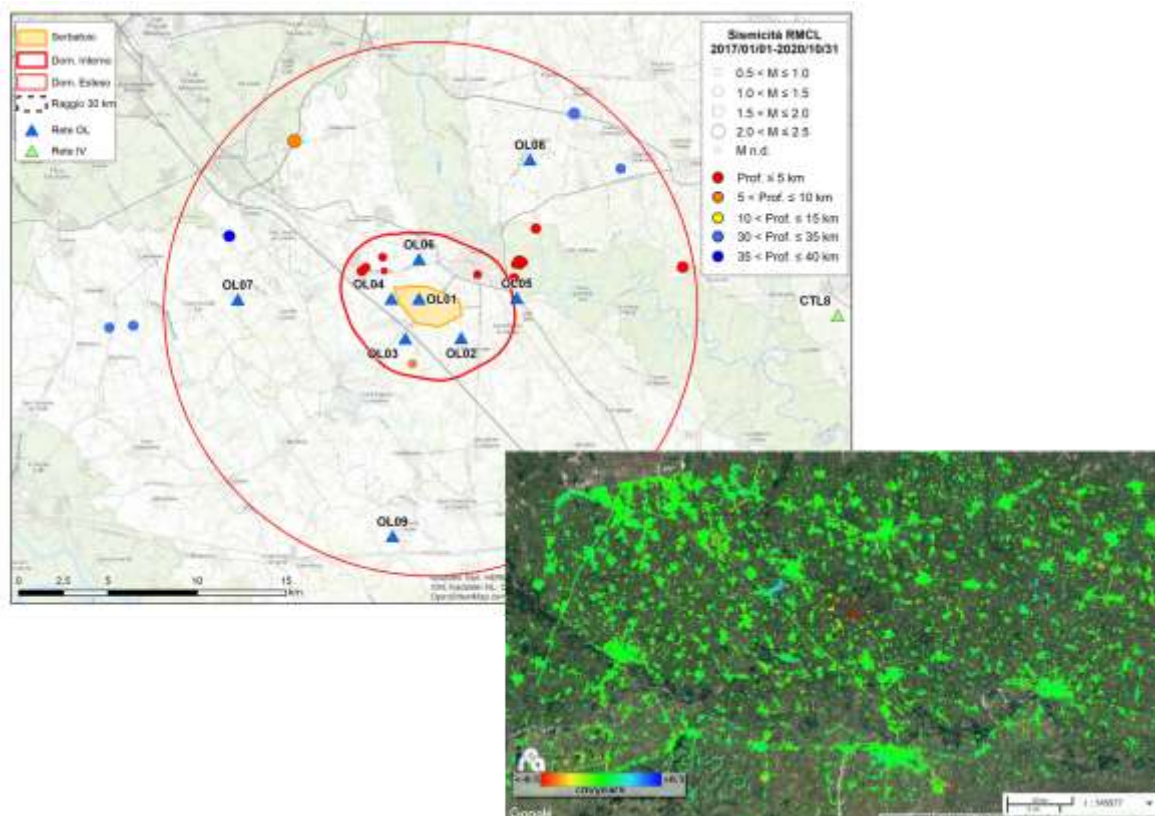


CONCESSIONE DI STOCCAGGIO DI GAS NATURALE “CORNEGLIANO STOCCAGGIO”



MONITORAGGIO SISMICO E DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

Anno di esercizio 2021 – Prima relazione annuale
2021.1

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 2021/57 Sez. CRS 14 SISMINO

Sgonico, xx luglio 2021

A cura di:

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

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

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

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

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

Visto e approvato:

Per l'OGS

il Direttore della Sezione Scientifica CRS

Prof. Stefano Parolai

Digitally signed by: PAROLAI STEFANO
Date: 30/09/2021 08:26:42

Per l'IREA-CNR

il Direttore dell'IREA-CNR

Dott. Ing. Francesco Soldovieri



Soldovieri Francesco
01.10.2021 06:43:51
GMT+00:00

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

Sommario	1
1. Monitoraggio sismico	3
1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)	4
1.2 Operatività della rete sismica	10
1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio	11
2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali	18
2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01	19
2.1.1 Dati elaborati	19
2.1.2 Risultati ottenuti	22
2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2021 (dati SENTINEL-1)	33
2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2021)	35
2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2021)	40
2.2.3 Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale	43
2.2.4 Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense.	48
3. Conclusioni	51
Bibliografia	53
Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL	55
Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione	59
Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08	62
Appendice D – Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense	69

