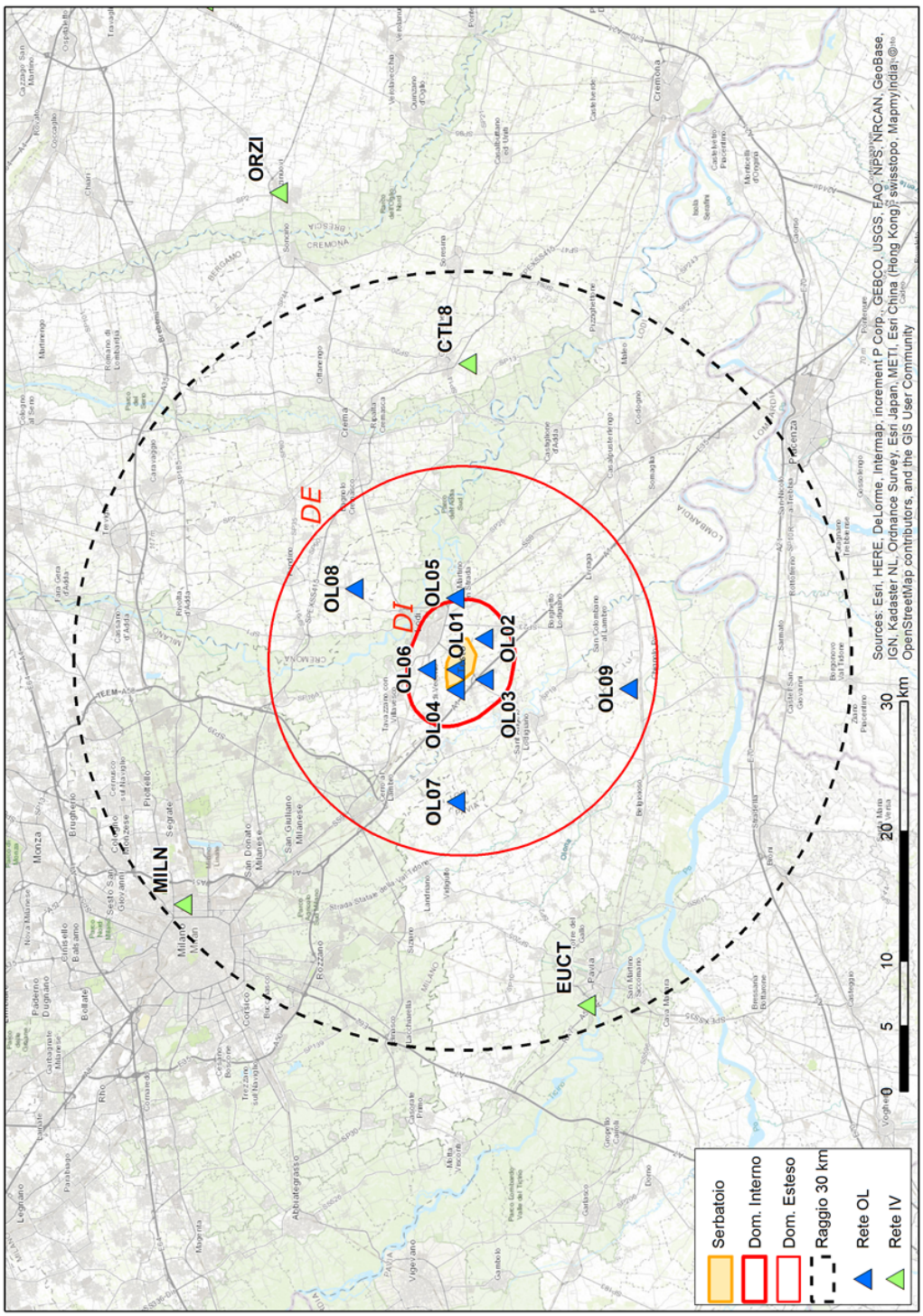


Figura 1 *- Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee 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.*

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

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* sui dischi dei computer dedicati all'acquisizione e archiviati permanentemente su un'unità di archiviazione di rete (NAS di marca QNAP) con capacità complessiva di circa 50 TB che è 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). Dette stazioni sono acquisite in modalità off-line e quindi non entrano direttamente nel sistema in tempo reale. Inoltre, per discriminare più efficacemente gli eventi lontani, anche se di scarso interesse per l'area della concessione di stoccaggio, vengono utilizzate numerose stazioni appartenenti ad altre reti che operano nel Nord Italia, quali la Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale (codice OX) gestita da OGS anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia e la Rete Sismica del Trentino (ST) della Provincia Autonoma di Trento.

Per la rilevazione della sismicità di interesse per lo stoccaggio di Cornegliano Laudense sono state individuate due aree di riferimento che corrispondono ai domini di rilevazione indicati dagli ILG del MiSE (MiSE-UNMIG, 2014). Il Dominio Interno (DI) circonda il serbatoio fino a una distanza di 3 km e il Dominio Esteso (DE) si allarga fino a 15 km dal perimetro esterno del serbatoio. Le aree corrispondenti in superficie ai due domini sono mostrate con linee rosse in Figura 1.

Code	Name	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Net Code
BALD	Monte Baldo (VR)	45.6830	10.8187	1911	OX
BOB	Bobbio (PC)	44.7679	9.4478	910	IV
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	9.7160	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.

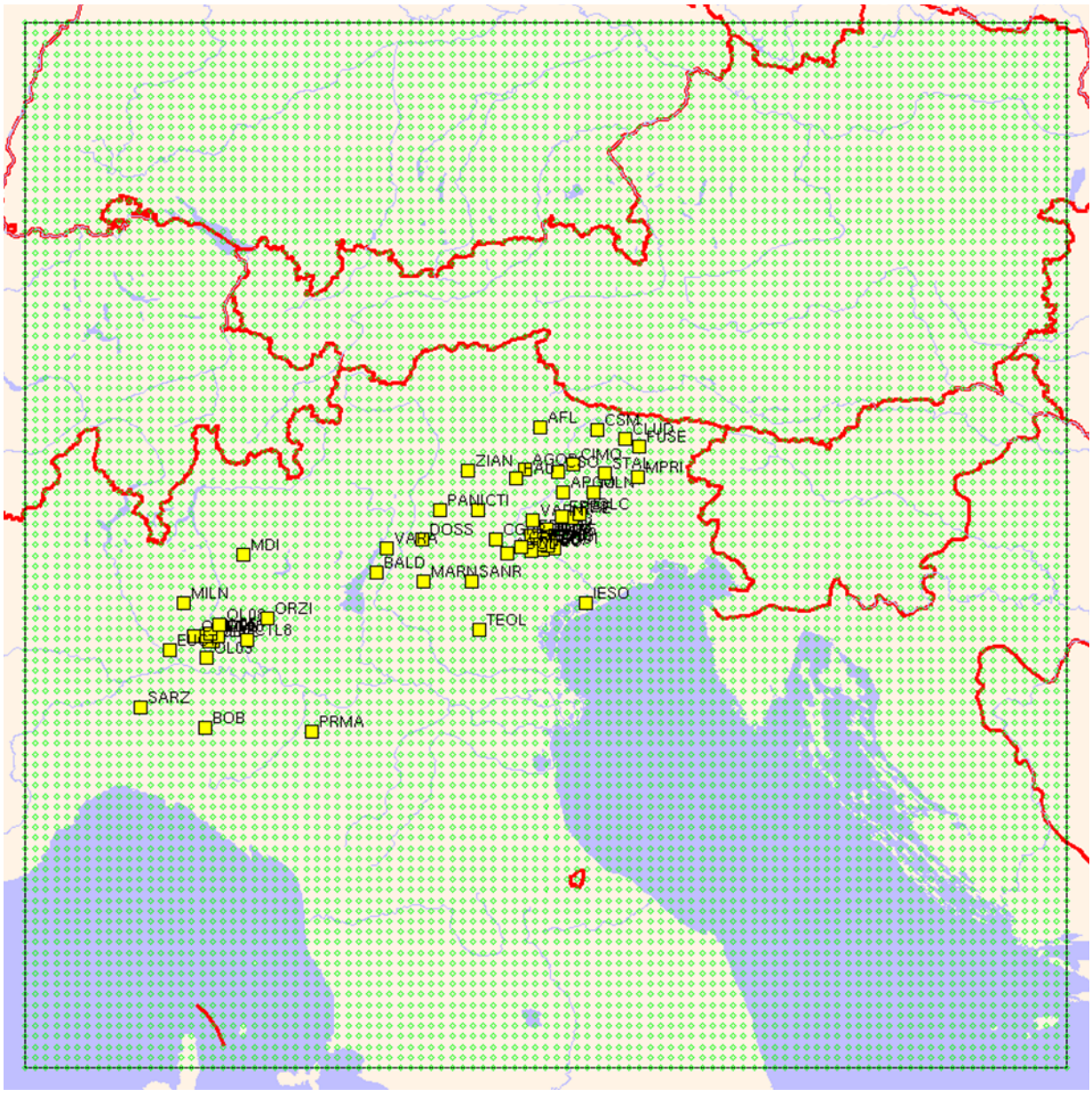


Figura 2 *- Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana si riconoscono le stazioni di INGV più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite dall'OGS 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 della capacità di rilevazione della rete. E' in questa fase che vengono inserite all'interno del sistema le stazioni acquisite da altri enti e non disponibili in tempo reale. Gli strumenti di elaborazione vengono configurati per consentire l'identificazione dei segnali più deboli sfruttando al limite la sensibilità della rete; ciò tuttavia aumenta fortemente il carico computazionale e la rilevazione di falsi eventi a causa dei pochi *trigger* usati. Per questo motivo, a valle delle operazioni di detezione e associazione, è necessario l'intervento di un sismologo, che riconosce gli eventi veri e li discrimina da quelli falsi. Questa operazione è chiamata **tagging**. In pratica, in questa fase gli eventi di interesse per il monitoraggio sismico di Cornegliano Laudense vengono marcati in modo permanente nel sistema. Per gli eventi marcati vengono effettuate le seguenti operazioni specifiche:

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

Le localizzazioni fornite in uscita 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 (Vp), spessore degli strati e rapporto Vp/Vs 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 Vp sia del rapporto Vp/Vs. Ricordiamo che il rapporto Vp/Vs 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 (1/5/2021-31/10/2021) 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.

L'attuale assetto dei gruppi batteria installati sulle stazioni garantisce un'autonomia di oltre due settimane in completa assenza di radiazione solare, mentre il gruppo di batterie della stazione OL01 è stato modificato e aumentato in quanto a capacità e tensione, in considerazione del maggior consumo indotto da strumentazione aggiuntiva rispetto alle stazioni standard. Qui infatti sono presenti anche un GPS geodetico, una scheda sperimentale di controllo remoto ed altre componenti elettroniche.

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

Per quanto riguarda l'esercizio delle stazioni, è stata effettuata solamente l'ordinaria manutenzione operata da remoto, pertanto nella Tabella 5 non è stato riportato alcun intervento in loco a differenza dei precedenti periodi.

Data	Stazione	Intervento
…	…	Nessun intervento in loco nel periodo 01/05/2021-31/10/2021
…	…	…

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

1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio

Nel periodo 1/5/2021-31/10/2021 la RMCL ha rilevato due eventi sismici nei domini di rilevazione, uno nel Dominio Interno, corrispondente all'area contenuta entro 3 km dal serbatoio, e uno nell'Area Esterna. Il primo evento, di magnitudo ML 0.5, si è verificato il 14/08/2021 nel comune di Lodi Vecchio ad una profondità di circa 2 km e a una distanza di circa 6 km dall'impianto di stoccaggio. Il secondo evento, di magnitudo ML 2.8, si è verificato il giorno 11/10/2021 ad una profondità di circa 30 km e nell'Area Esterna. Quest'ultimo evento sismico rientra nel quadro di sismicità profonda già documentato per l'area (Peruzza et al., 2021) ed è stato localizzato similmente nell'area anche dalla Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale (RSI) (http://www.distav.unige.it/rsni/pg-man-loca.php?var1=210221085409&lang=it).

Nella Figura 3 riportiamo la mappa con gli eventi sismici rilevati a partire dal 1/11/2017. La lista completa di tutti gli eventi rilevati a partire dal 1/11/2017 con i loro parametri è riportata nella Appendice B. Gli eventi sismici sopra descritti sono localizzati nell'Area Esterna e quindi non associabili alle attività di stoccaggio.

La Figura 4 mostra, a titolo di esempio, i sismogrammi registrati dalla rete per l'evento ML 2.8 del 11/10/2021 ore 23:18:21 avvenuto nell'Area Esterna. La distanza epicentrale delle stazioni visualizzate è compresa tra 2 e 17 km.

La Figura 5 mostra i dati medi dell'attività di stoccaggio del gas con un campionamento orario. I tre grafici rappresentano (a) la pressione media (unità in bar) misurata al collettore dei pozzi, (b) la portata (milioni di standard m^3 giorno) durante le attività dell'impianto e (c) il volume. 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 avuto l'effetto di ridurre l'accumulo locale di stress. Il pannello (c) della 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.

(a)

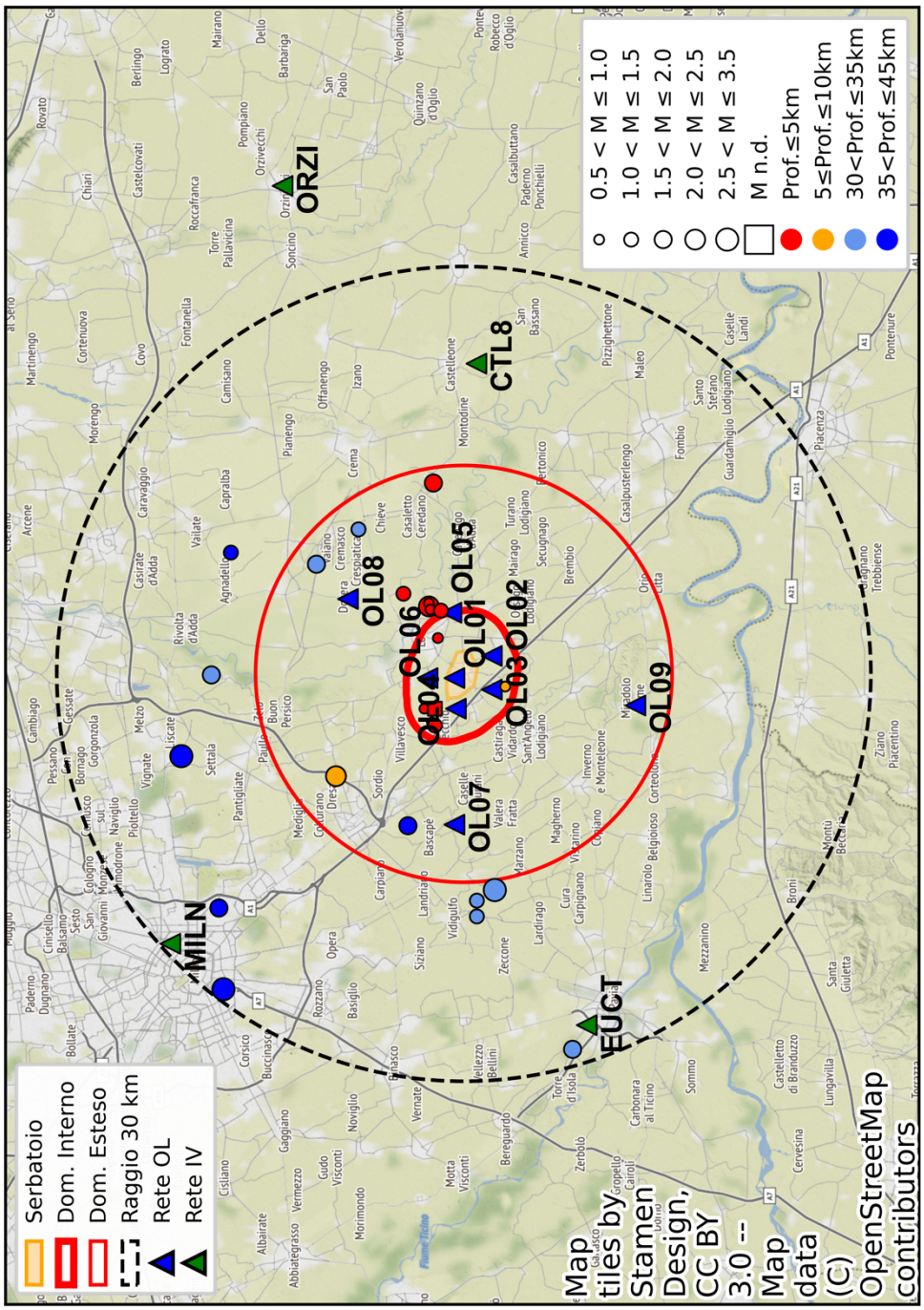


Figura 3 *- Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-31/10/2021, a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione.*

(b)