Elenco delle abbreviazioni

AE	Area Esterna di rilevazione della rete di monitoraggio
BSI	Bollettino Sismico Italiano
CPTI15	Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Rovida et al., 2016)
CSI1.1	Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006)
DBMI15	Database Macrosismico Italiano (Locati et al., 2016)
DE	Dominio Interno di rilevazione della rete di monitoraggio (MiSE-UNMIG, 2014)
DI	Dominio Esteso di rilevazione della rete di monitoraggio (MiSE-UNMIG, 2014)
DInSAR	Differential SAR Interferometry
DISS	Database delle Sorgenti Sismiche Italiane (Basili et al., 2018; DISS Working Group, 2018)
EMSC	European-Mediterranean Seismological Centre
GAMIT/GLOBK	suite di programmi sviluppato dal MIT per analizzare dati GPS, principalmente per studiare la deformazione della crosta terrestre
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
LOS	Line of sight
MiSE-UNMIG	Ministero per lo sviluppo economico - Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse
ML	Magnitudo locale
NHNM	New High Noise Model (McNamara and Buland, 2004)
NLNM	New Low Noise Model (McNamara and Buland, 2004)
PDF	Probability Density Function
PSD	Power Spectral Density
RMCL	Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense
RSNC	Rete Sismica Nazionale Centralizzata (gestita da INGV)
RSNI	Regional Seismic network of Northwest Italy (gestita dall'Università di Genova)
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small BAseline Subset
SPIN	Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia

Indice delle figure

Figura 1 - Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee rosse indicano i perimetri del Dominio Interno (DI, linea spessa) e del Dominio Esteso (DE, linea sottile) di rilevazione. La linea tratteggiata indica la distanza di 30 km dal sito di stoccaggio e definisce l'Area Esterna. 5

Figura 2 - Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana si riconoscono le stazioni di INGV più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite dall'OGS nel periodo di tempo considerato, anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia e dalla Provincia Autonoma di Trento. Il rettangolo punteggiato di verde rappresenta l'area di riconoscimento dei terremoti regionali, indispensabile per evitare false identificazioni di eventi locali. 8

Figura 3 - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2021, a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (pannello a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione. 13

Figura 4 - Forme d'onda registrate per l'evento ML3.8 del 17/12/2020 ore 15:59:23 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, OL06, OL01 e OL08. 15

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. 16

Figura 6 - Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadramento di OL01. Queste stazioni sono MILA (Milano), PAVI (Pavia), CREM (Cremona) e CREA (Crema). 21

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). 25

Figura 8 - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 26

Figura 9 - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 27

Figura 10 - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 28

Figura 11 - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 29

Figura 12 - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle della Figura 7. 30

Figura 13 - 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)..... 31

Figura 14 - Trend lineare (nel sistema ITRF) delle stazioni intorno a OL01, calcolato sulle tre componenti a partire dal fit delle serie temporali. CREA, punti blu; CREM, punti arancio; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'arco temporale 2017-2021); PAVI, punti rossi. 32

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. 33

Figura 16 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. 36

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 - aprile 2021. La stellina nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 16. 37

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 - aprile 2021. 39

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. 40

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 - aprile 2021. La stellina nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 21. 41

Figura 21 - 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 ascendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2021. 43

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 nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). 45

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 nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). 46

Figura 24 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 23 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina 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). 47

Figura 25 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 24 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina 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). 48

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..... 49

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).	4
Tabella 2 - Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.	6
Tabella 3 - Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale gestita dall'INGV e alla Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale gestita dall'OGS.	7
Tabella 4 - Modello 1D definito in questo studio per le localizzazioni degli eventi sismici. Le colonne indicano da sinistra a destra in successione: il numero di strato, la velocità V_p , la profondità dello strato e il valore di V_p/V_s	10
Tabella 5 - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica.	11
Tabella 6 - Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, PAVI e del sito OL01. Le coordinate della stazione MIL2 sono riportate per completezza.	21
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).	23
Tabella 8 - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.	34
Tabella 9 - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati.	35

Sommario

Il presente documento descrive le attività effettuate nel periodo 1/11/2020-30/4/2021 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 primo 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 1/1/2017-30/4/2021 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 prime elaborazioni svolte sui dati acquisiti. La seconda parte (Cap. 2.2) descrive l'analisi interferometrica delle deformazioni del suolo completa fino alla data del 30/4/2021.
- 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: i risultati del monitoraggio sismico;
- Appendice C: serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08.
- Appendice D: statistiche delle visite al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense.

Come detto, il presente rapporto è stato redatto dai ricercatori e tecnologi dell'OGS e dell'IREA-CNR. I Capitoli 1, e 2.1 sono stati redatti dall'OGS; il Capitolo 2.2 è stato

scritto dall'IREA-CNR. Le conclusioni, al Capitolo 3, sono state scritte congiuntamente.

1. Monitoraggio sismico

1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)

La RMCL è composta da nove stazioni sismometriche e da una stazione geodetica GNSS permanente. Le stazioni sono indicate con la sigla OL01-OL09, in accordo al codice OL che è il codice internazionale di registrazione della RMCL. La [Tabella 1](#) ne riassume le principali informazioni, mentre la [Figura 1](#) mostra la mappa con la posizione delle stazioni. La data ufficiale di inizio operatività della RMCL è il 1/1/2017.

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

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

CODICE	LAT	LON	QUOTA (m s.l.m.)	NOME
OL01	45.291	9.464	72	Cornegliano Laudense (Cluster A)
OL02	45.266	9.485	71	Massalengo
OL03	45.266	9.453	70	Cascina Castagna
OL04	45.290	9.435	78	Cascina Taietta
OL05	45.293	9.526	75	Cascina Cavigio
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).

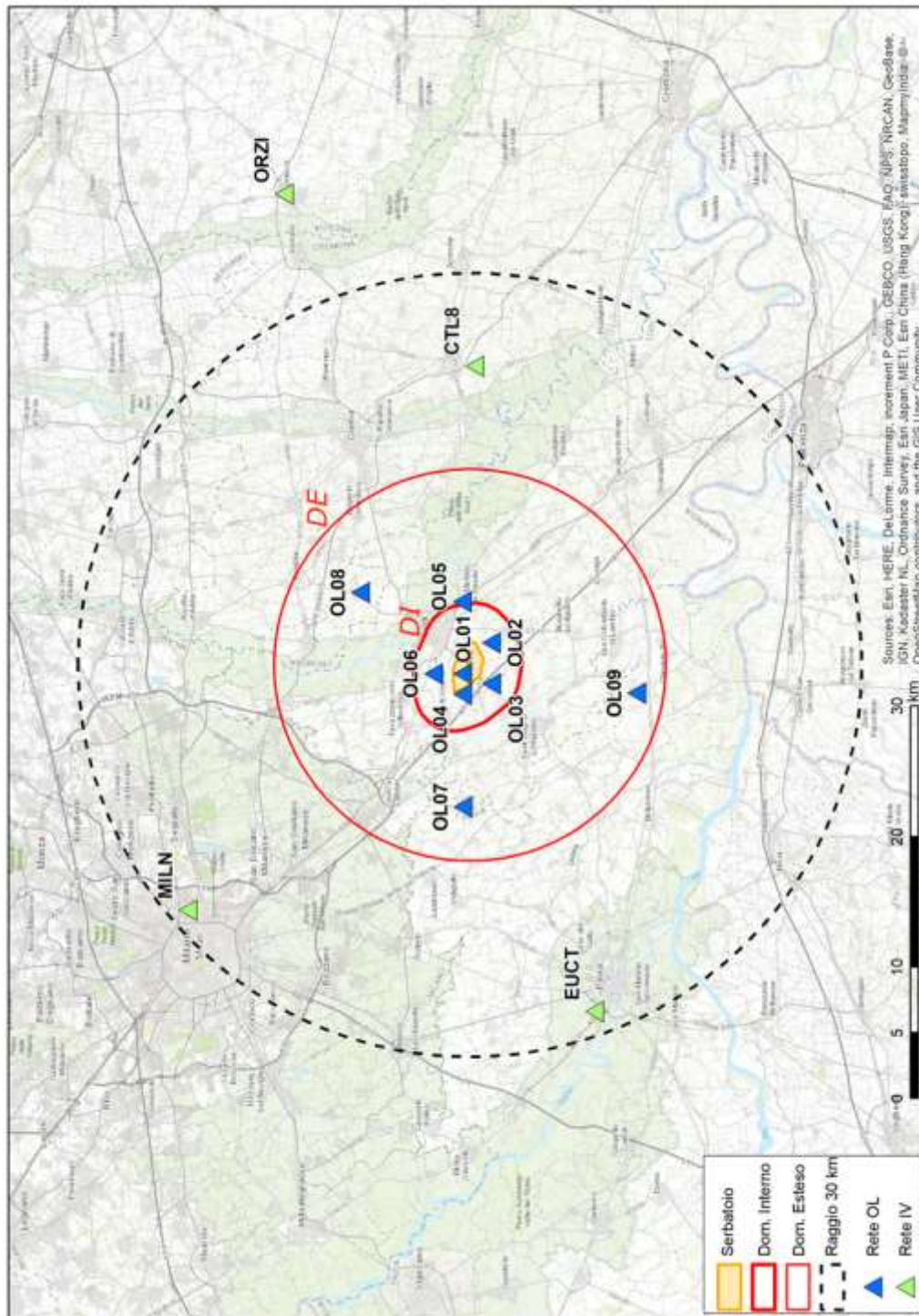


Figura 1 - Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee 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* su un sistema di archiviazione di rete (NAS di marca QNAP) con capacità complessiva di circa 20 TB che è montato direttamente come *file system* dai sistemi di acquisizione ed elaborazione. La rete RMCL accumula approssimativamente 1.2 GB di dati al giorno, quindi circa 0.5 TB all'anno. Tutte le informazioni relative ai siti e alla strumentazione installata sono anche caricate nel database che gestisce i dati sismologici strumentali dell'OGS, denominato OASIS (oasis.crs.inogs.it) e descritto in Priolo et al. (2012; 2015a).

Per migliorare la rilevazione e la localizzazione degli eventi sismici locali le stazioni della RMCL sono integrate da alcune stazioni della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC, codice IV) gestita da INGV ([Tabella 3](#)). Inoltre, per discriminare più efficacemente gli eventi lontani, anche se di scarso interesse per l'area della concessione di stoccaggio, vengono utilizzate numerose stazioni appartenenti ad altre reti che operano nel Nord Italia, quali la Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale (codice OX) gestita da OGS anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia e la Rete Sismica del Trentino (ST) della Provincia Autonoma di Trento.