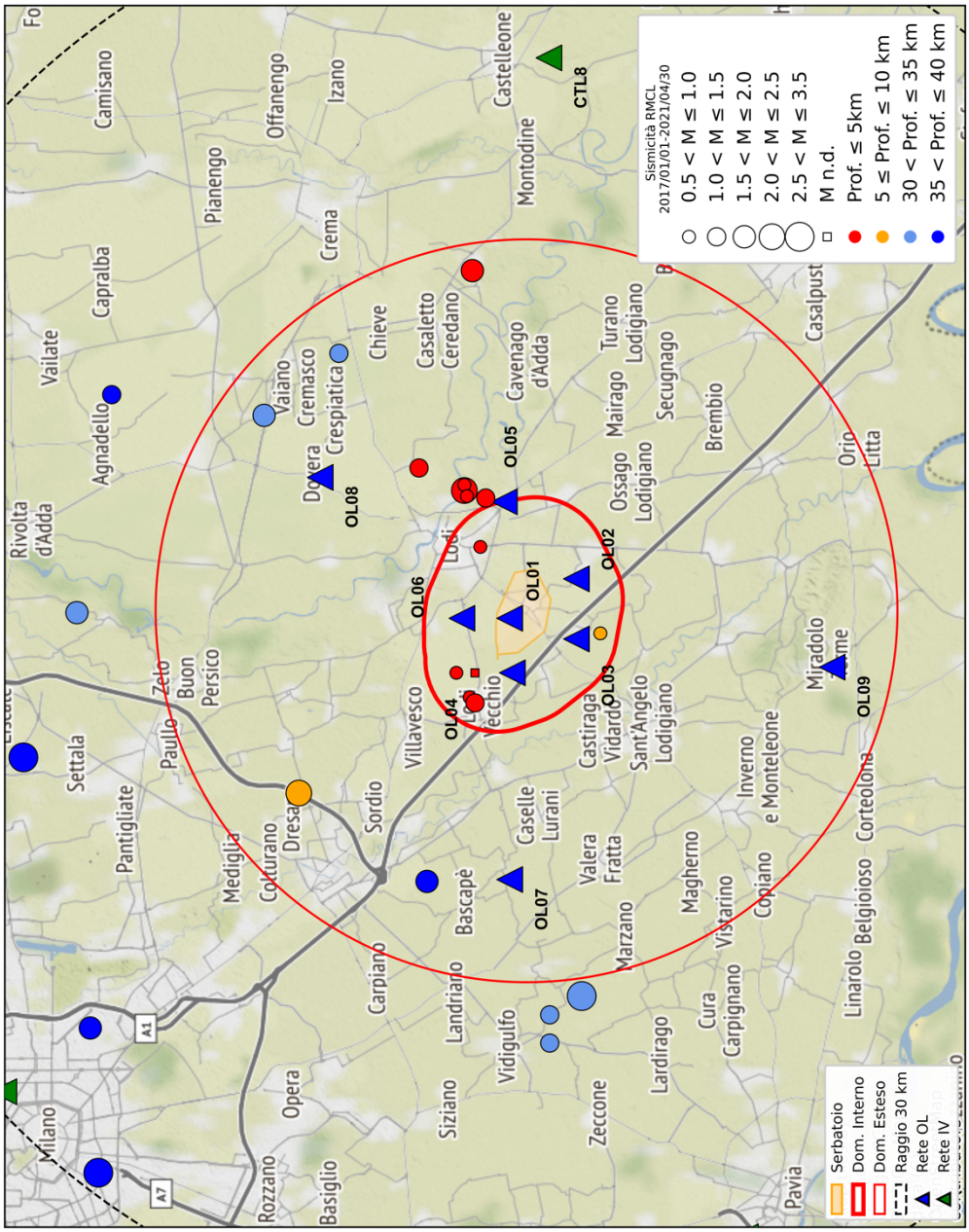


Figura 3 *– Continua dalla pagina precedente.*

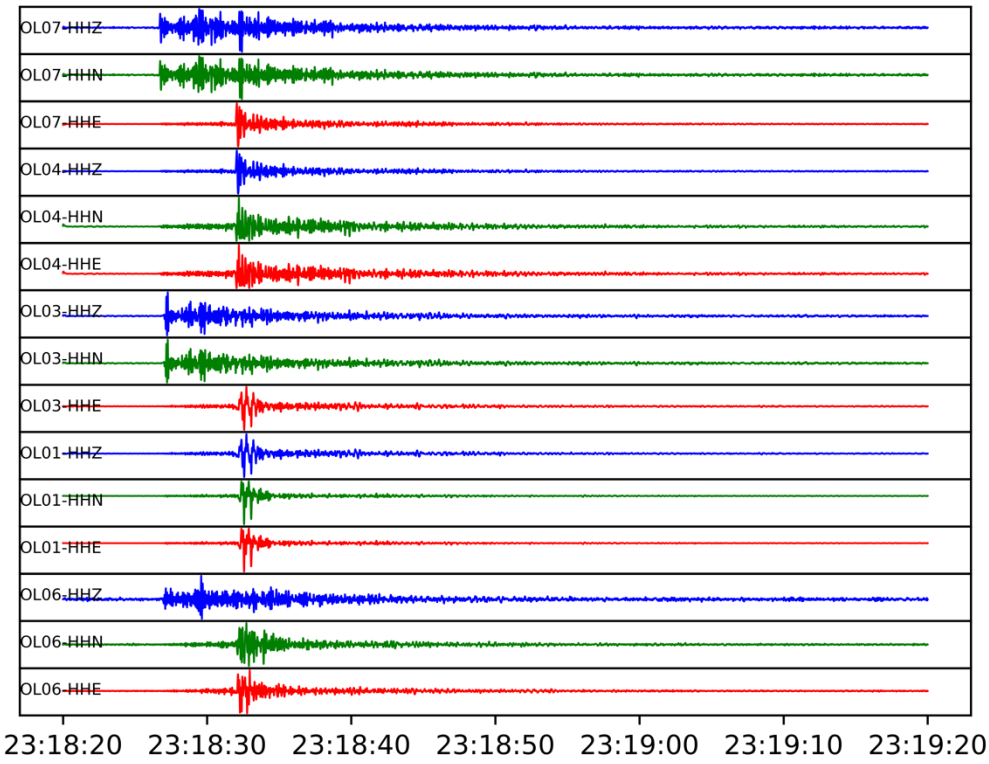
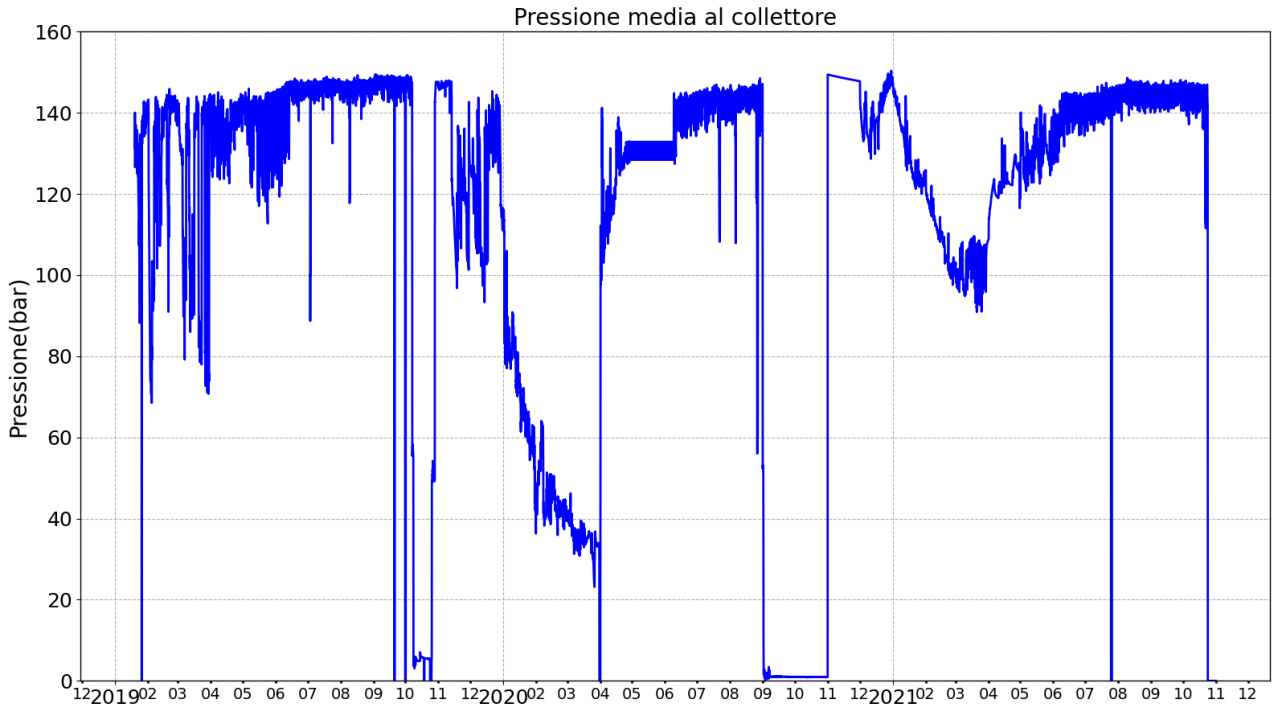


Figura 4 *- Forme d'onda registrate per l'evento ML2.8 del 11/10/2021 ore 23:18:21 avvenuto nell'Area Esterna. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL07, OL04, OL03, OL01 e OL06.*

(a)



(b)

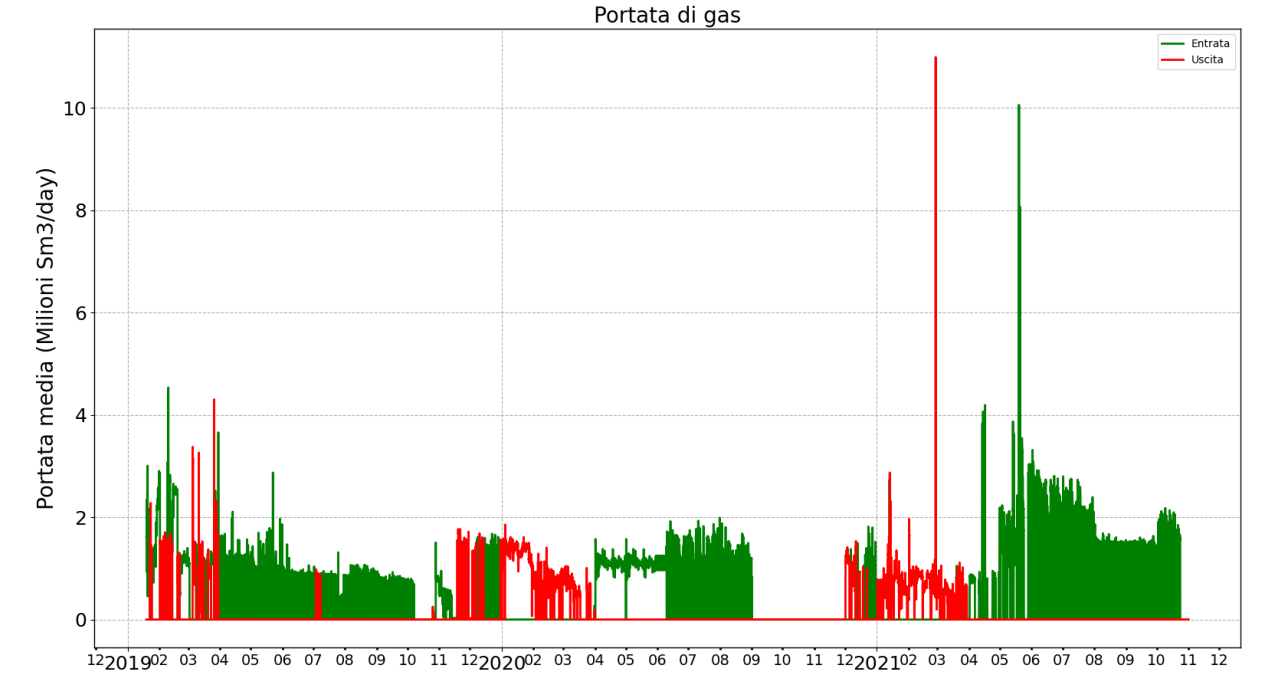


Figura 5 *– (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard al giorno) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in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

(c)

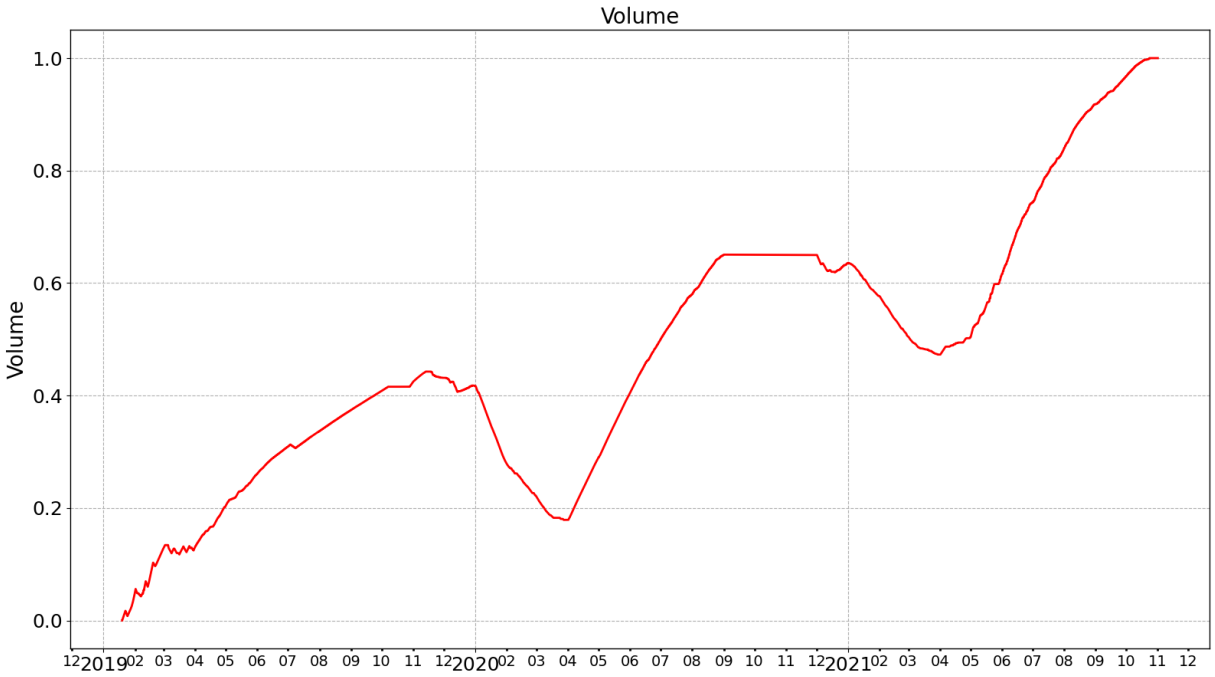


Figura 5 *– Continua dalla pagina precedente.*

2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali

2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01

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

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

- il sistema di riferimento globale ITRF08 (*International Terrestrial Reference Frame 2008*, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/), riferito al centro di massa della Terra con asse Z passante per l'asse terrestre e assi X e Y giacenti sul piano equatoriale. L'epoca di riferimento per le soluzioni dell'ITRF08 è il 2008.
- il sistema di riferimento europeo EURA (Altamimi et al., 2012), che evidenzia i movimenti della crosta terrestre rispetto alla placca euroasiatica, considerata come un blocco fisso. In questo modo, la rappresentazione dello spostamento non risente del movimento delle grandi placche a livello globale, ma si riferisce alla sola placca europea, permettendo un'analisi dei movimenti tettonici a scala regionale e locale, di maggiore interesse in relazione all'attività di stoccaggio del gas.

In questo lavoro, l'intervallo di tempo considerato è 01/01/2017 - 31/10/2021.

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.

2.1.1 Dati elaborati

Il *dataset* della stazione OL01 viene registrato in file di formato RINEX ed è disponibile in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane).

Le osservazioni di OL01, così come quelli delle altre stazioni GNSS, vengono elaborate

con il pacchetto software GAMIT/GLOBK, sviluppato dal Massachusetts Institute of Technolology (web.mit.edu), dall' Harvard University (www.harvard.edu) e dallo Scripps Institution of Oceanography (scripps.ucsd.edu). In questo lavoro, abbiamo utilizzato una versione aggiornata di GAMIT/GLOBK (Ver 10.71, http://geoweb.mit.edu/gg/) a partire dall'elaborazione del giorno 15/06/2020.

Sono stati elaborati i dati disponibili fino al giorno 31/10/2021, inserendo nel calcolo modelli atmosferici (Tregoning et al., 2005), prodotti dal MIT (Massachusetts Institute of Technology) e disponibili sui repository internazionali con un ritardo compreso tra le due e le tre settimane (ftp://everest.mit.edu).

Dalle serie temporali di OL01 si nota sia la mancanza di dati all'inizio dell'anno 2017 dovuta a problemi riconducibili all'alimentazione del ricevitore GNSS, ma successivamente risolti, sia 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.

I dati RINEX di OL01 registrati dal 01/01/2017 fino al 31/10/2021 sono 1404, così come le giornate elaborate. L'elaborazione dei dati ha infatti prodotto, per OL01, 1386 soluzioni pari all'utilizzo del 98,72% dei dati iniziali, e ciò indica la disponibilità di un *dataset* sufficientemente completo e adatto all'elaborazione con il pacchetto GAMIT/GLOBK.

La stazione GNSS OL01 è stata inquadrata all'interno di una rete di stazioni permanenti denominata Rete GNSS LODI (Figura 6), appartenenti al Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia (Rete SPIN):

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

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

Le stazioni della Rete GNSS LODI sono a loro volta inquadrate nel sistema ETRF2000(2008.0), adottato da SPIN in conformità alla Rete Dinamica Nazionale (RDN) gestita dall'Istituto Geografico Militare (IGM). Il risultato dell'inquadramento della stazione OL01 è mostrato in Tabella 6. Per il calcolo delle serie temporali, a fianco della Rete GNSS LODI, sono state utilizzate le stazioni GNSS appartenenti alla Rete SPIN e le stazioni di riferimento gestite dall' International GNSS Service (IGS, https://www.igs.org/network/).

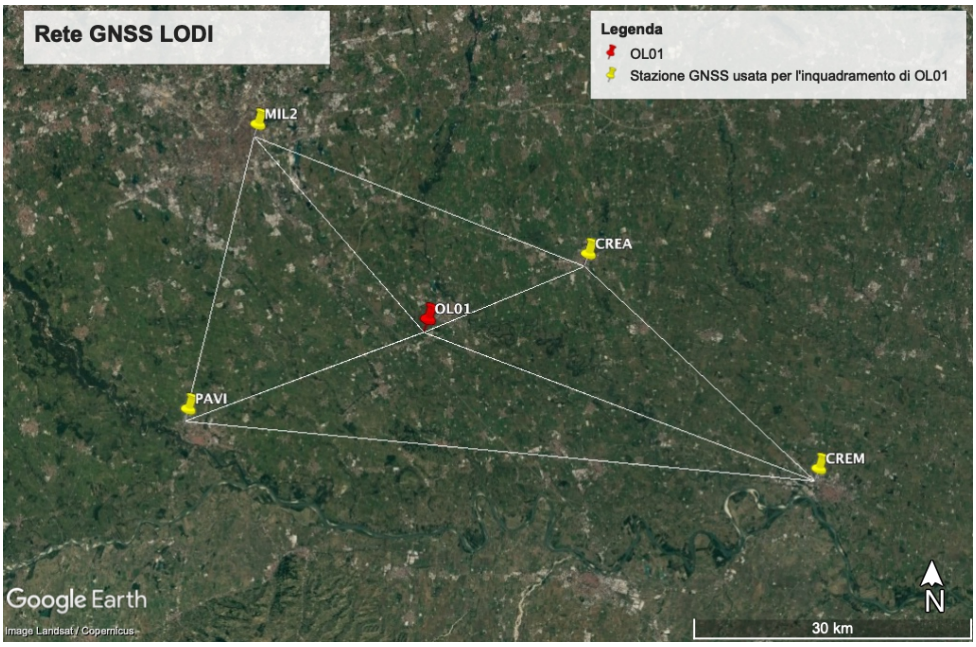


Figura 6 *- Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadramento di OL01. Queste stazioni sono MIL2 (Milano), PAVI (Pavia), CREM (Cremona) e CREA (Crema).*

SITE CODE	**LOCALITA'**	**RICEVITORE**	**ANTENNA**	**LATITUDINE** **LONGITUDINE**	**QUOTA [m]**
CREA	Crema	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GGD CONE	45° 21' 15,592537'' N 9° 41' 07,096872'' E	129,818
CREM	Cremona	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GGD CONE	45° 08' 47.927515'' N 10° 00' 07.025904'' E	102,733
MILA	Milano	TPS NET-G3 (GPS+GLO)	TPSCR3_GGD CONE	45°28'47,94818"N 9°13'45,62699"E	187,275
MIL2	Milano	TPS NET-G3A (GPS+GLO)	TPSCR.G3 TPSH	45° 28' 42,127070'' N 9° 13' 45,166341'' E	191,125
PAVI	Pavia	TPS NET-G5 (GPS+GLO)	TPSCR3_GGD CONE	45° 12' 10.732233'' N 9° 08' 10.104212'' E	143,638
OL01	**Cornegliano Laudense**	**TPS NET-G5 (GPS+GLO)**	**CR-G5 (TPSH)**	**45°17'28,17435"N** **9°27'53,47318"E**	**121,254**

Tabella 6 *- Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, PAVI e 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 01/01/2017 - 31/10/2021.

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 7-13) Nel sistema internazionale gli spostamenti e le velocità sono stimati rispetto a un sistema inerziale geocentrico che mostra i moti delle placche litosferiche rispetto al centro della Terra. Le stime di velocità sono calcolate attraverso un *fit* lineare sull'intera serie temporale degli spostamenti e quindi rappresentano un valore medio della velocità sull'intervallo considerato. I valori delle velocità sono abbastanza importanti e, ad esempio, per la componente orizzontale, si attestano su alcune decine di mm/anno per tutti i siti GNSS. Nel sistema EURA (Altamimi et al., 2012), gli spostamenti delle placche vengono stimati rispetto al blocco europeo (o Eurasia), per cui a ciascun sito della rete è sottratto il moto medio della placca europea. Nel sistema EURA quindi le velocità sul piano orizzontale sono nettamente ridotte rispetto a quelle in ITRF e sono dell'ordine di alcuni mm/anno. I grafici delle serie temporali consentono un'analisi più dettagliata del comportamento di ciascuna stazione GNSS; in tal modo si ha una stima del movimento della stazione prima dell'attività di stoccaggio.

Confrontando le serie delle stazioni della Rete GNSS LODI, si nota che queste hanno un andamento congruente tra i sistemi ITRF (Figure in Appendice C) e EURA (Figure 7-13). La stazione OL01 presenta uno spostamento marcato verso Nord e verso Ovest e un trend deformativo verticale positivo verso l'alto, presente già nell'ultima relazione (Priolo et al., 2021). Nel periodo preso in considerazione in questo lavoro, l'oscillazione sulla verticale è più accentuata, a partire approssimativamente dal giorno 180 (29 giugno) del 2021 (Figura 7).

La Tabella 7 mostra le velocità stimate dal *fit* delle serie temporali considerando il periodo 01/01/2017 – 31/10/2021. Nel sistema di riferimento ITRF, le velocità stimate nelle componenti orizzontali sono simili (variano meno di 2 mm/anno) per tutte le stazioni GNSS, con valori dai 15.9 mm/anno di CREA ai 17.7 mm/anno di OL01 in direzione Nord, e dai 19.3 mm/anno di OL01 ai 20.8 mm/anno di CREM in direzione Est. Nella direzione verticale, il range di variazione fra le stazioni è di quasi 5 mm/anno, con valori che vanno dai -1 mm/anno di MILA ai 4 mm/anno di OL01 (3.97 mm/anno, Fig. C1). L'aumento maggiore rispetto ai valori riportati nella precedente relazione è registrato proprio nella componente verticale dalla stazione OL01 (4 mm/anno, rispetto ai 2.1 mm/anno riportati in Priolo et al., 2021).

Nel riferimento Euroasiatico (EURA), come indicato nella Tabella 7, i valori di velocità stimati nelle componenti orizzontali sono compresi, nella direzione Nord, fra 0.1 mm/anno (CREA) e 1.8 mm/anno (OL01), e fra -0.7 mm/anno (OL01) e 0.6 (CREM) mm/anno. Anche qui, confrontando i valori di velocità della stazione OL01 con quelli

stimati nella precedente relazione, si osserva che, con i nuovi dati che arrivano fino al 31/10/2021, OL01 presenta un tasso di variazione della verticale più accentuato.

Si nota che, tra le stazioni attorno a OL01, la stazione MIL2 registra una velocità anche di 2 mm superiore alle altre nella componente verticale. Questo potrebbe essere dovuto dovuto al fatto che la stazione è ancora troppo "giovane" (meno di tre anni di dati) per poter essere correttamente stabilizzata in tutte le sue componenti. Blewitt e Lavallée (2002) hanno infatti stimato che, se 2.5 anni di dati sono il tempo minimo necessario per avere delle velocità accettabili, per misurazioni precise in campo tettonico e geofisico, si dovrebbe disporre almeno di 4.5 anni di dati per essere certi che eventuali *bias* nelle velocità siano trascurabili.

	ITRF08			**EURA**		
	Vel. Nord [mm/anno]	**Vel. Est [mm/anno]**	**Vel. Up [mm/anno]**	**Vel. Nord [mm/anno]**	**Vel. Est [mm/anno]**	**Vel. Up [mm/anno]**
OL01	**17.7**	**19.3**	**4.0**	**1.8**	**-0.7**	**3.9**
CREA	15.9	20.4	0.6	0.1	0.4	0.5
CREM	16.5	20.8	0.2	0.7	0.6	0.1
MILA	16.2	20.2	-1	0.4	0.2	-1
MIL2	16.4	19.9	1.9	0.5	0.0	1.9
PAVI	16.2	20.5	0.4	0.3	0.5	0.3

Tabella 7 *- Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. Le stime ottenute per la stazione OL01 sono indicate in grassetto e colore rosso. Si ricorda che la migliore accuratezza nella stima delle velocità che si può raggiungere, considerando serie temporali lunghe e monumentazione stabile, è di 0.2 mm/anno sulle componenti orizzontali e 0.5 mm/anno sulla verticale (Masson et al., 2019).*

Un ulteriore passo nelle analisi dei dati è stato realizzato per mettere in luce eventuali anomalie locali sulla stazione OL01 che possano essere messe in relazione con lo stoccaggio di gas nel serbatoio.

Ipotizzando che il moto delle stazioni attorno a OL01, ovvero delle stazioni CREA, CREM, PAVI, MILA e MIL2, sia rappresentativo del trend tettonico della zona, abbiamo stimato il trend di queste stazioni, ne abbiamo calcolato la media e l'abbiamo sottratta alla serie temporale di OL01, giorno per giorno nelle tre componenti. In questo modo, il segnale residuo su OL01 rappresenta il comportamento locale della stazione stessa. Il risultato è riportato in Figura 14.

Dalla Figura si nota che la stazione di OL01 registra un comportamento distinto da quello delle stazioni circostanti a partire dalla seconda metà del 2019, mostrando uno spostamento orizzontale in direzione Nord-Ovest e verticale verso l'alto. Questo comportamento si è accentuato ulteriormente nel periodo estivo del 2021, come già accennato precedentemente. Si ricorda che un trend deformativo verso l'alto è stato rivelato anche dalle immagini InSAR, ed è stato descritto in Priolo et al. (2021).

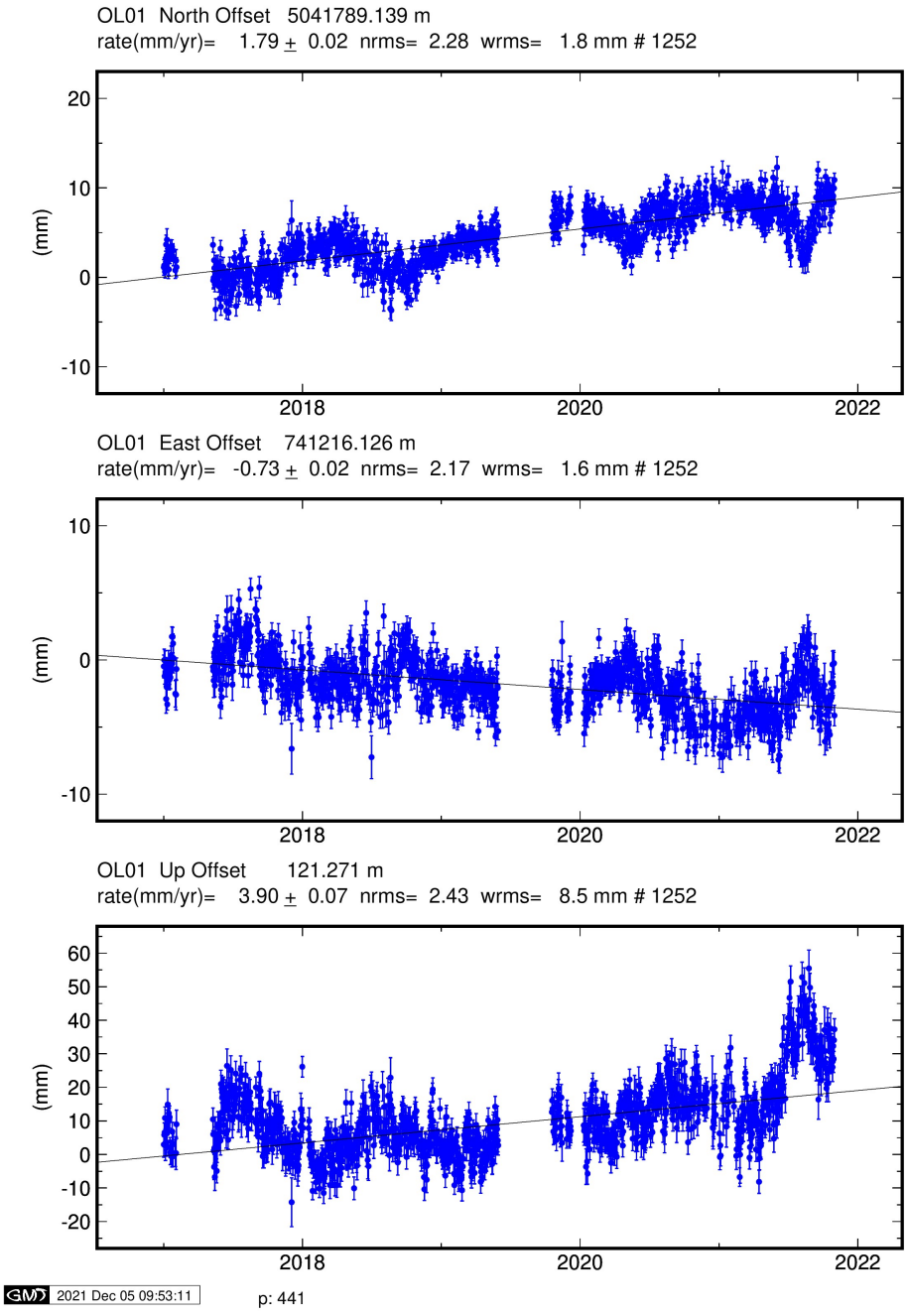


Figura 7 *- Serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. La retta interpolante sui grafici fornisce una stima di velocità con il relativo errore, visibile anche in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).*

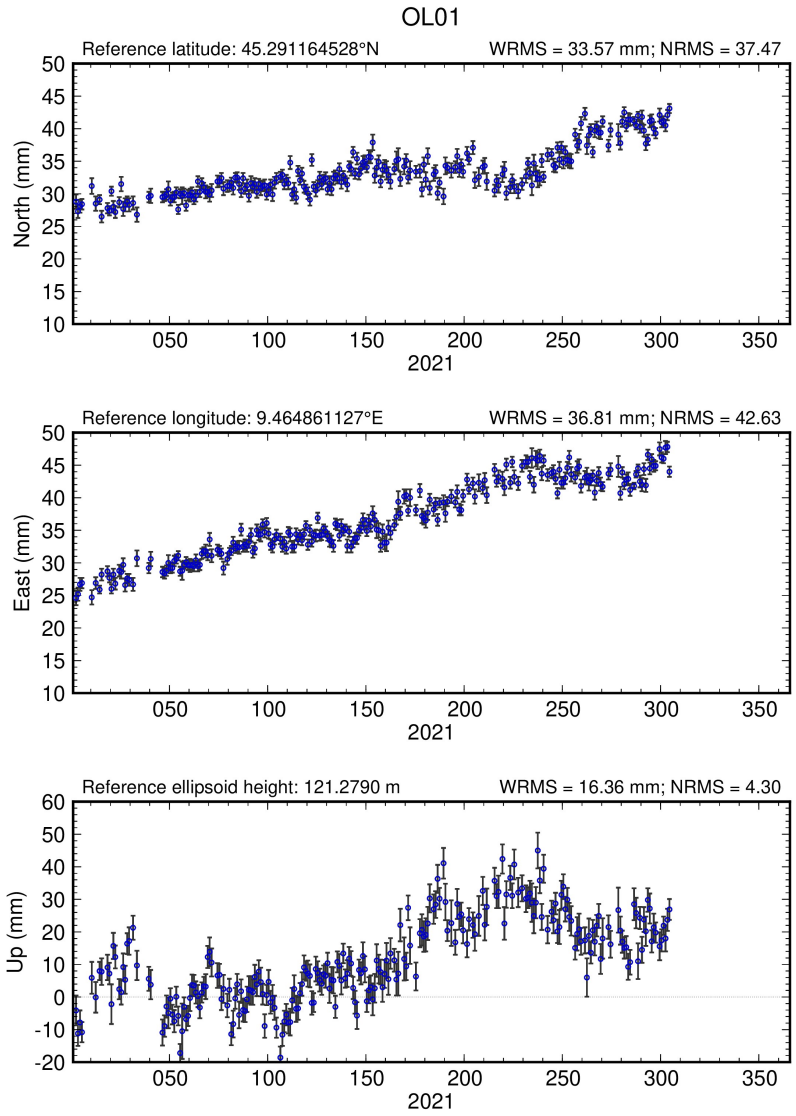


Figura 8 *- Zoom della serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) nel periodo dal 01/01/2021 al 31/10/2021.*