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

Code	Name	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Net Code
BALD	Monte Baldo (VR)	45.6830	10.8187	1911	OX
BOB	Bobbio (PC)	44.7679	9.4478	910	IV
CTL8	Castelleone (CR)	45.2763	9.7622	60	IV
EUCT	Pavia	46.1516	12.3630	598	IV
MARN	Marana (VI)	45.6378	11.2099	785	OX
MDI	Monte di Nese (BG)	45.7697	9.716	954	IV
MILN	Milano	45.4803	9.2321	125	IV
ORZI	Orzinuovi (BS)	45.4056	9.9307	83	IV
PRMA	Parma	44.7637	10.3131	78	IV
QUIN	Quinzano D'Oglio (BS)	45.2982	10.0337	121	OX
SARZ	Sarezzano (AL)	44.8673	8.9136	266	IV
VARA	Monte Varagna (TN)	45.8260	10.8965	1735	OX

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

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

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

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

- **real-time**, è la parte di elaborazione che comprende il riconoscimento e la localizzazione automatica degli eventi sismici con eventuale notifica di eventi locali al personale di reperibilità;
- **off-line**, è la parte che comprende la rielaborazione di tutti i dati con controllo manuale e che viene effettuata con cadenza periodica o, in caso di evento locale, nelle ore successive al suo verificarsi.

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

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



acquisite dal sistema.

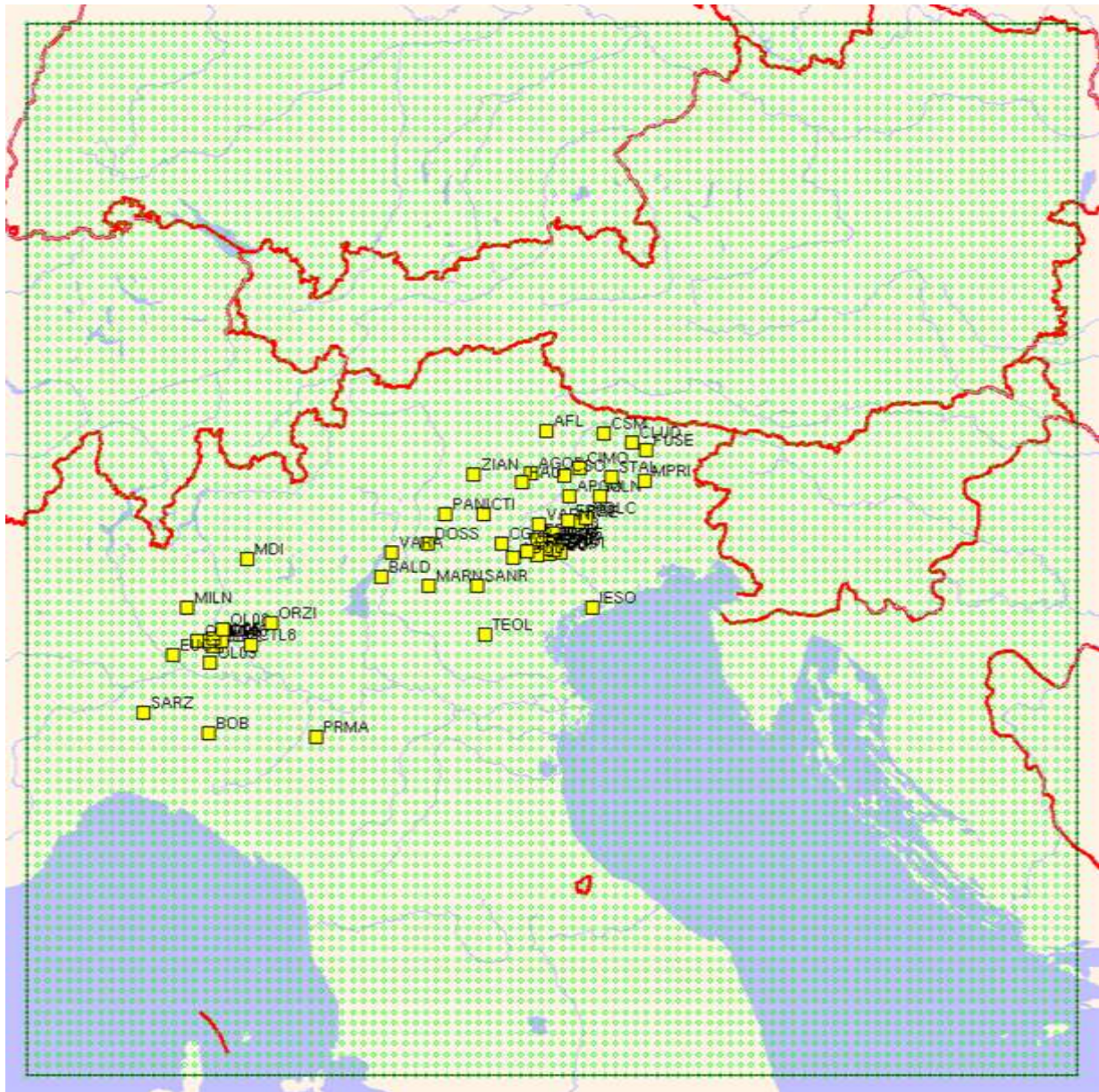


Figura 2 - Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana si riconoscono le stazioni di INGV più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite dall'OGS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

- **associazione**, è l'operazione con cui un evento viene classificato come tale in base al fatto che numerose stazioni rilevano dei *trigger* con una certa sincronia.