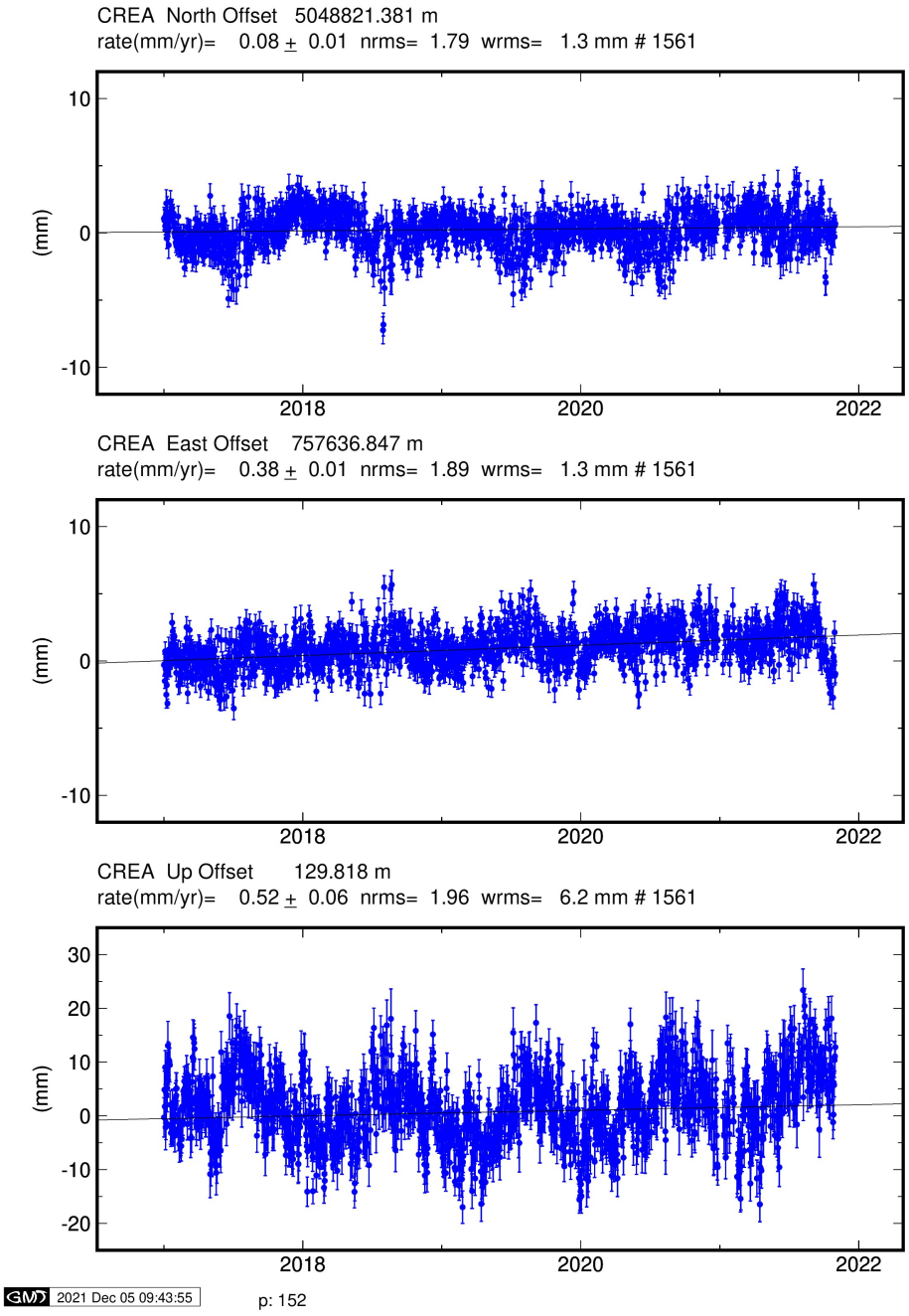


Figura 9 *- Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7.*

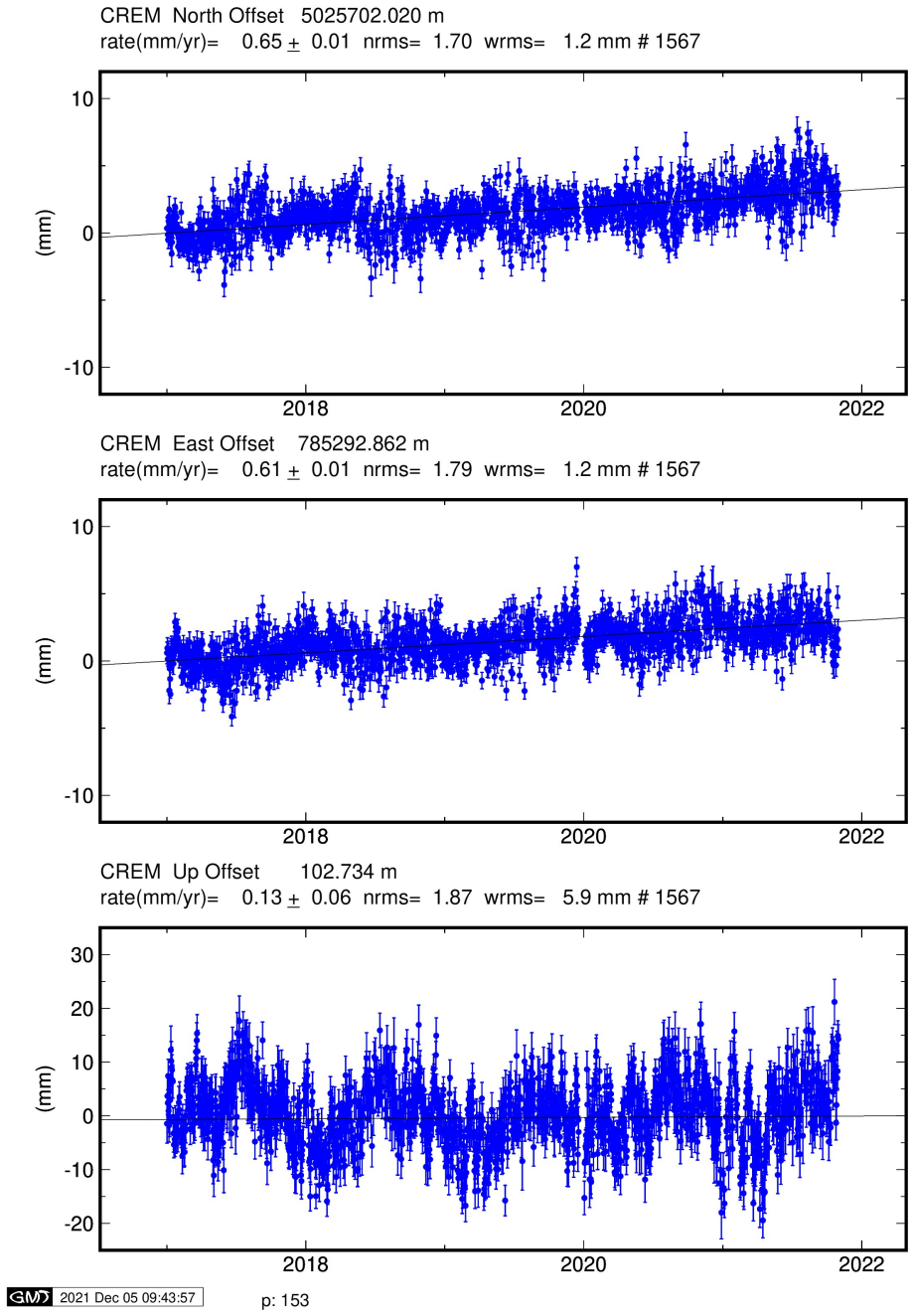


Figura 10 *- Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7.*

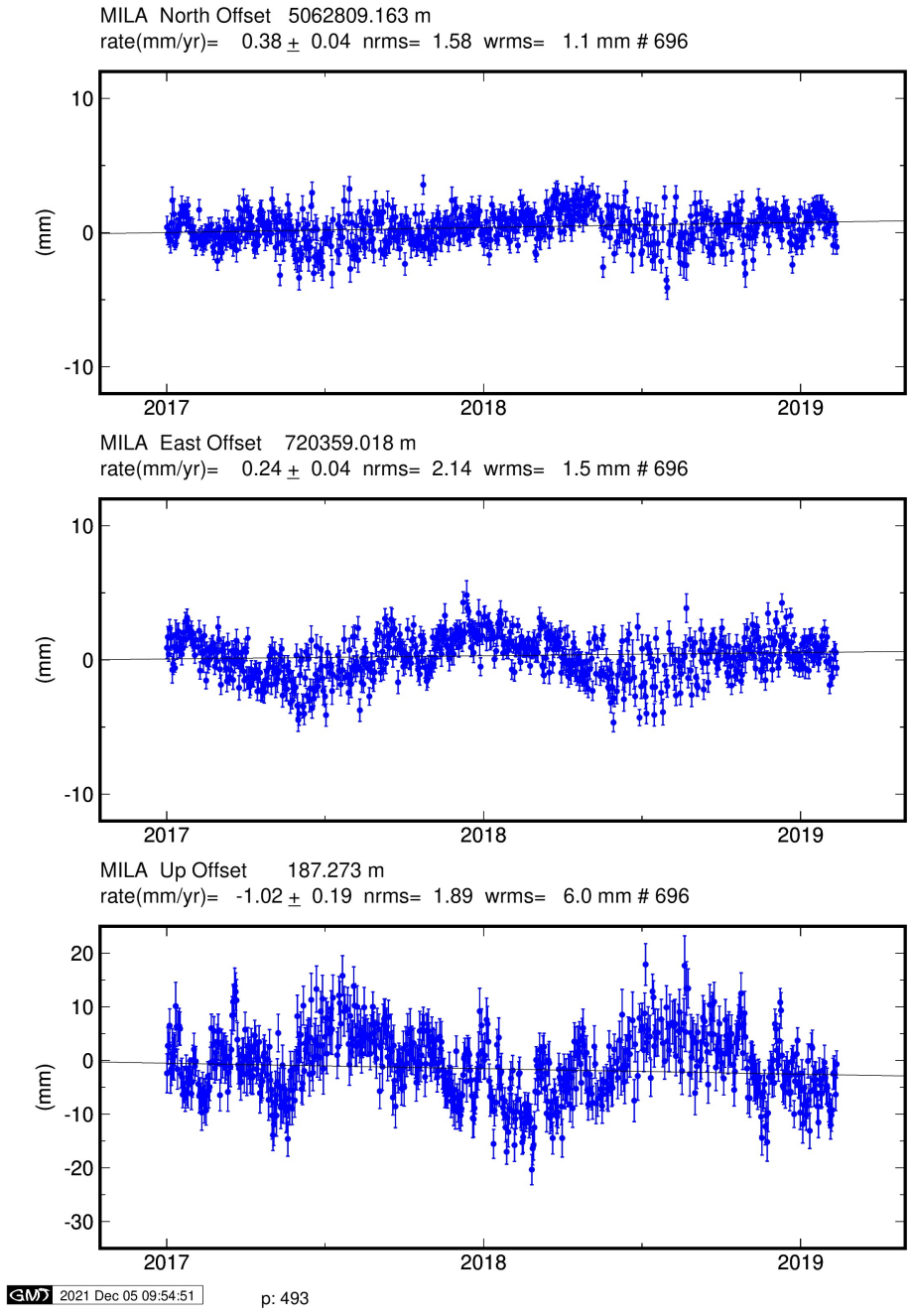


Figura 11 *- Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7.*

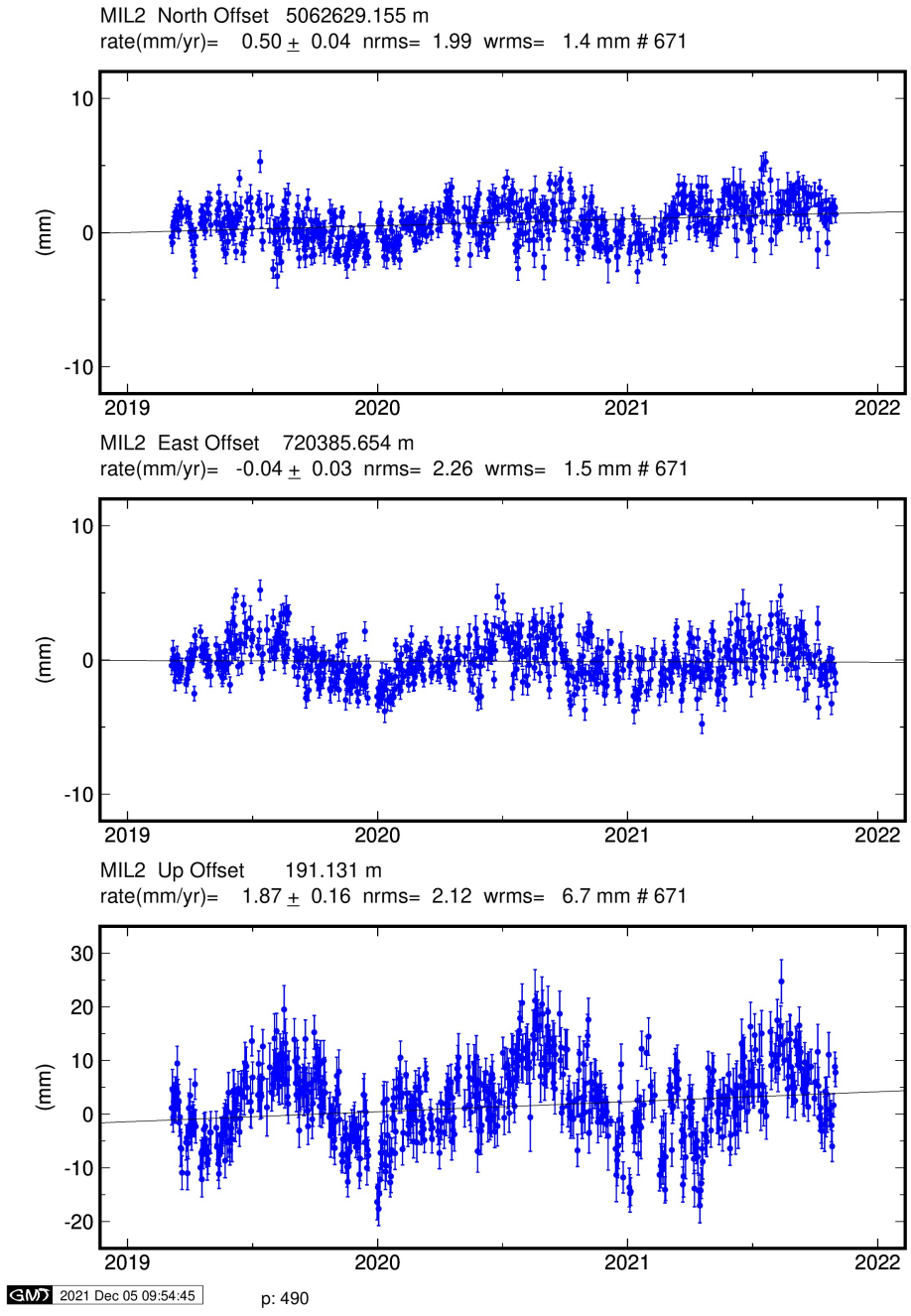


Figura 12 *- Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7.*

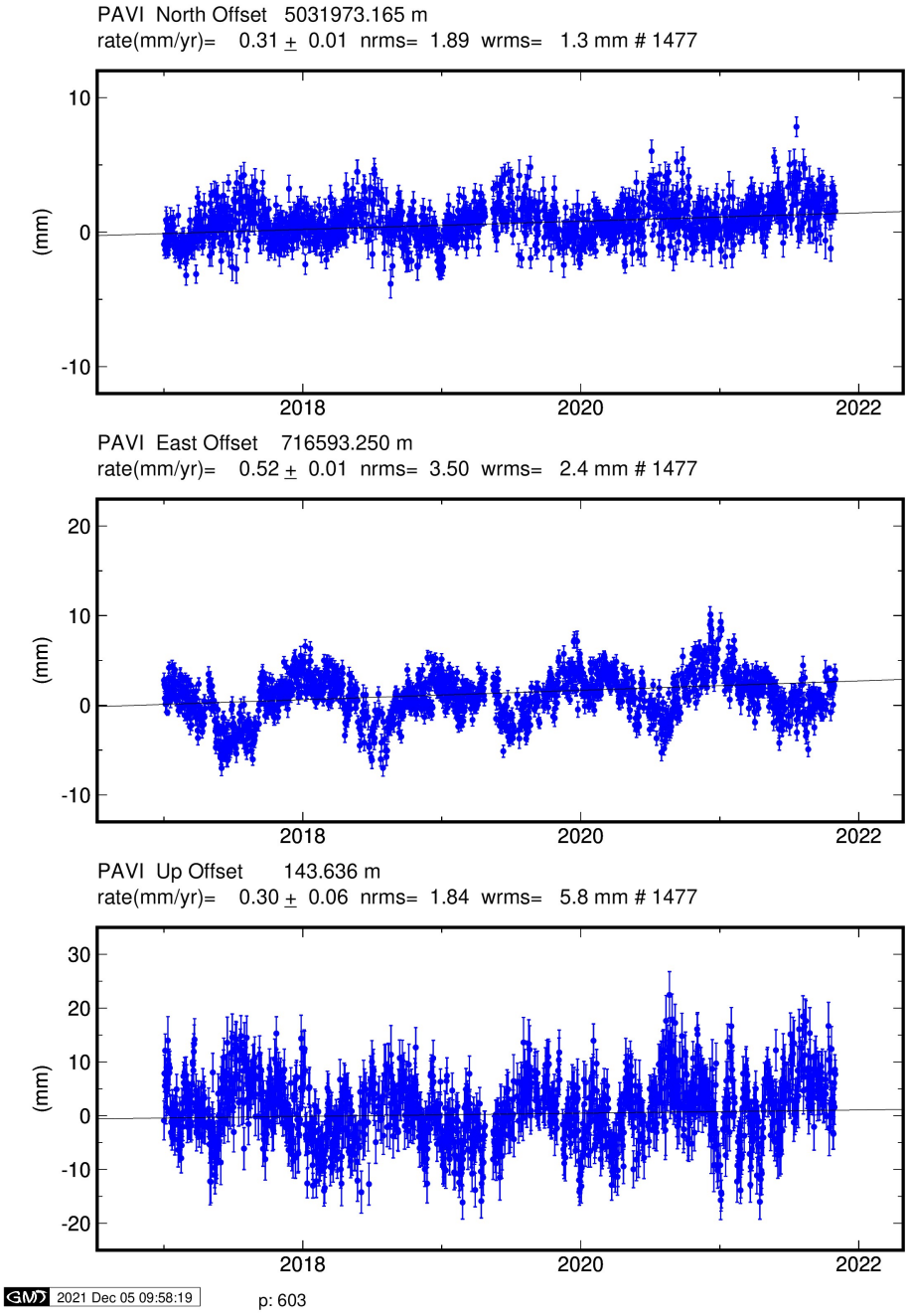


Figura 13 *- Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle della Figura 7.*

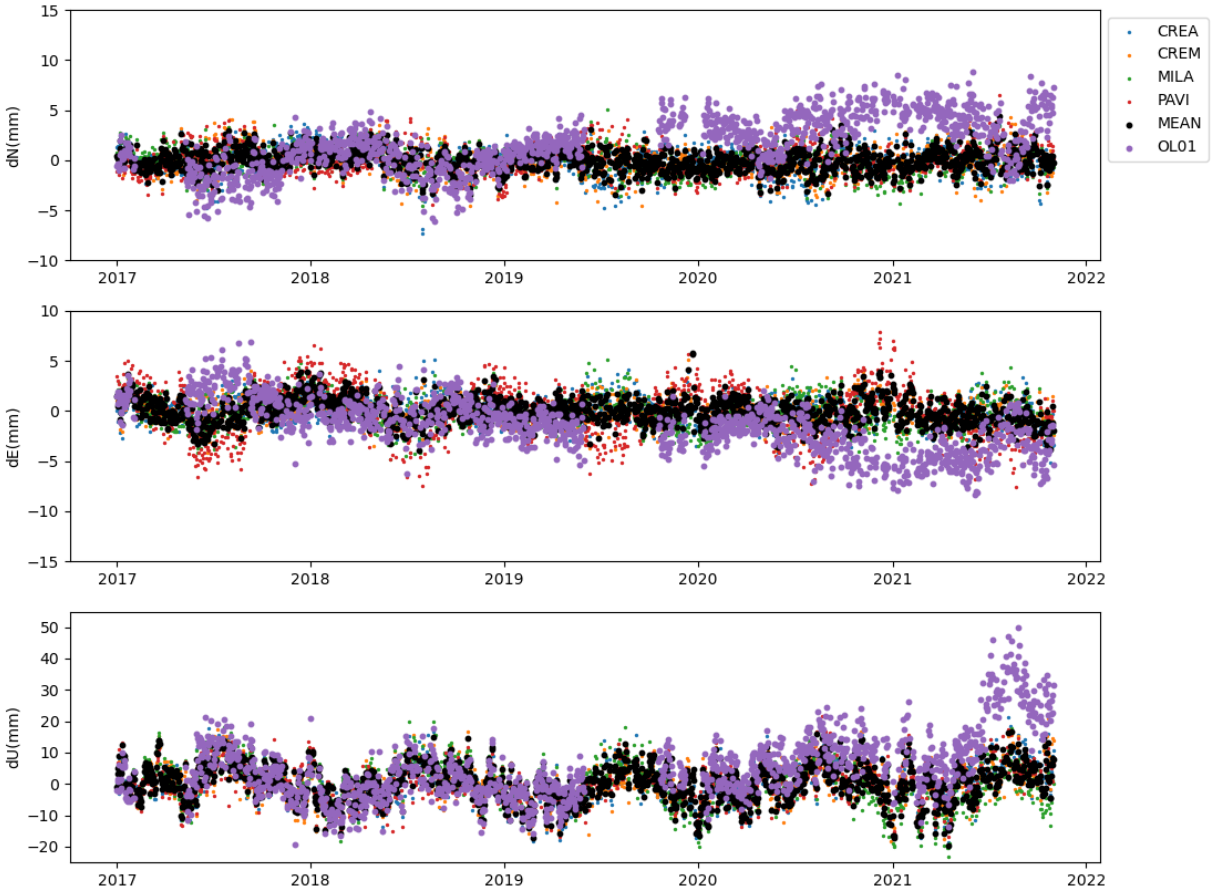


Figura 14 *- Residui delle serie temporali NORTH, EAST, UP delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. I colori utilizzati per le stazioni di riferimento sono: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2021); OL01 (LODI), punti viola. I valori rappresentati sul grafico sono stati ottenuti sottraendo a ciascuna delle serie temporali il proprio trend (calcolato nel sistema ITRF). In viola, in primo piano, la stazione OL01 a cui è stato tolto il trend medio delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per "agganciare" le serie temporali ed evidenziare, graficamente, l'anomalia di OL01 abbiamo considerato come zero la media di OL01 calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati).*

2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2021 (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 338 immagini acquisite lungo orbite ascendenti e 350 lungo orbite discendenti, relative al periodo marzo 2015 – ottobre 2021; in Figura 15 è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 942 e 988 interferogrammi differenziali, a partire dai quali sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

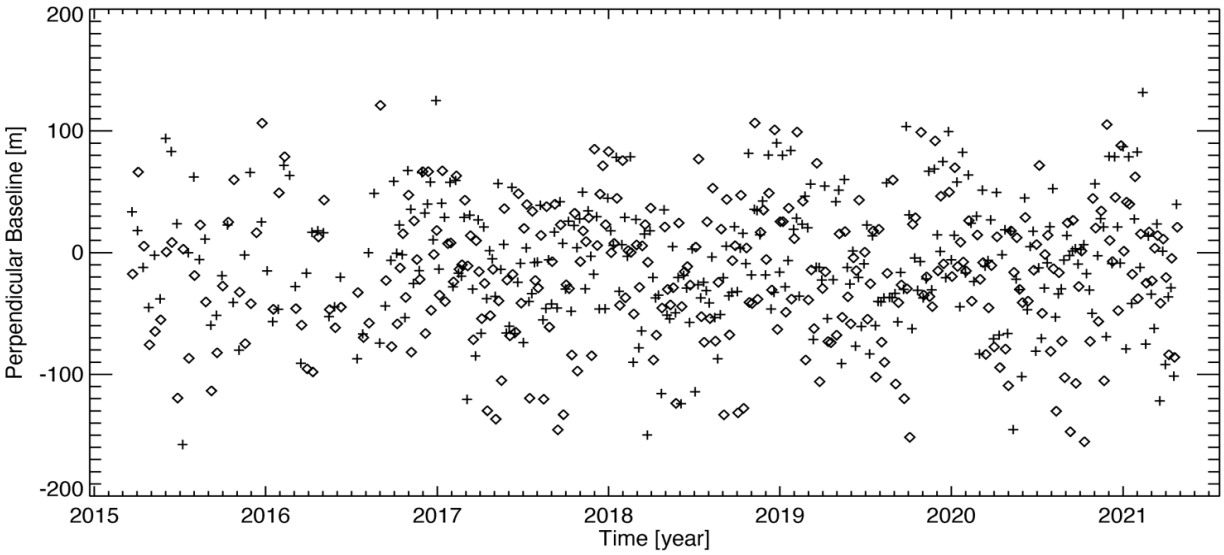


Figura 15 *- Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.*

Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato il DEM SRTM dell'area con uno spacing di circa 30 m (1 arcsec). Sia gli interferogrammi differenziali, sia le successive mappe e serie temporali di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 30 m x 30 m, ottenuta a valle di un'operazione di multilooking, e sono stati campionati sulla stessa griglia del DEM utilizzato per l'elaborazione. L'estensione spaziale dell'area analizzata è di circa 190 km x 70 km. E' stata inoltre effettuata una

validazione dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS rese disponibili da OGS.

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

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

Si sottolinea che tutti i risultati mostrati fanno riferimento all'area comune ed ai pixel comuni alle analisi effettuate sui dati acquisiti dalle orbite discendenti ed ascendenti da parte dei satelliti Sentinel-1A (S-1A) e Sentinel-1B (S-1B) che compongono la costellazione. Si segnala inoltre che, al fine di minimizzare quanto più possibile eventuali effetti di rumorosità (decorrelazione) presenti nei risultati, ai prodotti interferometrici finali è stata applicata una soglia di coerenza pari a 0.99. In Tabella 8 sono indicate le principali caratteristiche comuni ai due dataset S-1 utilizzati, mentre in Tabella 9 sono riportati i dettagli di ciascun dataset (numero di acquisizioni e interferogrammi considerati, e il corrispondente intervallo temporale).

Lunghezza d'onda	5.56 cm
Risoluzione spaziale nominale	~ 20 m x 4 m
Risoluzione spaziale dei risultati interferometrici	~ 30 m x 30 m
Estensione spaziale	~190 km x 70 km
Periodo di osservazione	marzo 2015 – ottobre 2021

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

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-28/10/2021	350	988
Ascendente	23/03/2015-29/10/2021	338	942

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 2021)

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 350 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – ottobre 2021 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in Figura 16. Grazie ad essi sono stati generati 988 interferogrammi differenziali, a partire dai quali sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in Figura 17, dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione, proiettata lungo la linea di vista del sensore, di seguito indicata come Line of Sight (LOS), e sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione non può essere considerata affidabile, non sono mostrati.

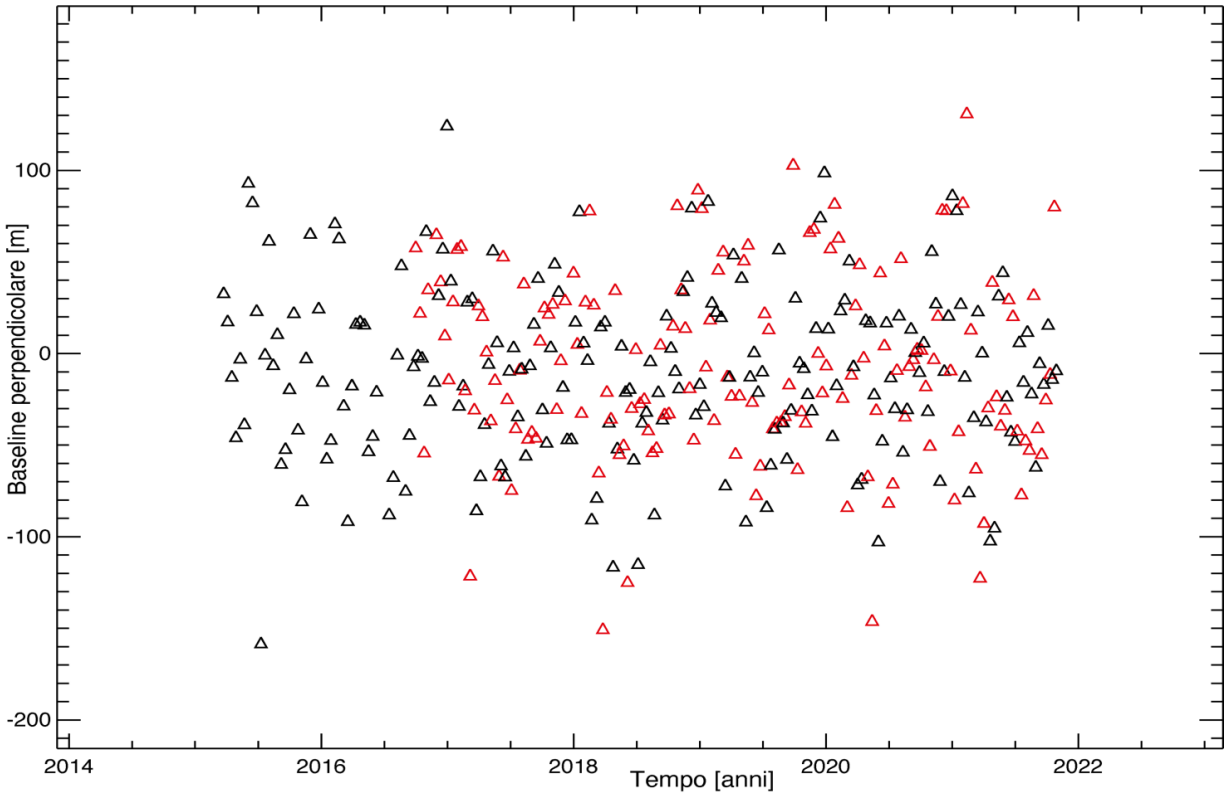


Figura 16 *- Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.*

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GPS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in Figura 3 sono evidenziate le posizioni delle tre stazioni GPS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline nere) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i

grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina rossa nel riquadro bianco indica la posizione del sito di stoccaggio.

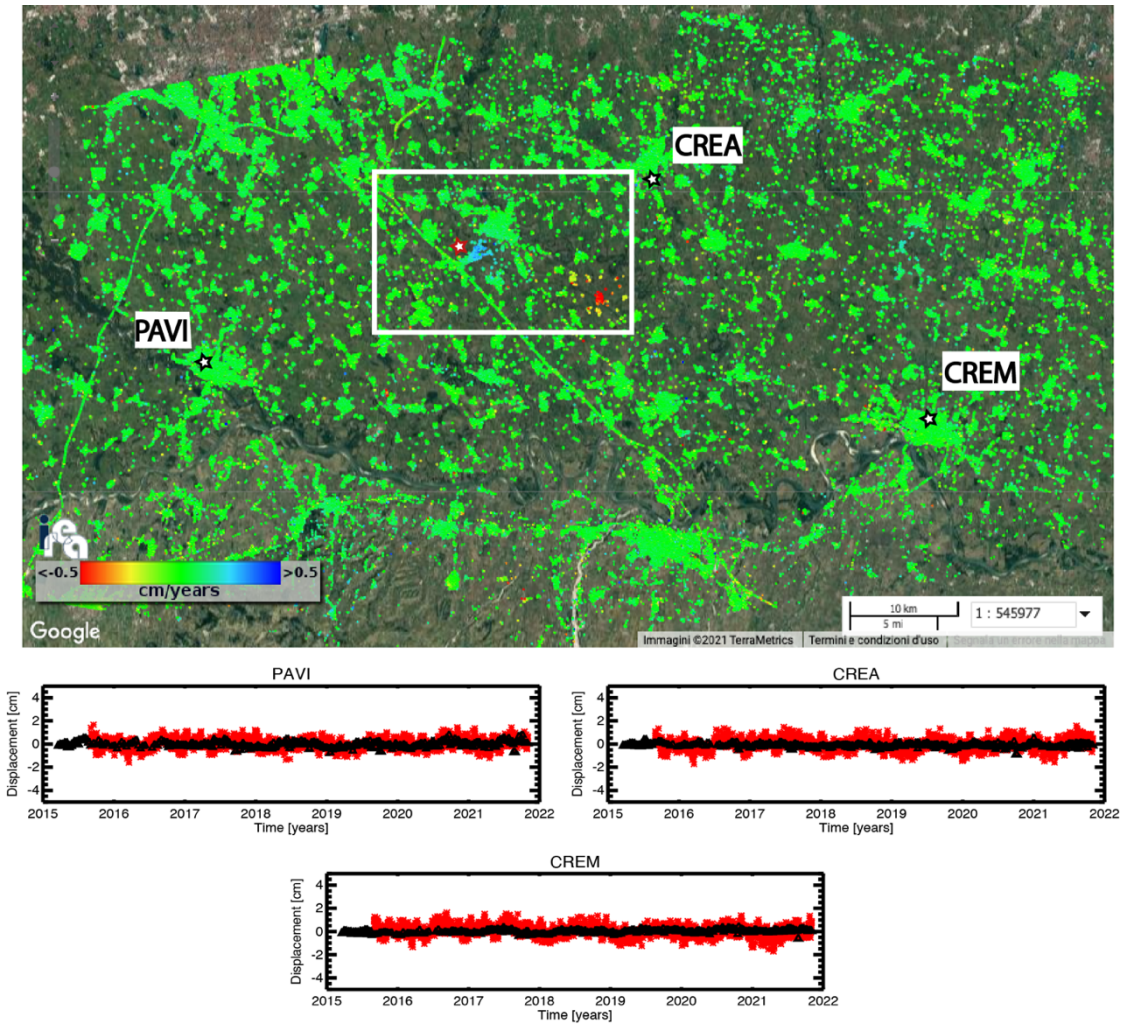


Figura 17 *- Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2021. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 18.*

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 0.4 cm. Tale valore è consistente, se non migliore, rispetto alla stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In Figura 18 viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di Figura 17 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 18) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in Figura 18).

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, con un andamento lievemente oscillante, che raggiunge un'escursione di circa 2 cm a ottobre 2021. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza delle attività di stoccaggio di gas in serbatoi sotterranei depleti anche in Lombardia (Teatini et al., 2011; Zhou et al., 2019). Tale trend deformativo è analizzato con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.4.

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

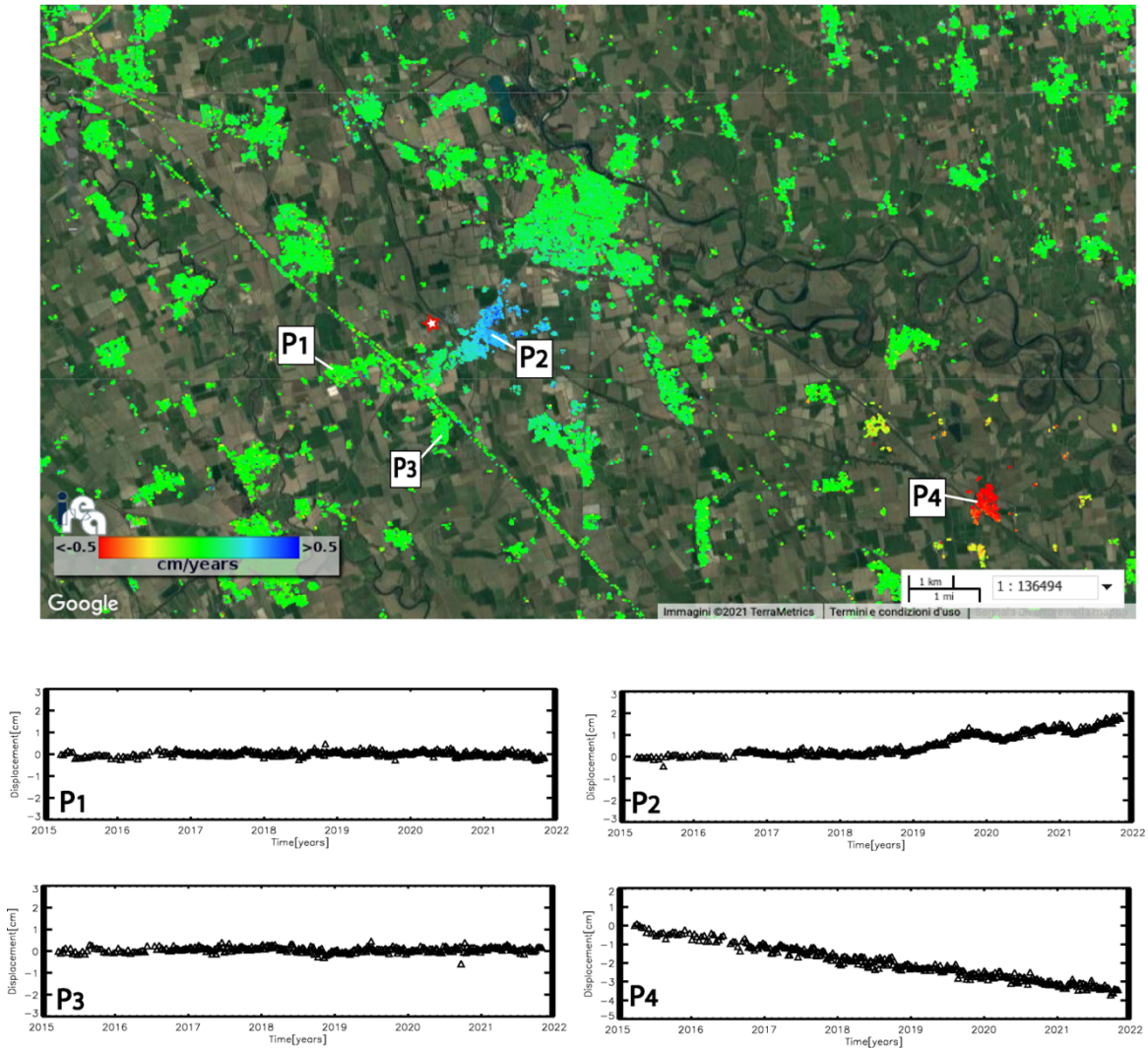


Figura 18 *- Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 17 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2021.*

2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – ottobre 2021)

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 2021 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, sono stati utilizzati 338 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in Figura 19, con i quali sono stati generati 942 interferogrammi differenziali. 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 20, 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.

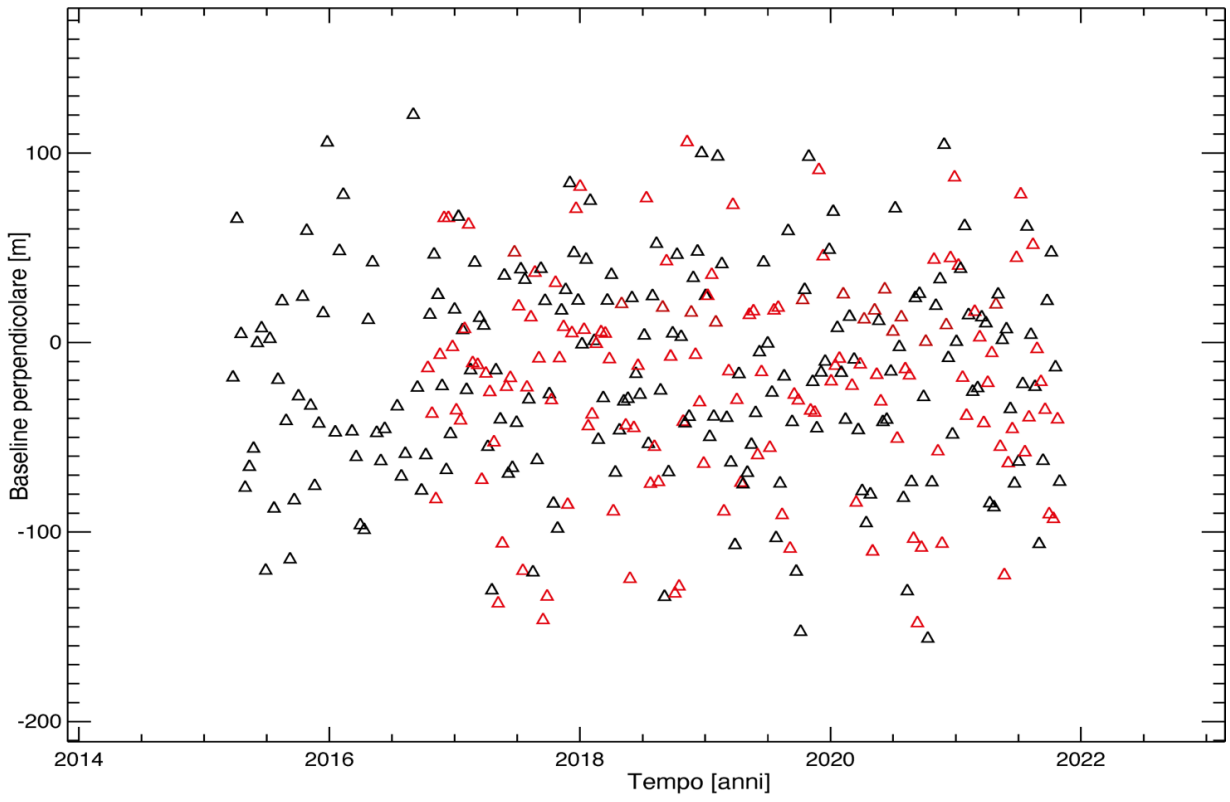


Figura 19 *- Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.*

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

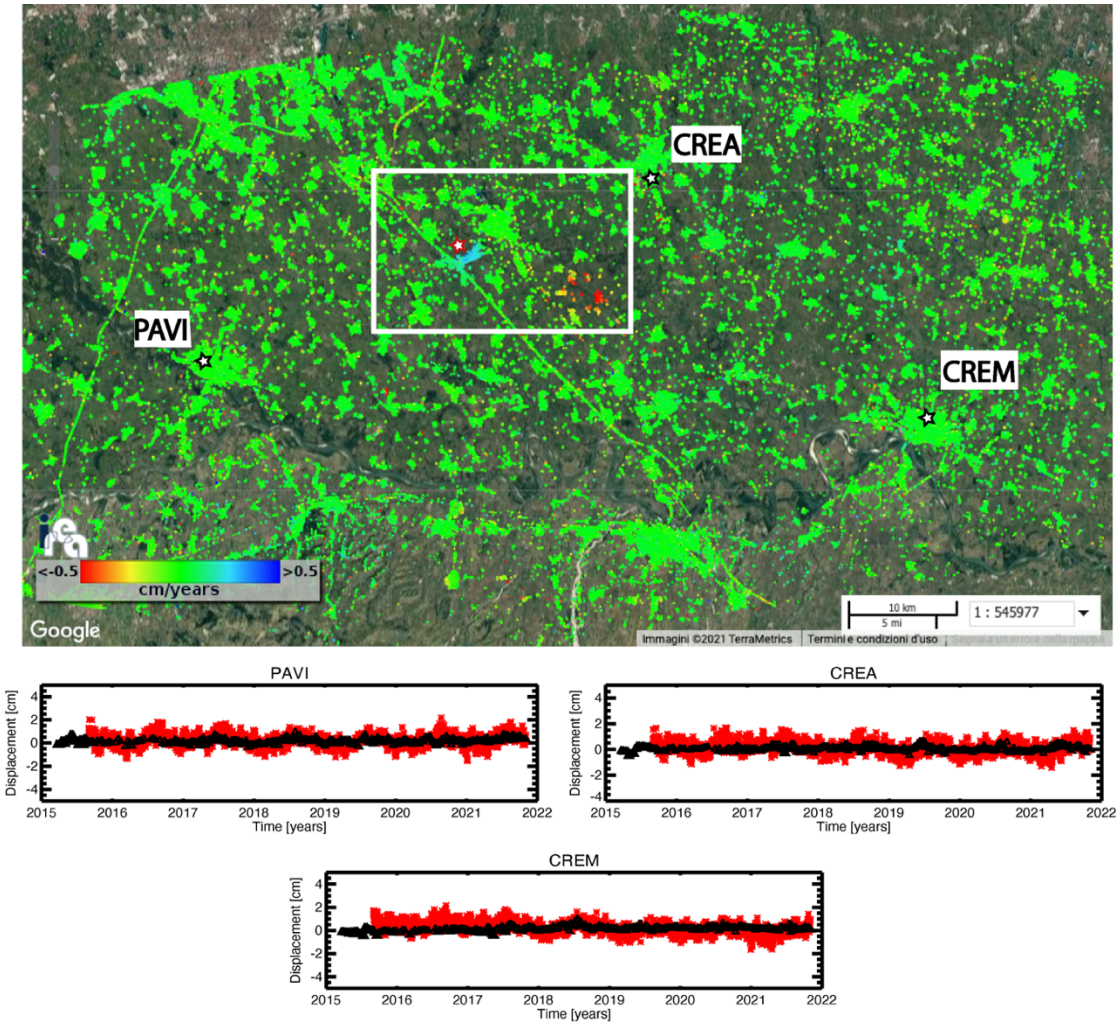


Figura 20 *- Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2021. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 21.*

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 0.4 cm. Tale deviazione standard è consistente con la stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In Figura 21 viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di Figura 20 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 21) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 di Figura 21).

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, con un andamento lievemente oscillante che raggiunge un'escursione di circa 1,5 cm ad ottobre 2021. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza di attività di stoccaggio di gas anche in Lombardia (Teatini et al., 2011; Zhou et al., 2019). Tale trend deformativo è analizzato con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.4.

È inoltre chiaramente identificabile un effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, che mostra, in continuità con le analisi storiche effettuate con ERS-1/2 ed ENVISAT, un trend di deformazione sostanzialmente lineare con un tasso che varia da 0.5 cm/anno a 1 cm/anno.

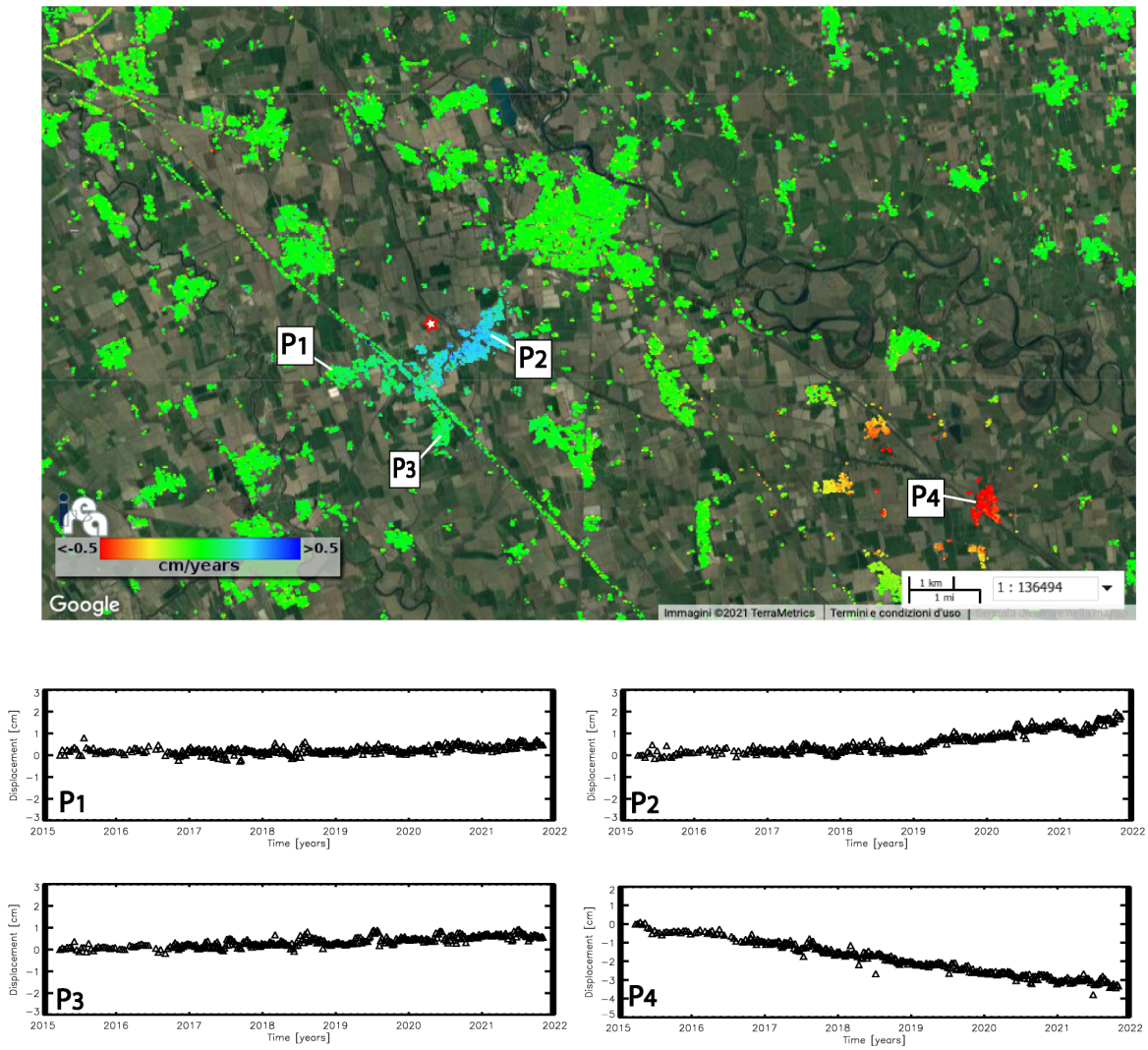


Figura 21 *- Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 20 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - ottobre 2021.*

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 22 e 23, 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 22 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 valore medio pari a circa 0.5 cm. In Figura 23, 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 valore medio di circa 0.4 cm.

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

Le Figure 24 e 25 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 22 e 23. Sono inoltre rappresentati i grafici relativi all'andamento temporale della deformazione di quattro punti selezionati. L'analisi dei risultati mostrati nelle Figure 24 e 25 evidenzia che nel periodo marzo 2015-ottobre 2021 non si rilevano deformazioni significative nell'area di Cornegliano Laudense nelle aree identificate dai punti P1 e P3, mentre la zona corrispondente al punto P2 mostra un effetto deformativo prevalentemente in direzione verticale, con un trend di sollevamento del suolo a partire dall'inizio del 2019 con una velocità media variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno. Tale fenomeno di deformazione è analizzato con maggior dettaglio nel paragrafo che segue.