L'associatore valuta questa coincidenza temporale per una serie di localizzazioni di prova all'interno di un volume ben definito e delimitato in superficie dall'area di interesse; se una o più di queste superano dei test di attendibilità, ne conferma la migliore.

Le operazioni svolte dai due rami di elaborazione si differenziano in funzione di obiettivi diversi. Il sistema real-time, in caso di evento con magnitudo superiore ad una soglia prestabilita, esegue le procedure di notifica (es: invio del messaggio di allerta al personale reperibile, aggiornamento delle tabelle e delle pagine di notifica), il ramo off-line prosegue con operazioni mirate a qualificare in modo più accurato gli eventi rilevati. Per questo motivo i due rami di elaborazione utilizzano configurazioni alquanto diverse.

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

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

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

Per quanto riguarda la magnitudo, è calcolata la magnitudo locale (ML) con la formula di attenuazione di Bragato e Tonto (2005).

Le informazioni riguardanti la rete di monitoraggio sismico e le procedure adottate per il riconoscimento e la stima dei parametri degli eventi sismici sono riportate anche nel sito web all'indirizzo rete-cornegliano.crs.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 V_p , la profondità dello strato e il valore di V_p/V_s .

1.2 Operatività della rete sismica

Durante il periodo in esame (1/11/2020-30/4/2021) 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 ad esclusione del mese di dicembre 2020. In quell'occasione abbiamo riscontrato una ridotta disponibilità di dati per le stazioni della rete a causa del maltempo persistente nel Lodigiano. Il cielo nuvoloso o maltempo sono infatti causa di una irradiazione solare insufficiente nei pannelli fotovoltaici che contribuiscono all'alimentazione della strumentazione. La disponibilità dei dati acquisiti mese per mese, nel periodo considerato, è riassunta dalle tabelle riportate in Appendice A.

Per quanto riguarda l'esercizio delle stazioni, oltre all'ordinaria manutenzione operata da remoto, sono stati effettuati due interventi in loco per la sostituzione e integrazione di alcune componenti delle stazioni, come indicato in [Tabella 5](#).

Data	Stazione	Intervento
20/11/2020	OL01	sostituzione regolatore di carica a energia solare WRM-15
20/11/2020	OL07	installazione di un secondo acquisitore Minimus (#665A) per collegare il sensore a fondo pozzo (#TR4004). NB. Stazione con doppia strumentazione (pozzo/superficie)
14/12/2020	OL01	sostituzione batterie

14/12/2020	OL08	sostituzione batterie
14/12/2020	OL03	sostituzione batterie
15/12/2020	OL07	sostituzione batterie, disinstallazione Minimus (#665A) collegato al sensore a fondo pozzo
15/12/2020	OL04	sostituzione batterie
15/12/2020	OL02	sostituzione batterie

Tabella 5 - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica.

1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio

Nel periodo 1/11/2020-30/4/2021 la RMCL ha rilevato tre eventi sismici nei domini di rilevazione, uno dei quali è l'evento di magnitudo M_L 3.8 (secondo la localizzazione ufficiale INGV) del 17/12/2020 verificatosi presso Milano (<http://terremoti.ingv.it/event/25805541>). La RMCL ha localizzato questo evento a una profondità di 42 km e stimato per esso una magnitudo pari a M_L 3.3. Si nota una certa discrepanza rispetto ai parametri forniti dalla Rete Sismica Nazionale di INGV, che ha stimato la profondità a 55 km e la magnitudo locale a M_L 3.8. Ciò è dovuto sia alla diversa configurazione della rete RMCL che è progettata per avere massima accuratezza nei due Domini di rilevazione, rispettivamente Interno ed Esterno, sia al fatto che per calibrare correttamente le procedure usate rispettivamente per la localizzazione e per il calcolo della magnitudo deve essere disponibile un dataset di eventi sismici più corposo di quello fin qui ottenuto dalla RMCL. Il terremoto si inserisce nel contesto di una sismicità di basso livello riconosciuta fra i fiumi Ticino e Adda. Il recente lavoro di Peruzza et al. (2021), che ha rielaborato la sismicità storica e strumentale dell'area, ha identificato dal 1985 al 2019 la presenza di alcuni terremoti di M_L inferiore a 3.5, avvenuti a profondità simili a quello del 17 dicembre 2020. Il secondo evento rilevato, di magnitudo 2.7, si è verificato il 17/1/2021 in prossimità di Milano ad una profondità di circa 18 km. L'ultimo evento rilevato nel periodo 1/11/2020-30/4/2021 si è verificato il 21/2/2021 nell'Oltrepò Pavese, con magnitudo stimata M_L 1.7, ed è stato localizzato anche dalla Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale (RSI) (<http://www.distav.unige.it/rsni/pg-man-loc.php?var1=210221085409&lang=it>). I tre eventi sismici sopra descritti sono localizzati nell'Area Esterna e quindi non associabili alle attività di stoccaggio.