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

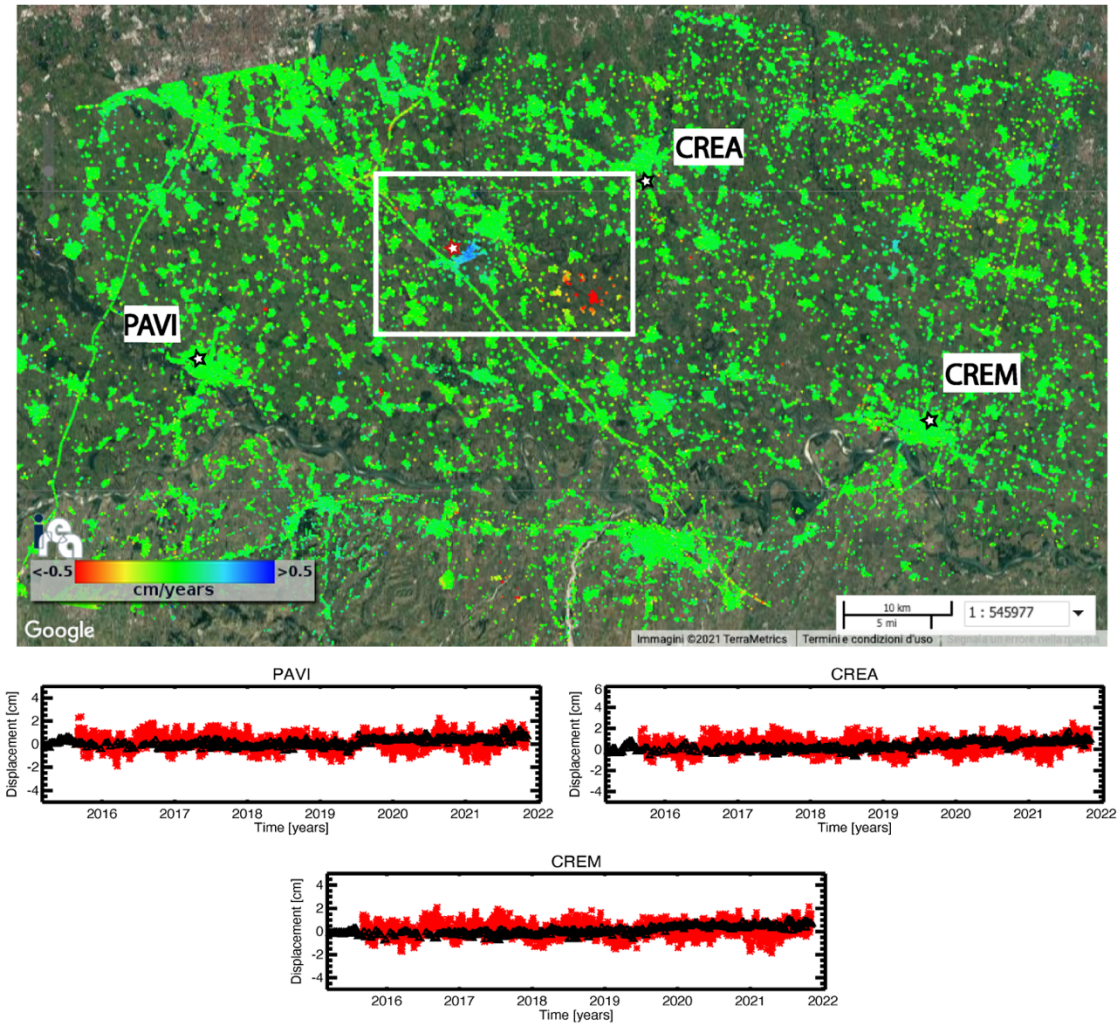


Figura 22 *- Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri).*

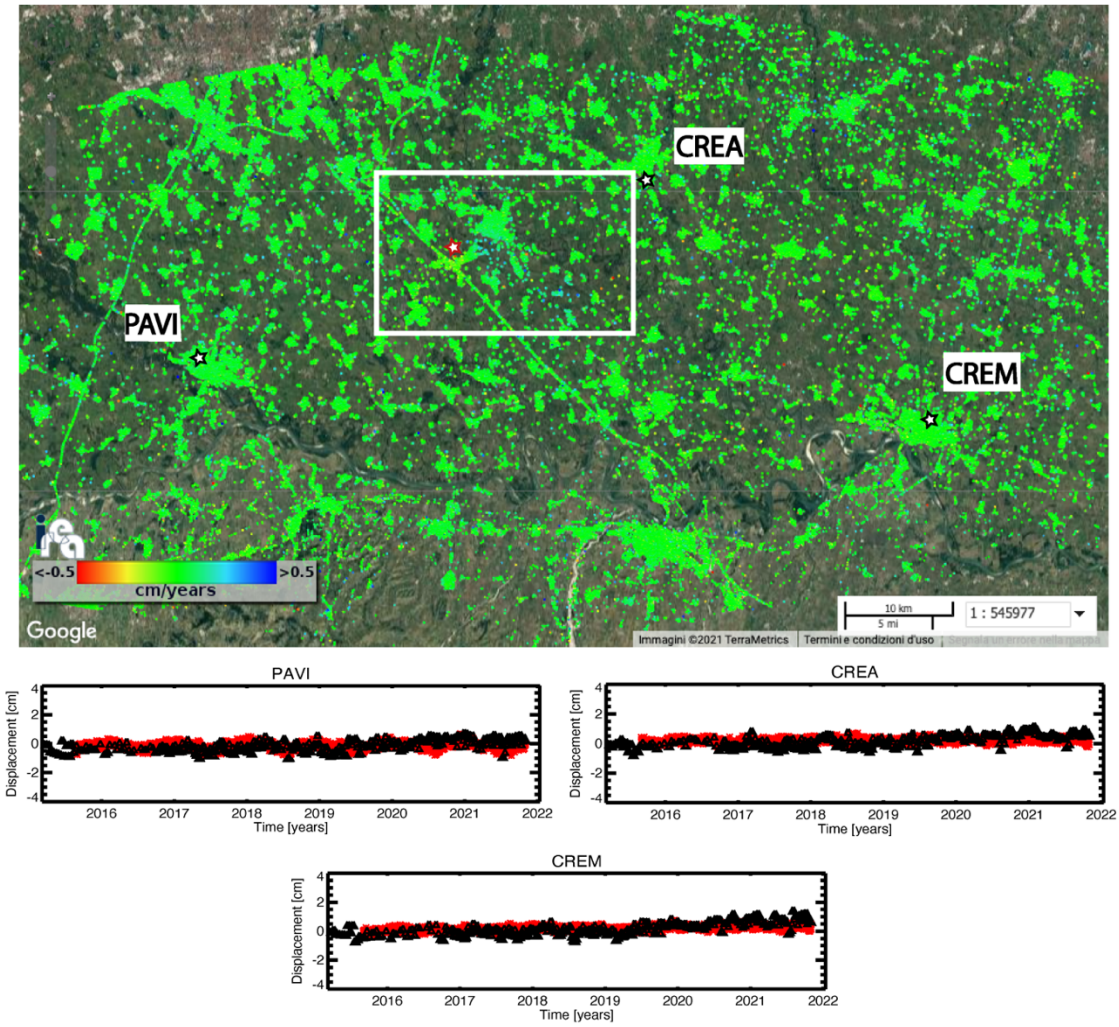


Figura 23 *- Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri).*

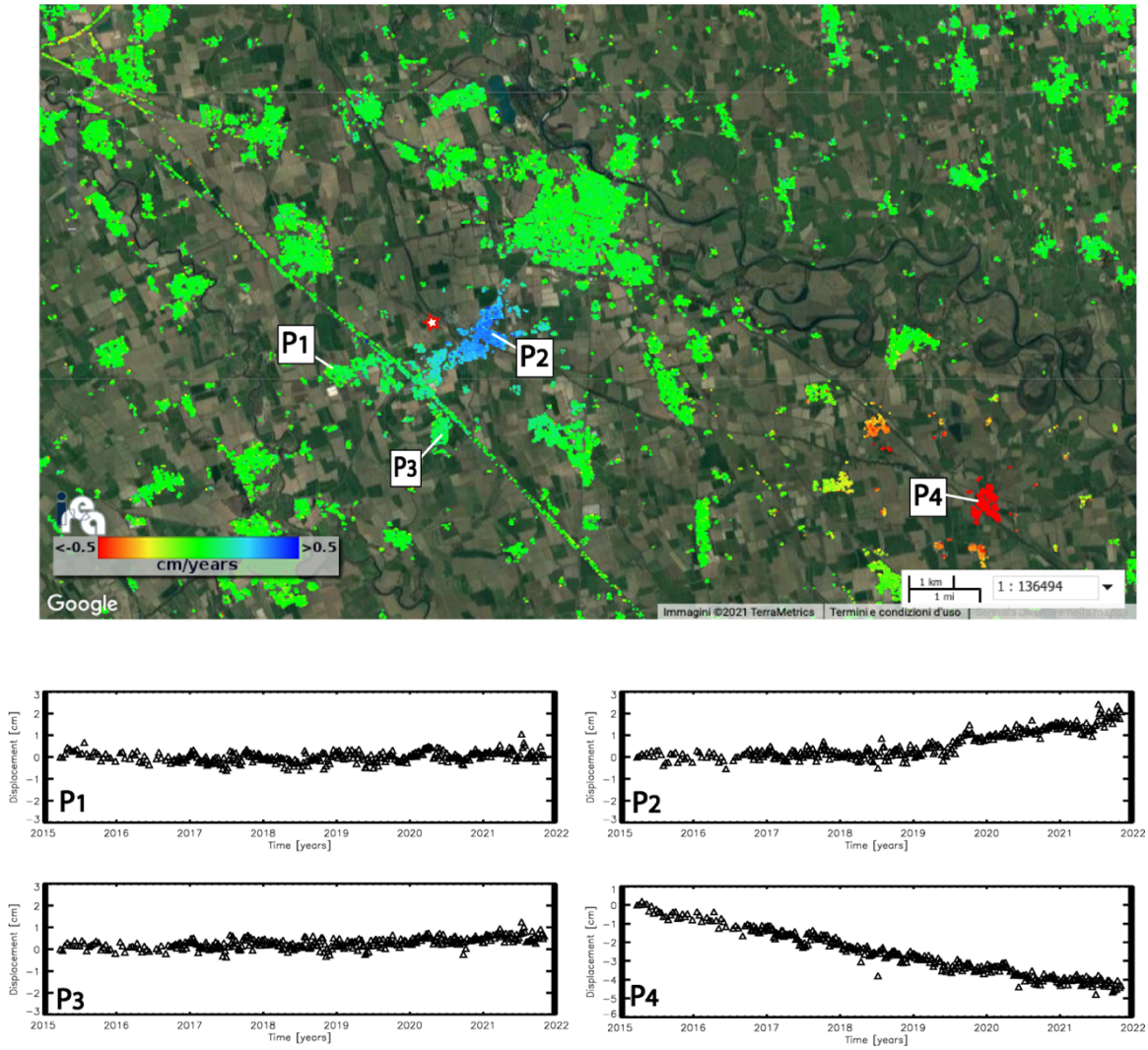


Figura 24 *- Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 22 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). 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).*

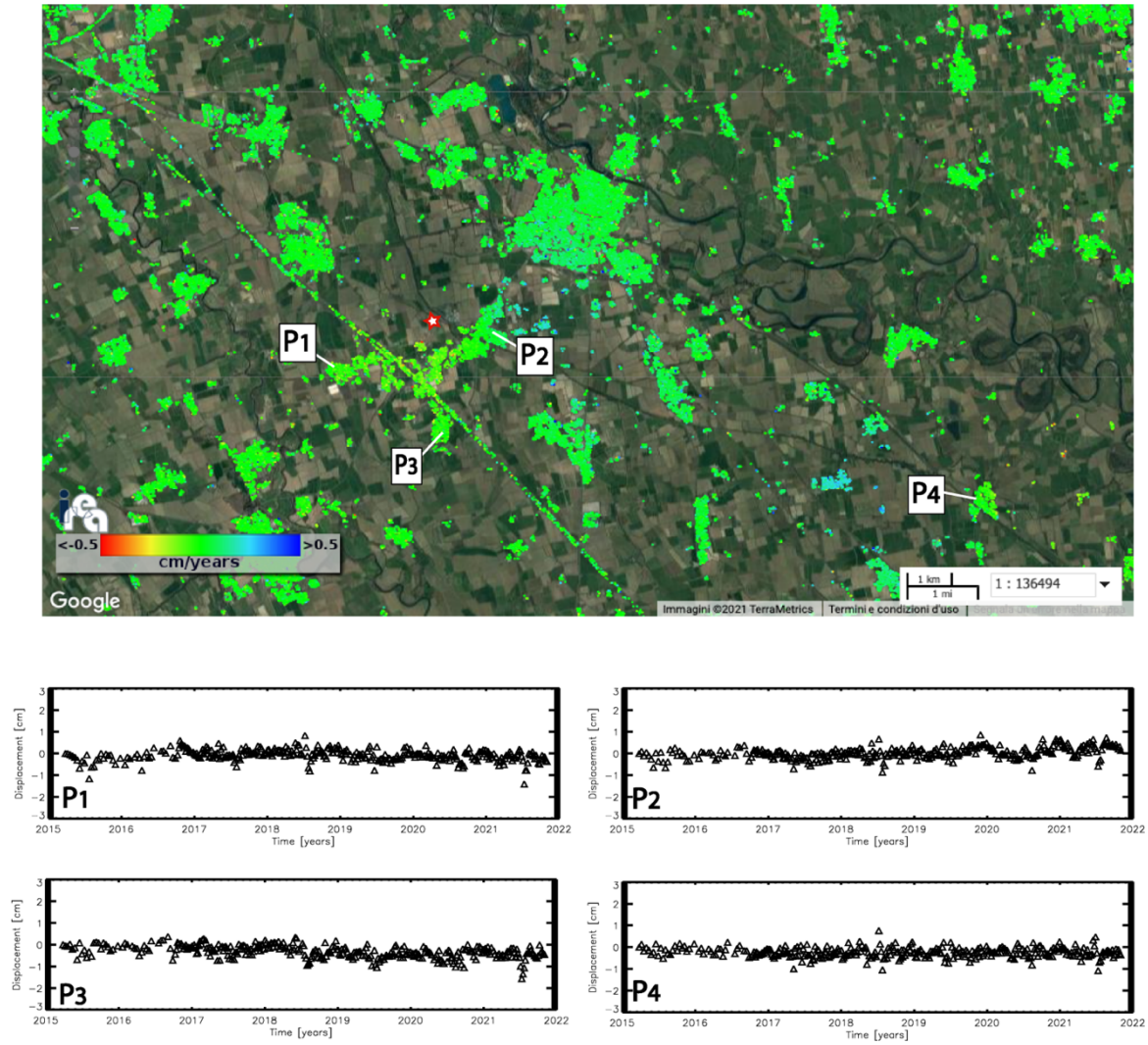


Figura 25 *- Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 23 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). 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 18, 21, 24 e 25, che è quella

più vicina all'impianto di stoccaggio, mostra un effetto deformativo di sollevamento del suolo a partire dall'inizio del 2019 con velocità media variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno. Questo paragrafo è finalizzato a mostrare con maggior dettaglio tale fenomeno. In particolare, in Figura 26 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.

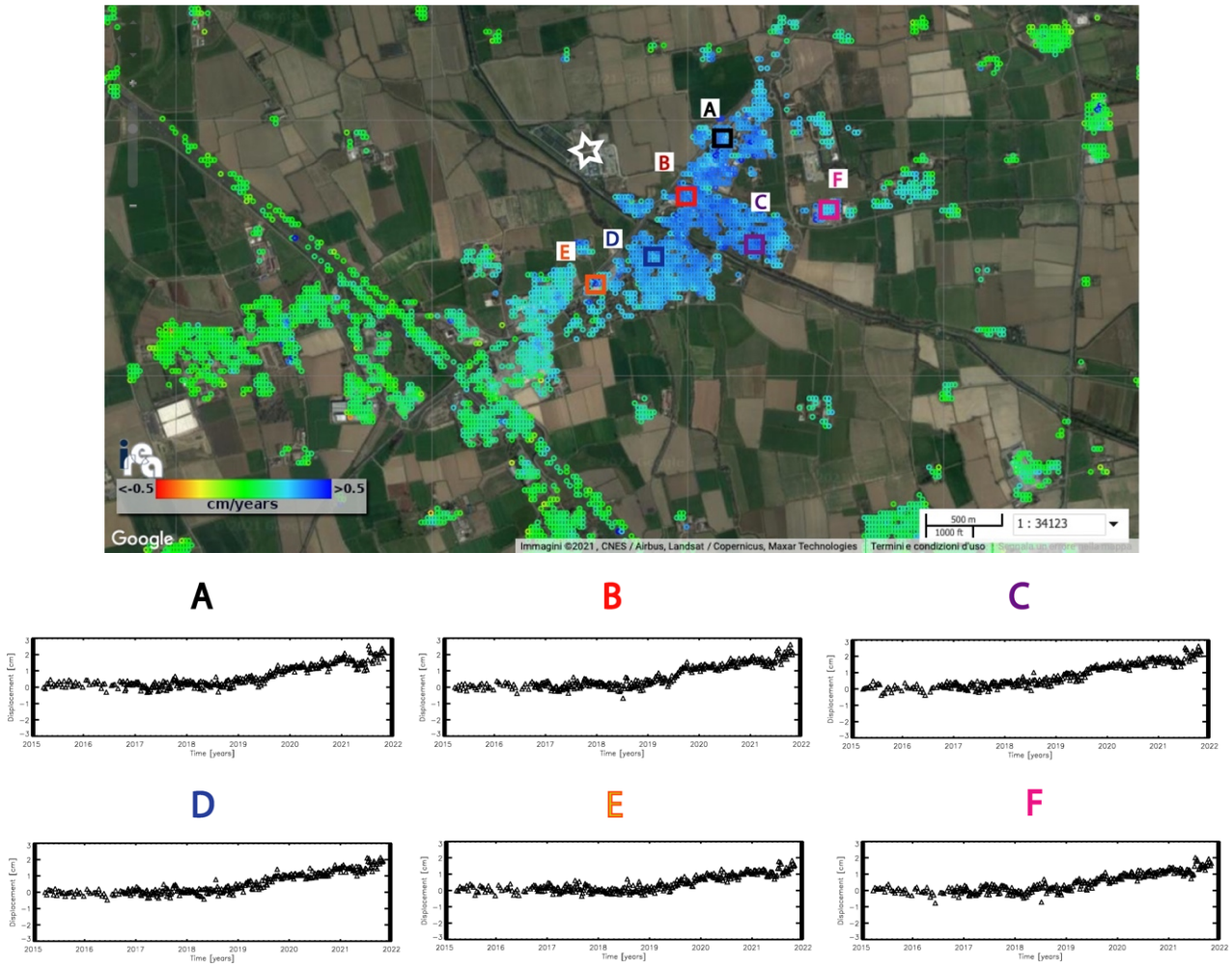


Figura 26 *- Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale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

In Figura 26 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 1-1.5 cm (cfr. componente verticale dello spostamento) nel periodo gennaio 2019-settembre 2019. A partire da settembre 2019 tale sollevamento appare assumere un trend oscillante e raggiunge un valore di circa 2 cm a giugno 2021. Nel periodo giugno 2021-ottobre 2021 si riscontra un ulteriore aumento della deformazione con sollevamento massimo complessivo di circa 2.5 cm. Il comportamento deformativo osservato è in linea con quelli rilevati e studiati in altri siti caratterizzati da attività di stoccaggio del gas anche in Lombardia (Teatini et al., 2011; Zhou et al., 2019), dove si mostra che la deformazione superficiale segue inizialmente la fase di caricamento del deposito di stoccaggio per poi oscillare intorno ad un valore medio in accordo alla ciclicità delle operazioni. Va altresì rilevato che il fenomeno deformativo appare distribuito spazialmente sui punti campionati con entità dei gradienti estremamente ridotte.

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 1/5/2021-31/10/2021, e corrisponde alla fase di iniezione del terzo anno di stoccaggio.

Nei sei mesi rendicontati l'infrastruttura di monitoraggio ha operato correttamente senza interruzioni di rilievo e sono stati localizzati due eventi sismici 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.

Monitoraggio delle deformazioni superficiali

Per ciascun sito della Rete GNSS Lodi sono state calcolate le serie temporali fino alla data del 31/10/2021 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 31/10/2021.

Ricordiamo che per il periodo pregresso maggio 1993 – ottobre 2010, l'analisi interferometrica effettuata con i dati ERS-1/2 ed ENVISAT su orbite sia discendenti sia ascendenti non aveva evidenziato spostamenti significativi (superiori a 2–3 mm/anno) nell'area di interesse, ad eccezione di deformazioni molto localizzate e di un significativo effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano che mostrava un trend di deformazione sostanzialmente lineare, con un tasso di circa 1 cm/anno. Risultati simili erano stati ottenuti anche dall'analisi delle mappe di velocità media di deformazione relative alle componenti verticale ed Est-Ovest dello spostamento superficiale, e confermavano la deformazione significativa presente a scala locale nell'area di Turano

Lodigiano con un tasso di circa 1 cm/anno nella componente verticale e di circa 0.5 cm/anno nella direzione Est-Ovest. Data la distanza di circa 15 km che intercorre tra Turano Lodigiano e il sito di stoccaggio, si ritiene che la deformazione rilevata non sia correlata con le attività di stoccaggio.

L'analisi interferometrica effettuata con i dati più recenti acquisiti dai sensori Sentinel-1 (S-1) è consistente con i risultati ottenuti con i dati del precedente rapporto. In particolare, si conferma che a partire dall'inizio del 2019 le mappe e le serie temporali di deformazione relative ai dati acquisiti da orbite discendenti ed ascendenti mostrano un effetto deformativo nell'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio con una significativa componente verticale, avente un trend di sollevamento del suolo con velocità variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno, ed un'escursione massima di 2.5 cm a ottobre 2021. Si noti che l'entità della deformazione massima verticale raggiunta è tale da corrispondere a circa un salto di frangia interferometrica, pertanto risulta identificabile in modo piuttosto chiaro negli interferogrammi SAR.

Il comportamento deformativo osservato è consistente con quelli rilevati e studiati in altri siti caratterizzati da attività di stoccaggio del gas, dove si mostra che la deformazione superficiale segue inizialmente la fase di caricamento del deposito di stoccaggio per poi oscillare intorno ad un valore medio in accordo alla ciclicità delle operazioni. Tale comportamento rispecchia la curva del volume di riempimento di gas nello stoccaggio come riportato in Figura 5. Tale fenomeno deformativo appare distribuito spazialmente sui punti campionati con entità dei gradienti estremamente ridotte.

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 signalson geodetic velocities,J. Geophys. Res., 107, 2145, doi: 10.1029/2001JB000570, 2002.

Bragato, P. L. e Tento, 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.

Masson C., Mazzotti S. and Vernant, P. (2019). Precision of continuous GPS velocities from statistical analysis of synthetic time series, Solid Earth, 10, 329–342, doi:10.5194/se-10-329- 2019.

MiSE-UNMIG (2014). Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche, 38 pp.; http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf.

Peruzza, L., Schibuola, A., Romano, M.A., Garbin, M., Guidarelli, M., Sandron, D. and Priolo, E., 2021. A revised image of the instrumental seismicity in the Lodi area (Po Plain, Italy), Solid Earth, 12, 2021–2039, https://doi.org/10.5194/se-12-2021-202.

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. et al. (2021). Concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio". Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2020 – Seconda relazione annuale. Rel. OGS 2021/13 Sez. CRS 4 SISMIND.

Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2012). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. In: M. Mucciarelli (Ed.), Tecniche

Speditive per la Stima dell'Amplificazione Sismica, Studi teorici ed applicazioni professionali, Aracne Ed., 431-445.

Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2015a). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. Seismological Research Letters, 86, 978-984, doi: 10.1785/0220140175. Available at http://srl.geoscienceworld.org/content/early/2015/02/18/0220140175.full.pdf.

Priolo E., Romanelli M., Plasencia-Linares M. P., Garbin M., Peruzza L., Romano M. A., Marotta P., Bernardi P., Moratto L., Zuliani D. and Fabris P. (2015b). Seismic Monitoring of an Underground Natural Gas Storage Facility – The Collalto Seismic Network. *Seismological Research Letters,* 86, 1, 109-123 + Electronic Supplement.

Teatini, P., 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.

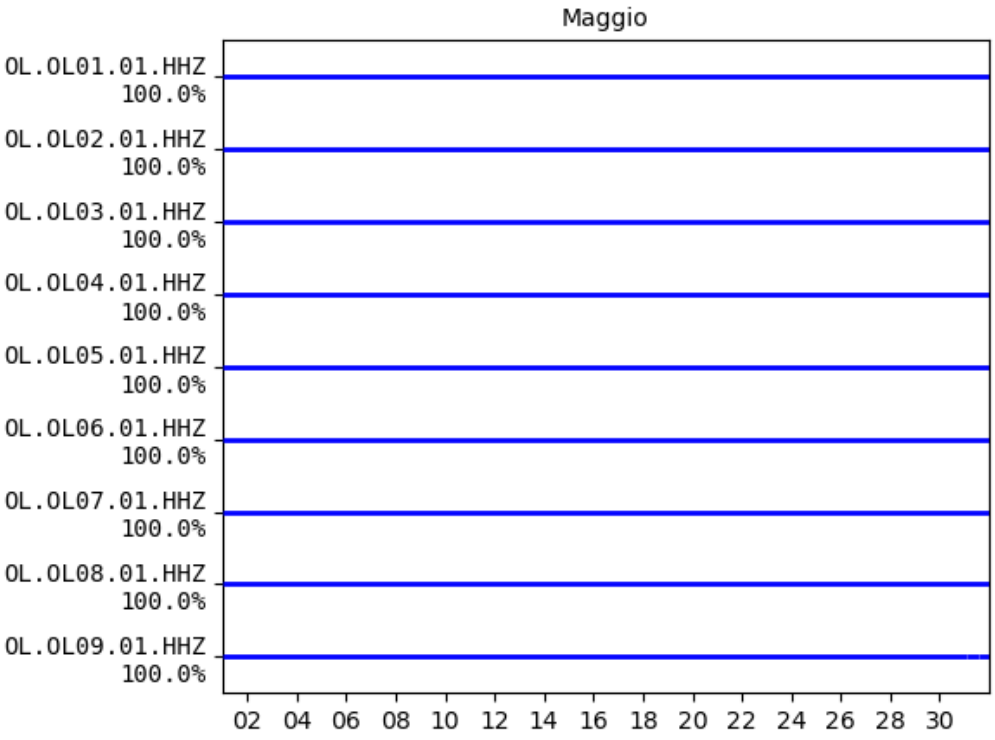
Tregoning, P., and van Dam T. (2005). Atmospheric pressure loading corrections applied to GP S data at the observation level. Geophys. Res. Lett., 32, L22310, doi:10.1029/2005GL024104.

Zhou, P., Yang, H., Wang, B., & 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.