Nella [Figura 3](#) riportiamo la mappa con gli eventi sismici rilevati a partire dal 1/1/2017. La lista di tutti gli eventi rilevati a partire dal 1/1/2017 è riportata nella Appendice B.

La [Figura 4](#) mostra, a titolo di esempio, i sismogrammi registrati dalla rete per l'evento M_L 3.8 del 17/12/2020 ore 15:59:23 avvenuto nell'Area Esterna. La distanza epicentrale delle stazioni visualizzate è compresa tra 19 e 27 km.

La [Figura 5](#) mostra i dati medi dell'attività di stoccaggio del gas con un campionamento orario. I due grafici rappresentano la pressione media (unità in bar)

misurata al collettore dei pozzi e la portata (unità in metri cubi standard all'ora) durante le attività dell'impianto. I grafici sono aggiornati quotidianamente. I dati sono forniti da Ital Gas Storage. Nel cluster A sono attivi 6 pozzi, nel cluster B sono stati attivi 4 pozzi fino al 31/3/2020 poi a partire dal 1/4/2020 sono attivi 6 pozzi. Dai grafici si può notare come nel periodo di avvio dello stoccaggio ci sia stata una sequenza alternata di fasi di iniezione e fasi di fermo delle attività che ha l'effetto di ridurre l'accumulo locale di stress. La [Figura 5](#) mostra il volume complessivo del gas iniettato nel serbatoio. I valori numerici del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato sensibile commerciale, considerato riservato.

(a)

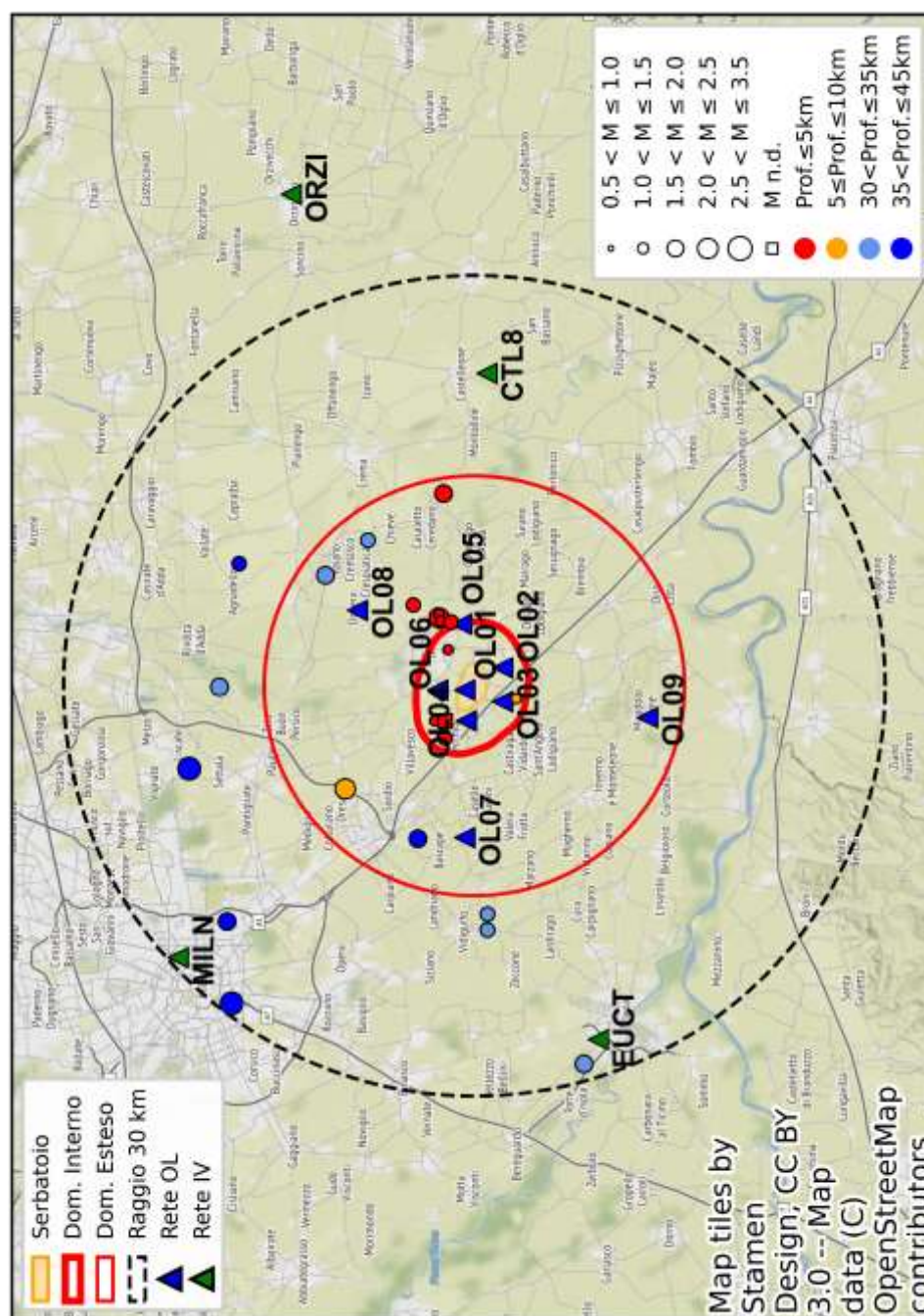


Figura 3 - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2021, a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (pannello a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione.



OGS

Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

(b)

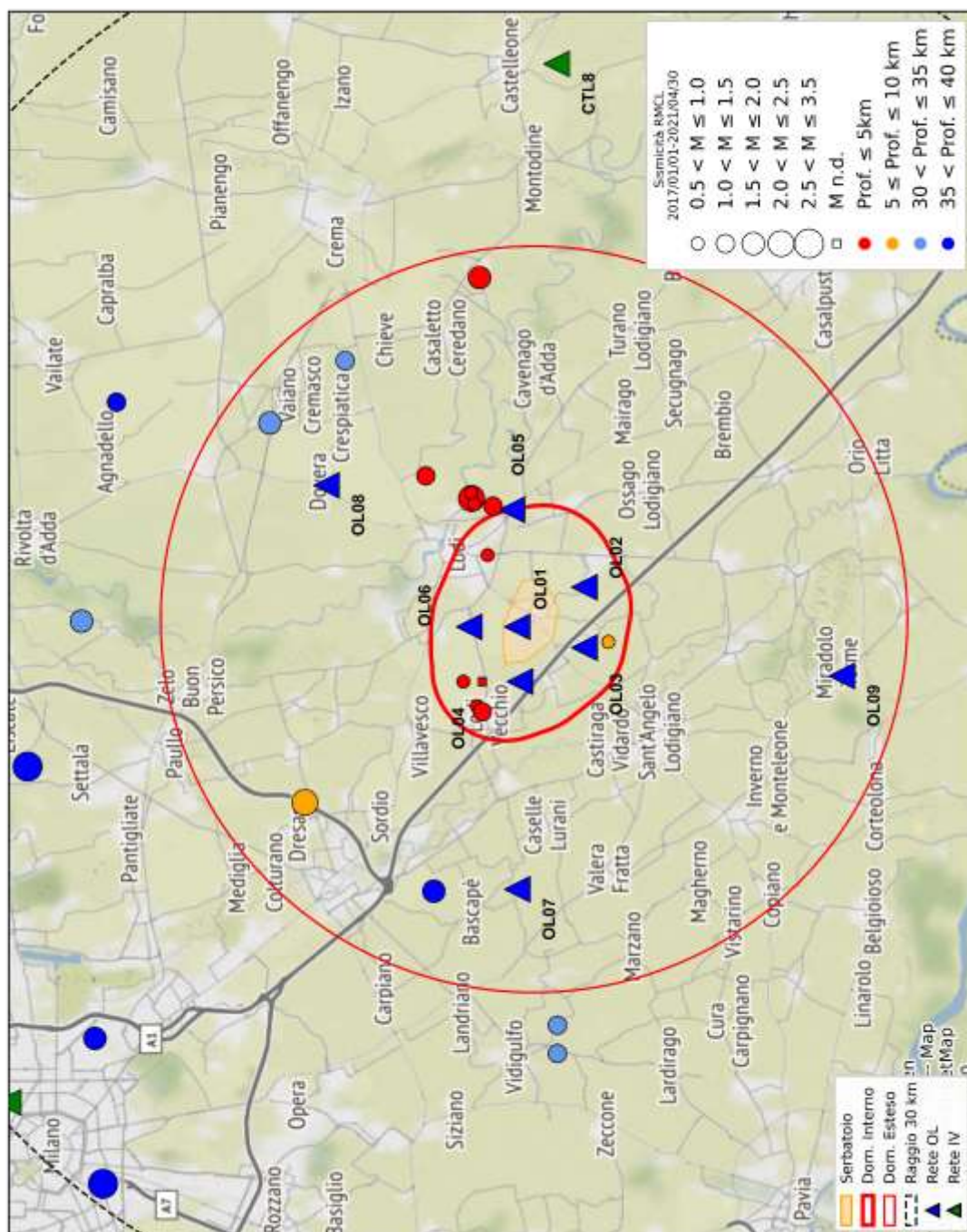


Figura 3 – continua dalla pagina precedente.