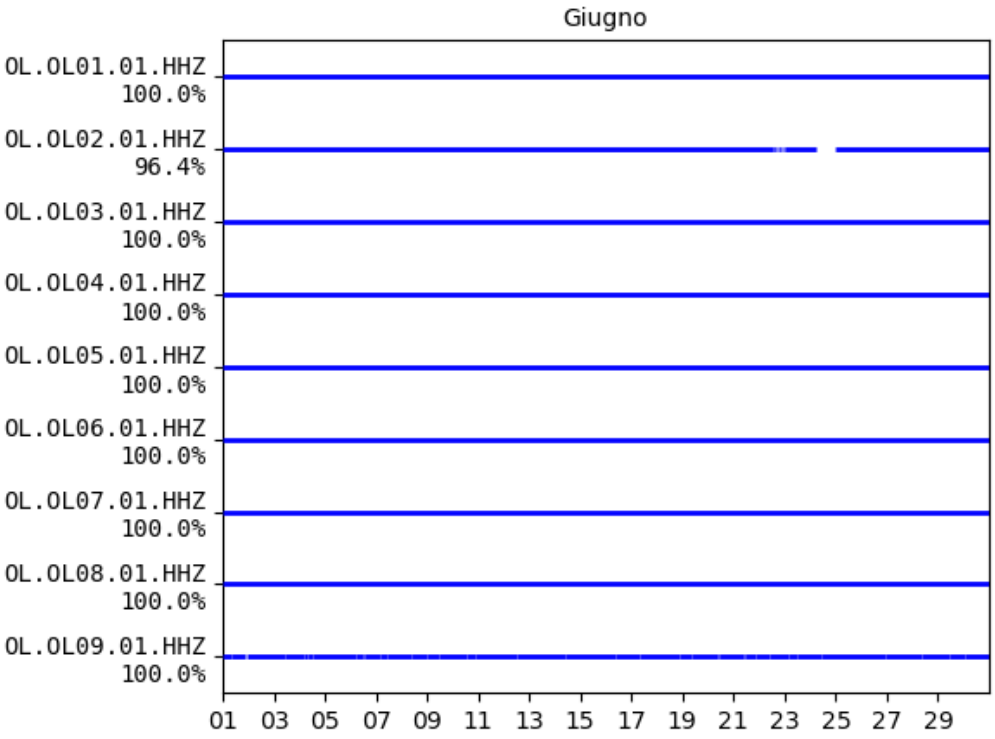
Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL

I grafici raffigurano la disponibilità dei dati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL) nel periodo 1/5/2021-31/10/2021, considerato in questa relazione. Ogni tabella si riferisce a un mese. Le barre orizzontali grigie indicano la disponibilità dei dati per le stazioni corrispondenti (codice OL##). L'ascissa indica il tempo rappresentato come giorno del mese corrente. Per ogni stazione è mostrato solo il canale verticale (HHZ) del sismometro posto in pozzo.

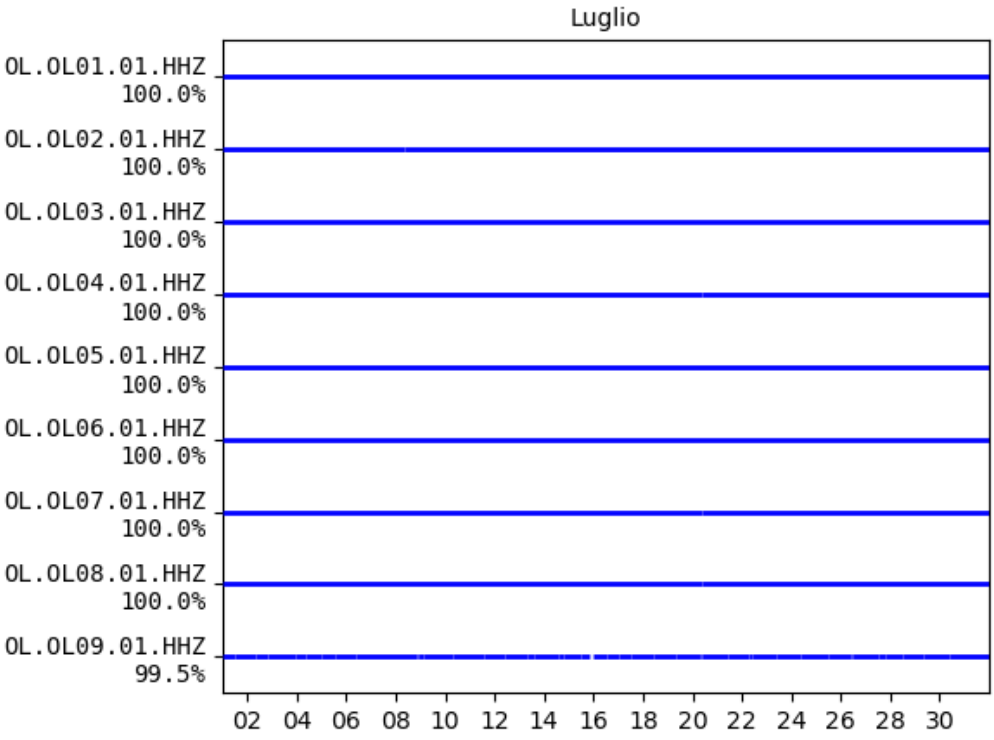
Maggio 2021



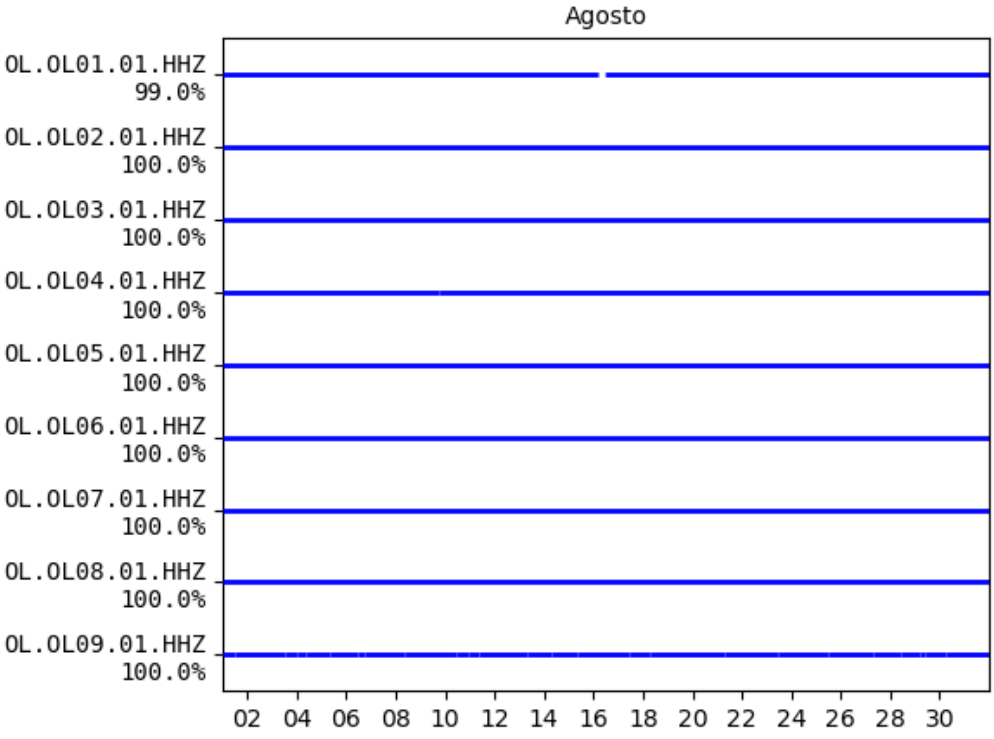
Giugno 2021



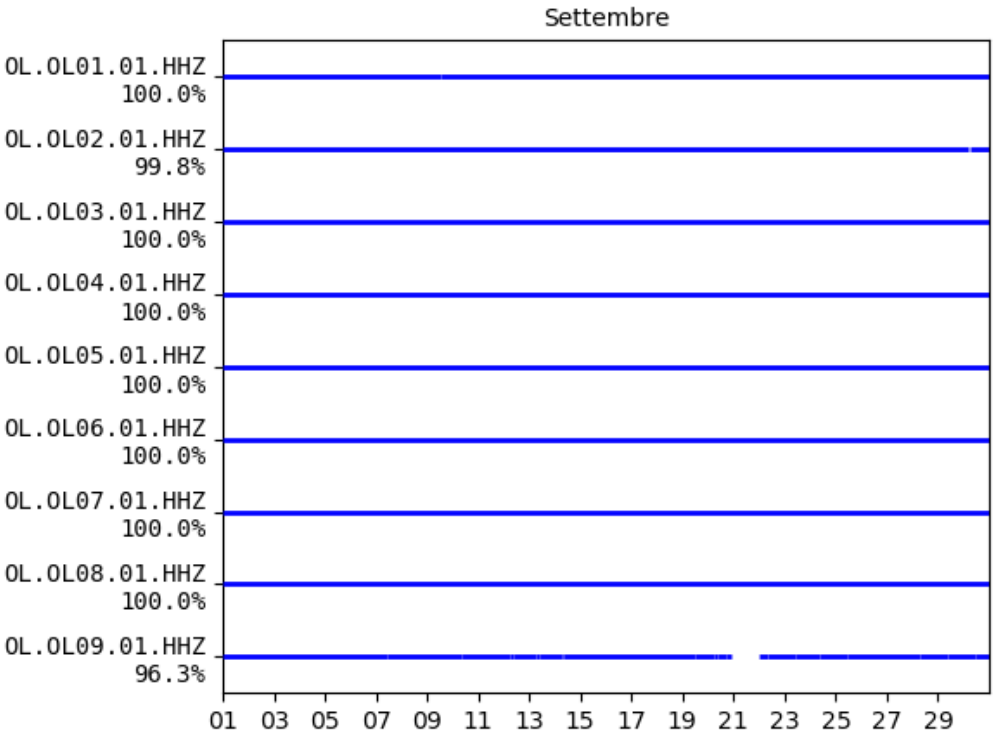
Luglio 2021



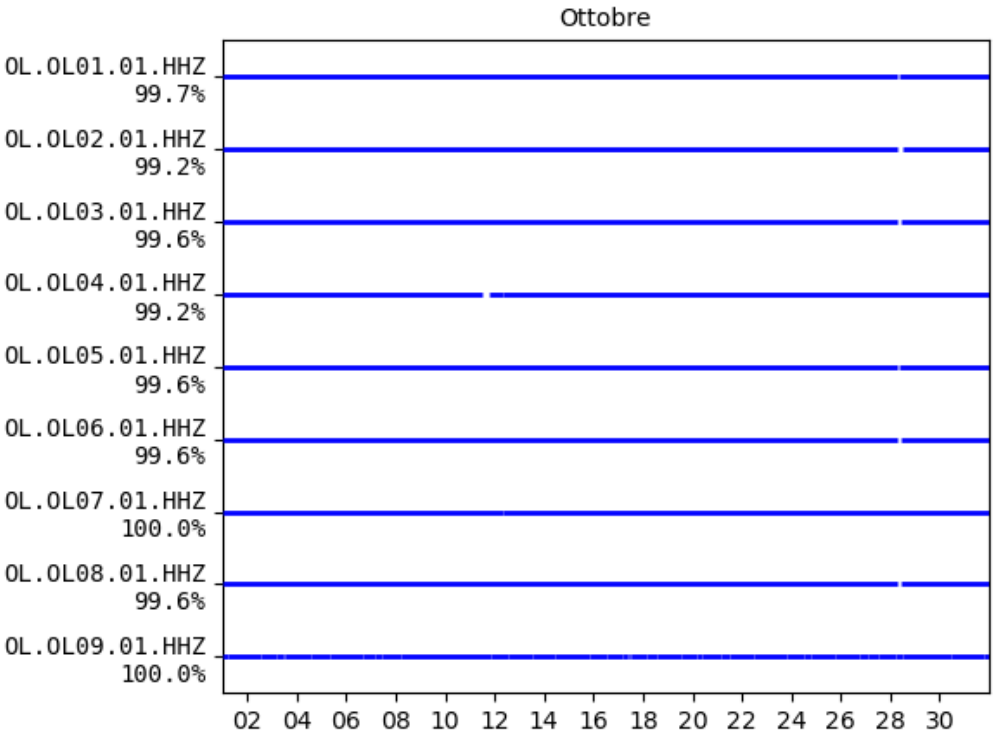
Agosto 2021



Settembre 2021



Ottobre 2021



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.centesimi di secondo)
lat latitudine	(gradi decimali)
lon longitudine	(gradi decimali)
depth profondità	(km)
Ml	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.

Cornegliano Laudense Seismic Network Event List

File generated on: 2022-01-25 14:13:49.163196
Location Method: Hypoellipse
Earth Model: corn1
--

id	Area	date	time	lat	lon	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	2.2	D	251	7	0	1.77	4.16	99.00	0.41	7.80	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	23.82	Milano
3	DI*	2017/07/11	22:25:03.54	45.306	9.422	1.43	0.9	D	294	8	3	0.11	0.17	99.00	0.07	1.19	Lodi Vecchio
4	DI	2017/07/12	00:17:53.87	45.304	9.419	2.19	1.1	A	156	15	6	0.14	0.20	0.14	0.18	1.17	Lodi Vecchio
5	DI	2017/07/12	00:18:30.95	45.304	9.435	1.25	--	A	256	8	3	0.05	0.25	0.04	0.04	2.04	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	3.58	Lodi
7	DI	2018/01/27	04:01:44.44	45.311	9.435	1.51	0.8	A	278	11	5	0.06	0.09	1.16	0.11	1.19	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	0.73	Pieve Fissiraga
9	AE	2018/06/18	21:45:20.87	45.276	9.253	33.33	1.2	A	191	18	9	0.40	0.65	0.47	0.37	16.88	Vidigulfo
10	AE	2018/06/20	00:49:07.48	45.276	9.238	34.0	1.3	A	301	15	7	0.59	0.72	0.37	0.23	18.56	Vidigulfo
11	DE	2018/10/30	05:03:37.61	45.383	9.572	34.01	1.9	A	153	22	11	0.39	0.79	0.72	0.17	10.49	Palazzo Pignano
12	DE	2018/11/21	03:26:44.47	45.308	9.532	3.14	2.1	A	284	12	6	0.18	0.22	0.38	0.19	1.34	Lodi
13	AE	2018/12/23	15:06:12.55	45.440	9.583	35.61	1.6	B	197	14	7	0.29	2.29	0.93	0.00	16.38	Vailate
14	DE	2019/04/25	23:11:31.35	45.355	9.605	31.97	--	A	255	21	9	0.36	0.59	0.49	0.10	10.88	Bagnolo Cremasco
15	DI	2019/06/12	10:24:02.07	45.302	9.502	1.65	--	B	191	10	5	0.11	0.17	1.50	0.16	1.29	Lodi
16	DE	2019/06/21	15:22:39.47	45.308	9.535	2.17	--	A	290	10	5	0.10	0.22	0.08	0.21	1.55	Lodi
17	DE	2019/06/21	15:49:01.16	45.307	9.529	2.27	--	A	179	10	5	0.08	0.16	0.17	0.16	0.93	Lodi
18	DE	2019/06/30	12:01:20.47	45.332	9.312	35.0	--	A	115	30	14	0.20	0.46	0.42	0.15	10.87	Cerro al Lambro
19	DE	2019/07/13	03:01:35.97	45.300	9.528	2.49	--	A	180	16	8	0.10	0.15	0.06	0.16	0.48	Lodi
20	DE	2019/08/17	09:40:07.14	45.305	9.649	4.24	--	A	222	17	7	0.71	0.85	1.02	0.23	13.58	Credera Rubbiano
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	14.42	Truccazzano
22	AE	2020/12/17	15:59:23.86	45.445	9.169	41.63	3.3	A	224	25	9	0.83	0.97	1.08	0.24	30.56	Milano
23	AE	2021/01/17	10:27:25.98	45.473	9.390	36.99	2.7	A	124	31	15	0.18	0.20	0.22	0.27	17.46	Settala
24	AE	2021/02/21	08:54:21.16	45.212	9.112	31.81	1.7	B	257	15	7	0.72	1.45	0.71	0.22	33.61	Pavia
25	DI	2021/08/14	06:27:10.49	45.304	9.427	1.85	0.5	A	259	11	5	0.17	0.33	0.49	0.14	1.69	Lodi Vecchio
26	AE	2021/10/11	23:18:21.01	45.264	9.263	29.56	2.8	A	152	24	11	0.38	0.61	0.51	0.21	15.98	Vidigulfo
27	DE	2021/12/21	23:37:57.32	45.313	9.536	2.51	1.6	A	195	16	8	0.14	0.46	0.18	0.25	1.93	Lodi
28	DE	2021/12/22	05:17:15.26	45.312	9.533	2.43	2.2	A	189	16	8	0.09	0.17	0.07	0.14	1.65	Lodi

OGS Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale
IREA istituto per il rilevamento elettromagnetico dell'ambiente
Consiglio Nazionale delle Ricerche

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

In questa sezione sono riportate le serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08. Ogni figura mostra le serie relative alle tre componenti (dall'alto verso il basso, Nord, Est e verticale verso l'alto) dello spostamento per una stazione. Ogni punto sul grafico è lo spostamento stimato giornaliero in mm. Ad ogni punto è sovrapposta la barra di errore che rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere.

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

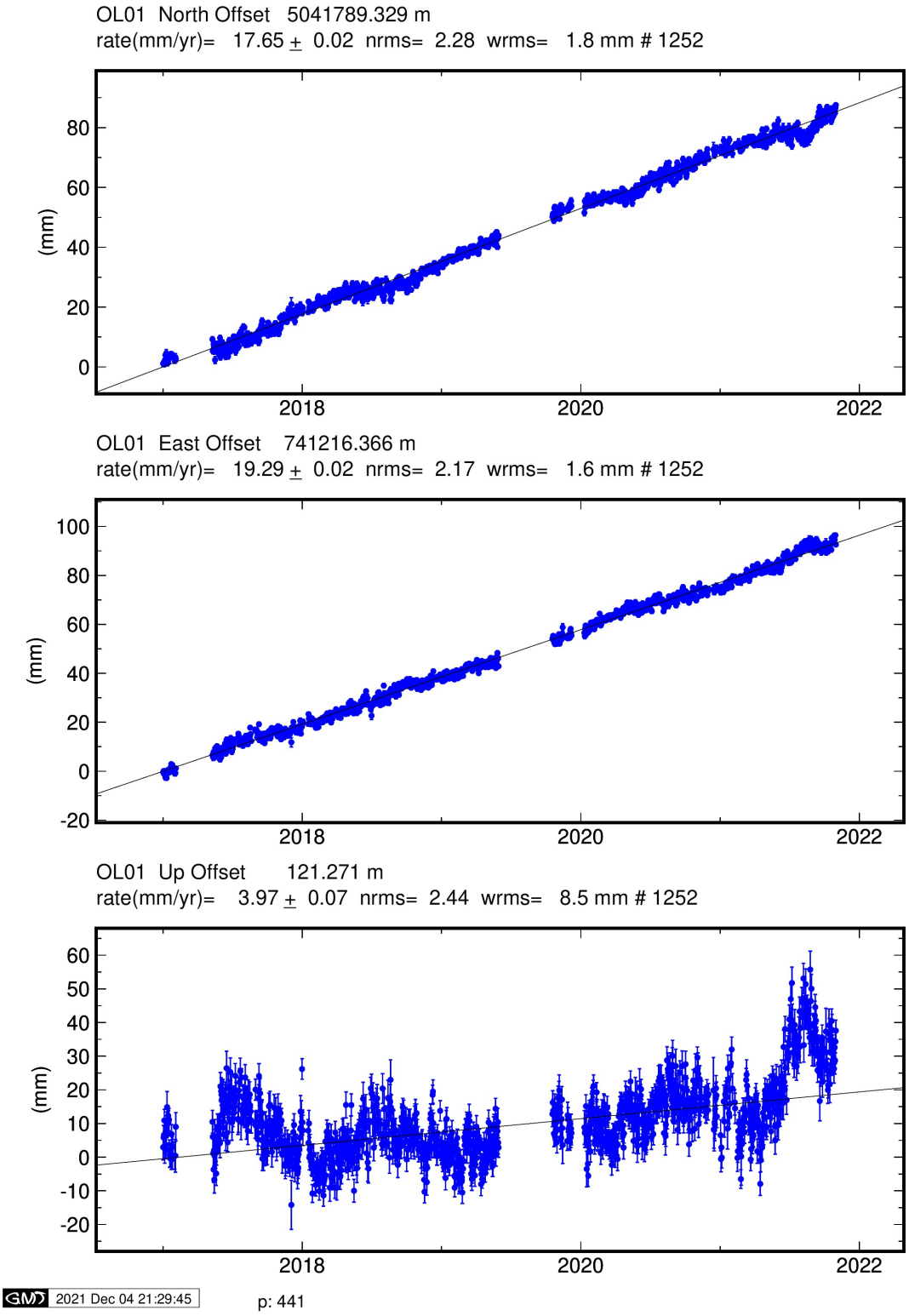


Figura C.1 *– Serie temporale della stazione OL01 secondo il sistema di riferimento ITRF08.*

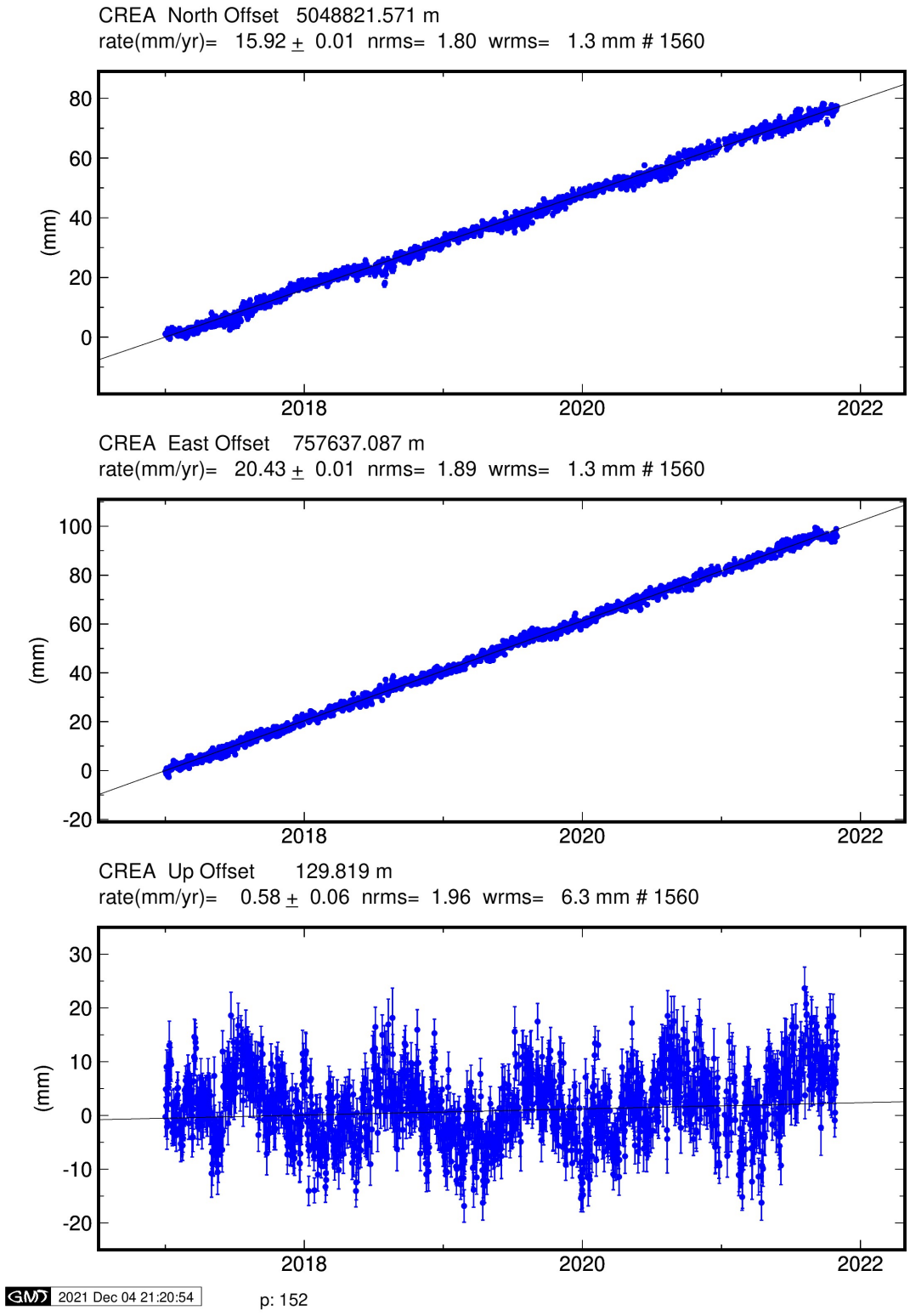


Figura C.2 *– Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF08.*

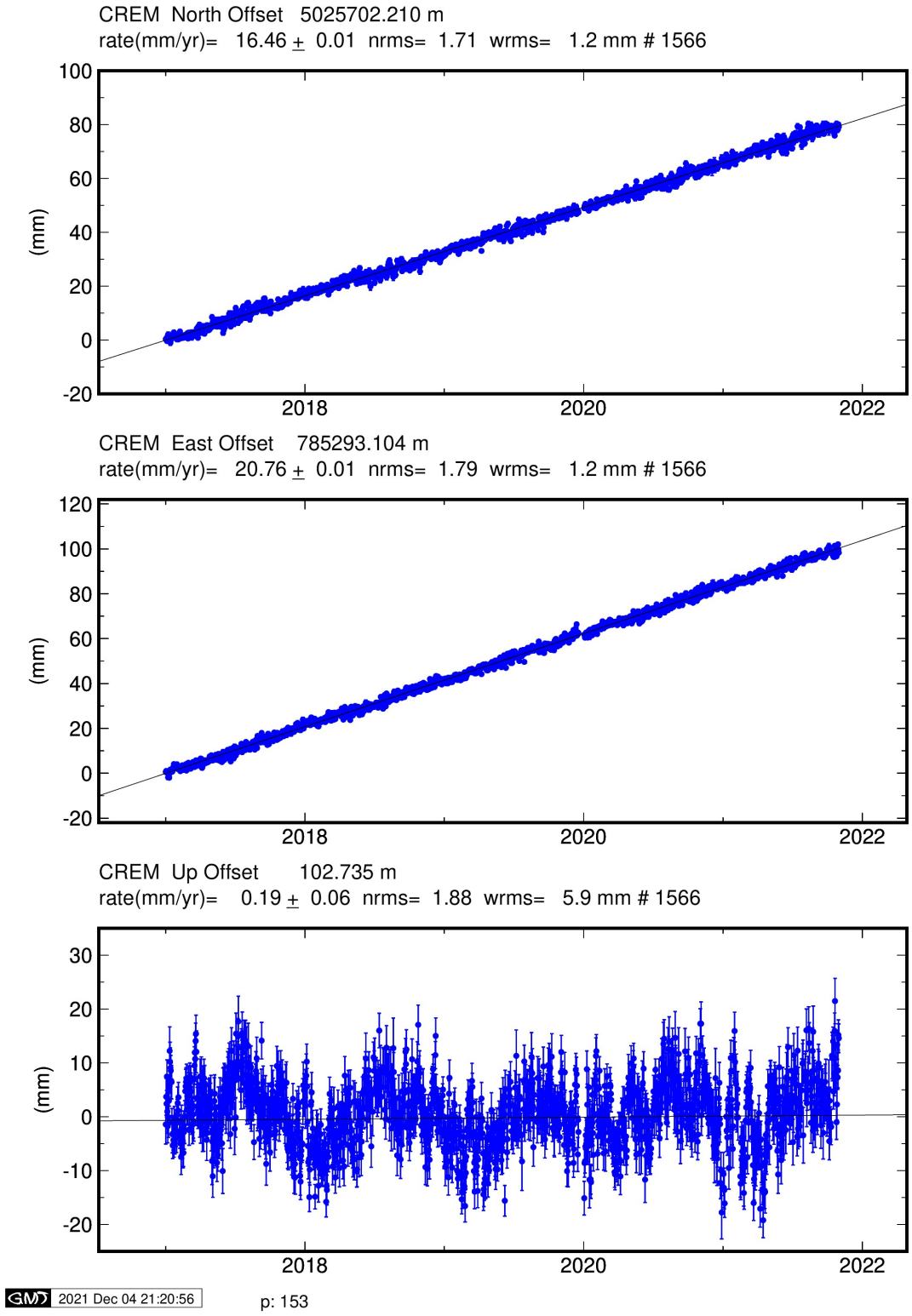


Figura C.3 *– Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF08.1*

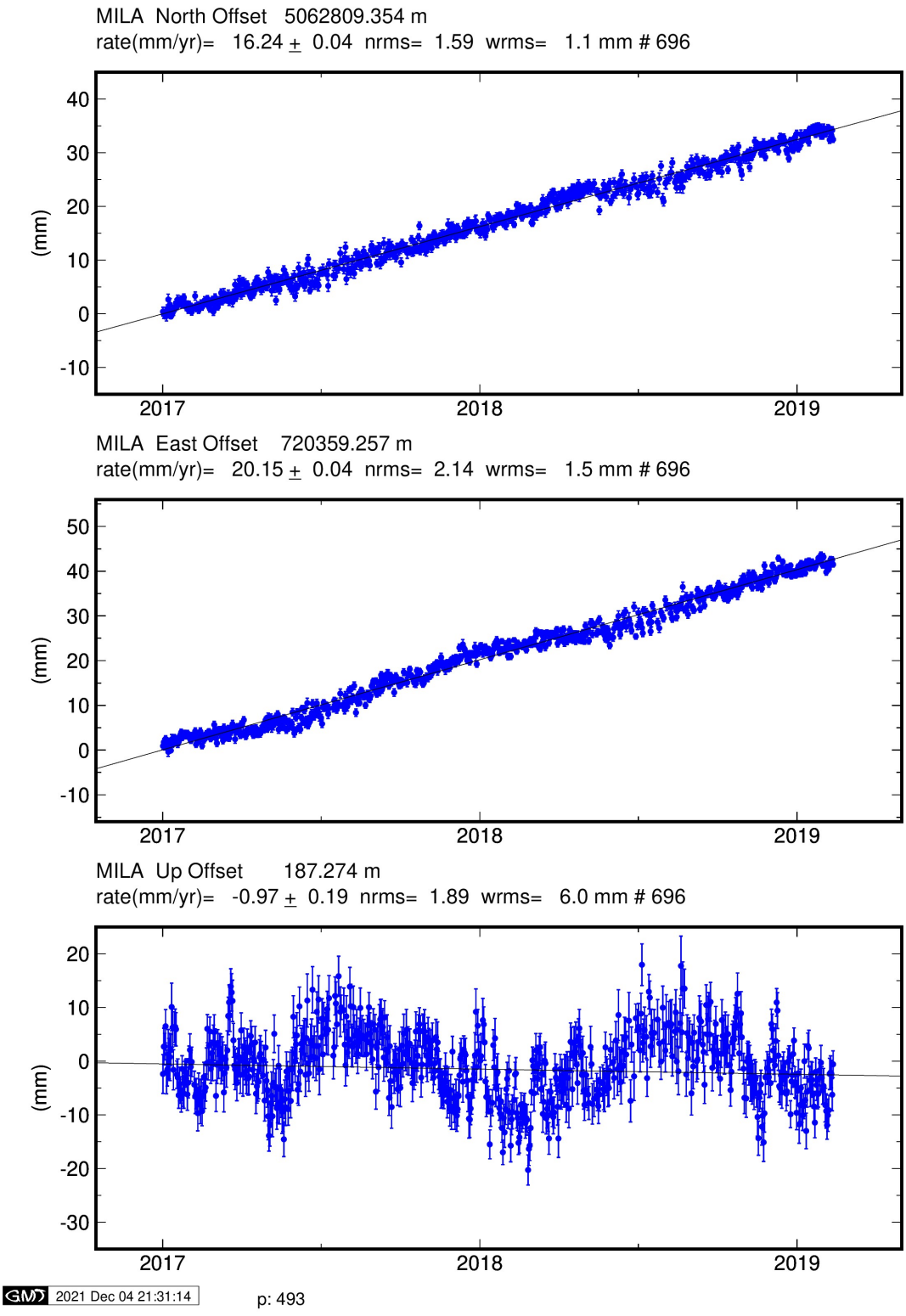


Figura C.4 *– Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF08.*

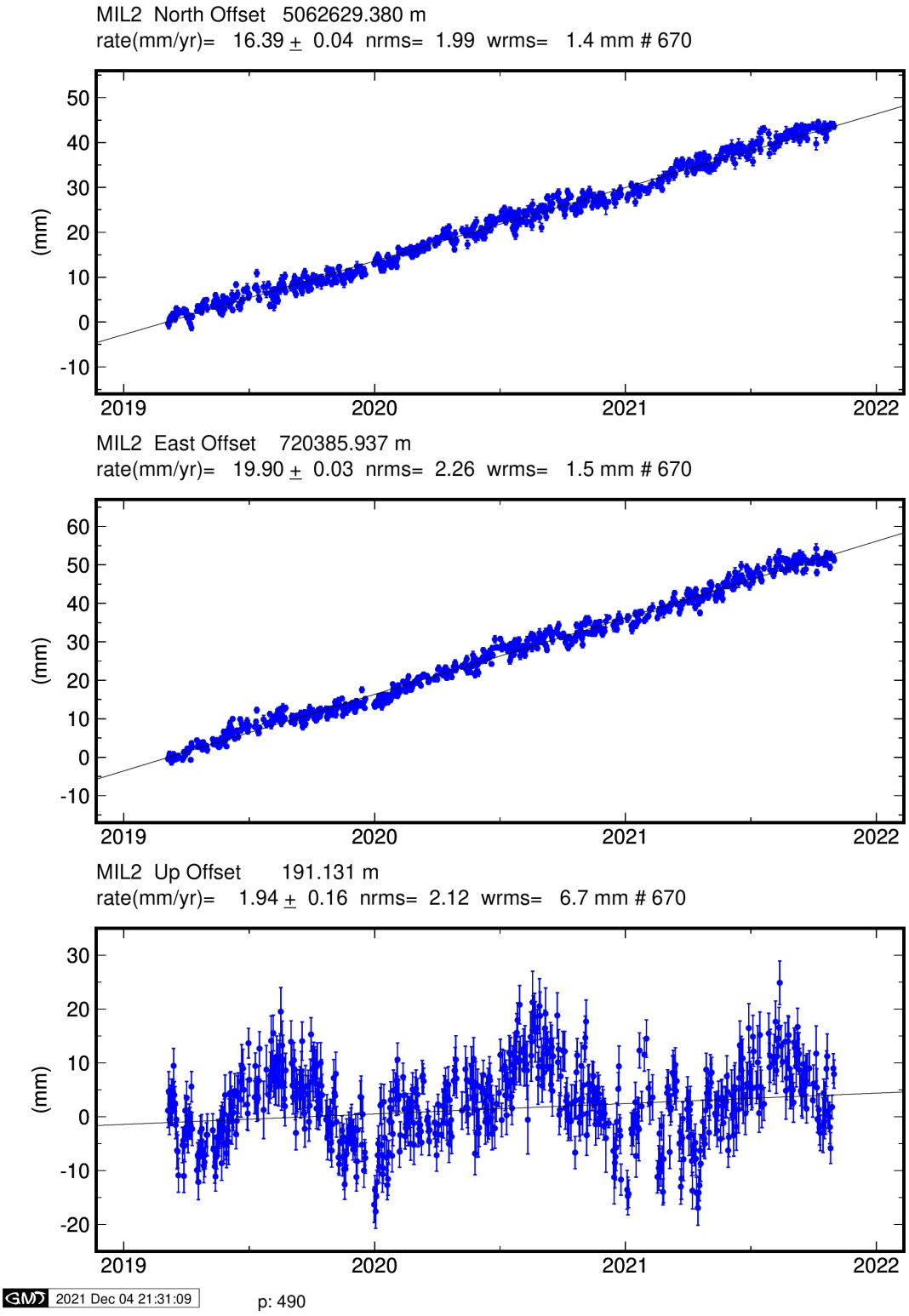


Figura C.5 *– Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ITRF08.*

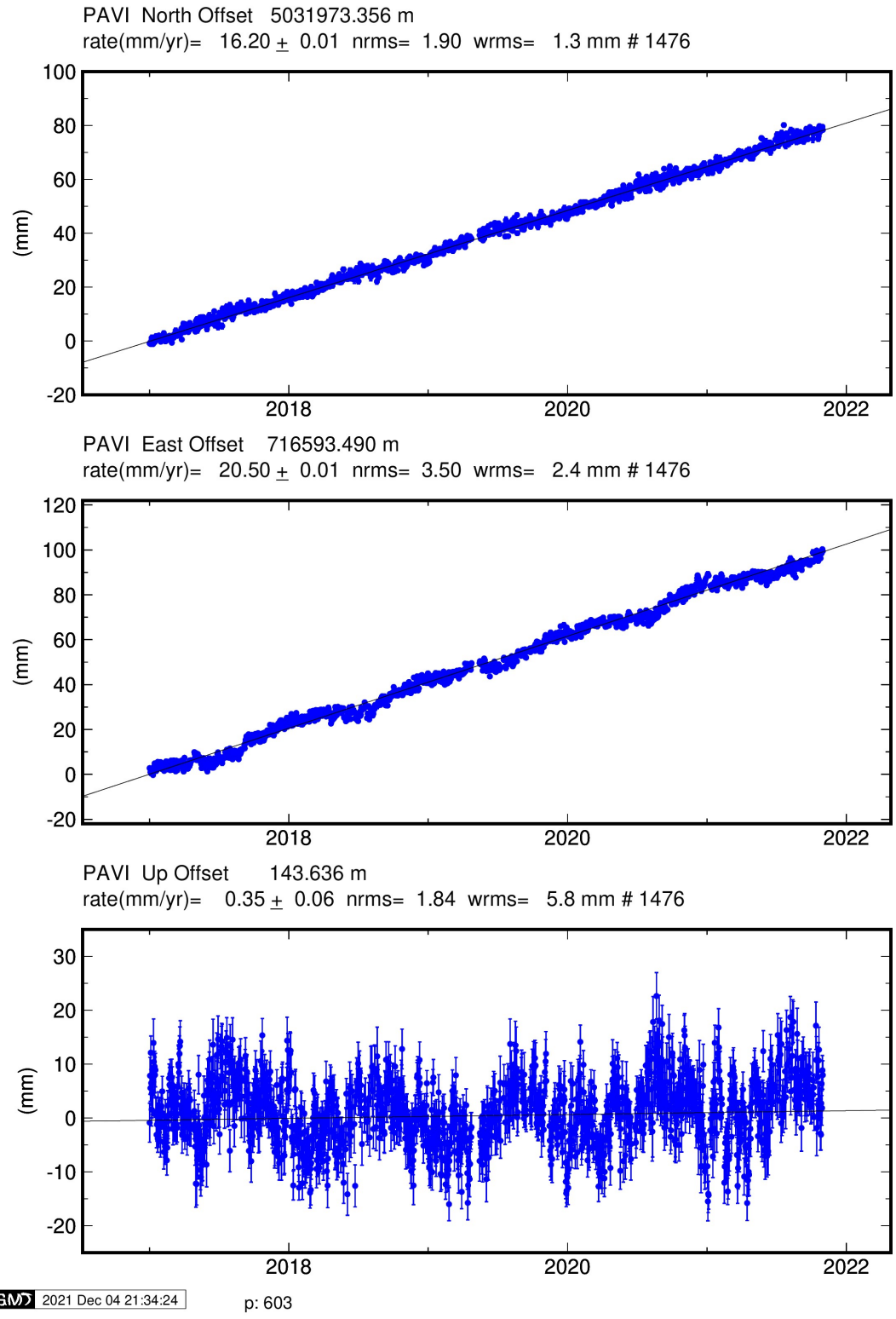
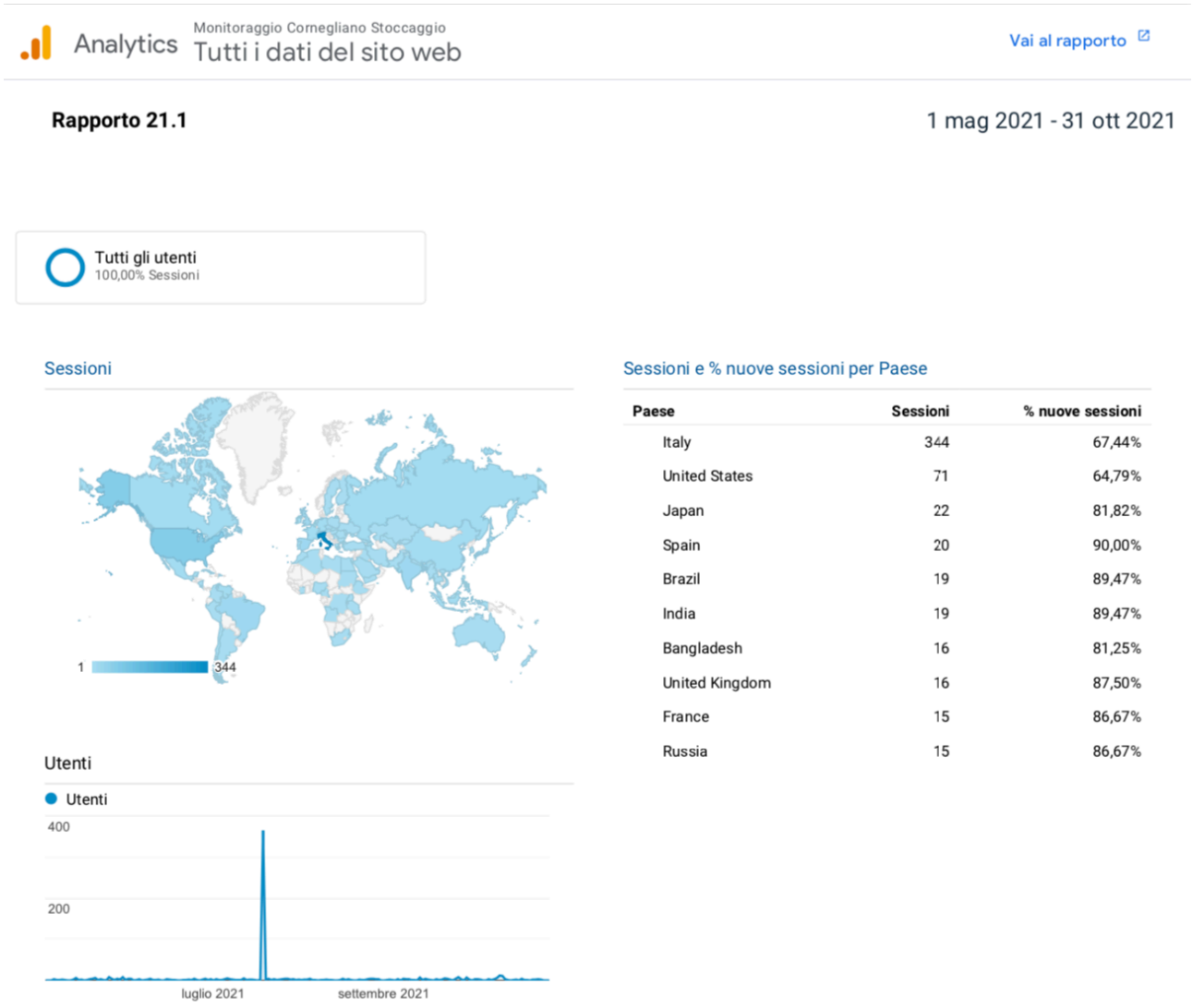


Figura C.6 *– Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF08.*

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 01/05/2021-31/10/2021 sono state aperte circa 300 sessioni sul sito web con utenti provenienti da numerose parti del mondo, come riportato in Figura D.1. Ricordiamo che a fine marzo 2021 è stata messa in linea la versione inglese del sito web.



Sessioni e % nuove sessioni per Paese

Paese	Sessioni	% nuove sessioni
Italy	344	67,44%
United States	71	64,79%
Japan	22	81,82%
Spain	20	90,00%
Brazil	19	89,47%
India	19	89,47%
Bangladesh	16	81,25%
United Kingdom	16	87,50%
France	15	86,67%
Russia	15	86,67%

Figura D.1 *– Rendiconto delle visite effettuate sul sito web nel periodo 1/05/2021-31/10/2021 per paese di provenienza e numero di utenti. Il picco visibile nella serie temporale del numero di utenti corrisponde a 364 utenti alla data del 19 luglio 2021.*