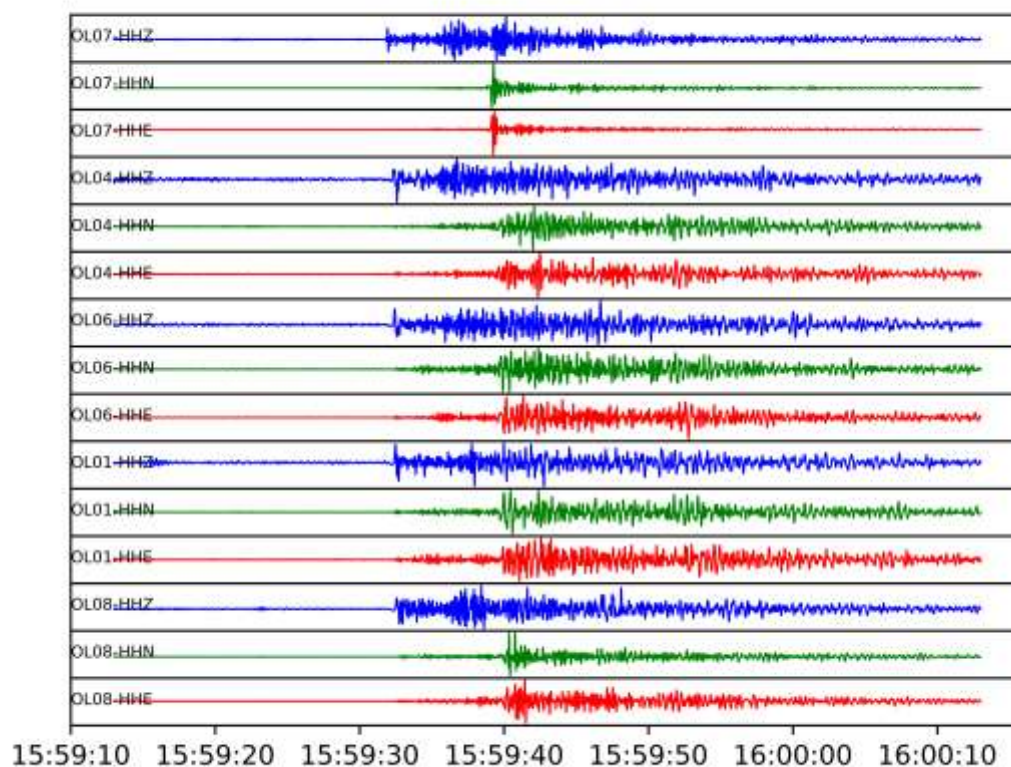
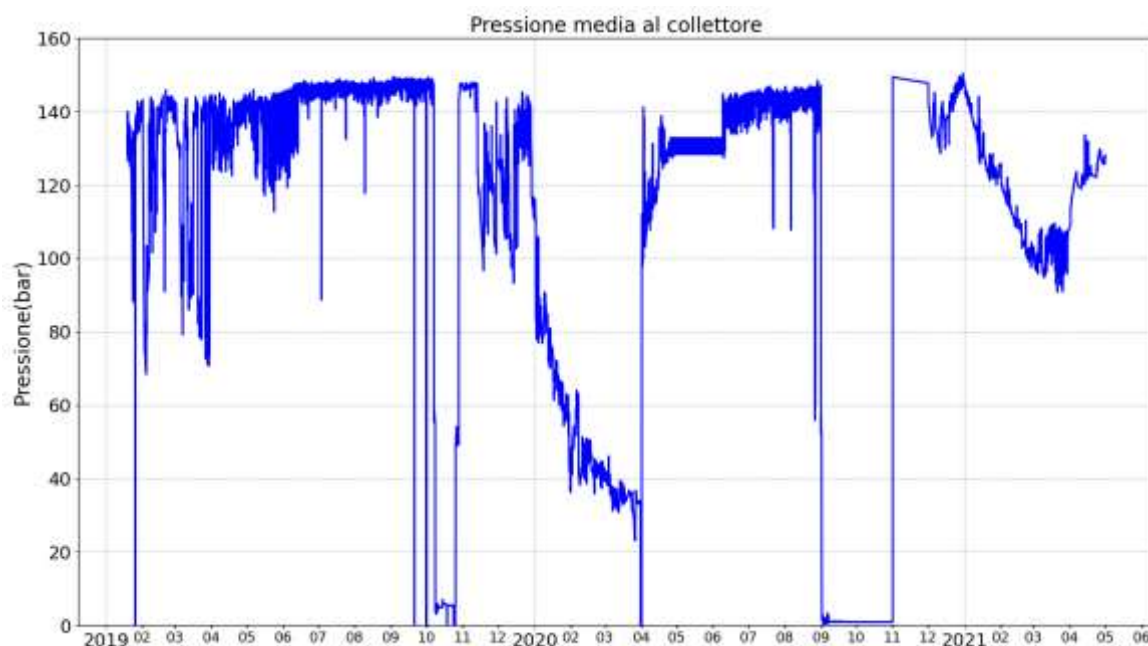


Figura 4 - Forme d'onda registrate per l'evento ML3.8 del 17/12/2020 ore 15:59:23 avvenuto nell'Area Esterna. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL07, OL04, OL06, OL01 e OL08.

(a)



(b)

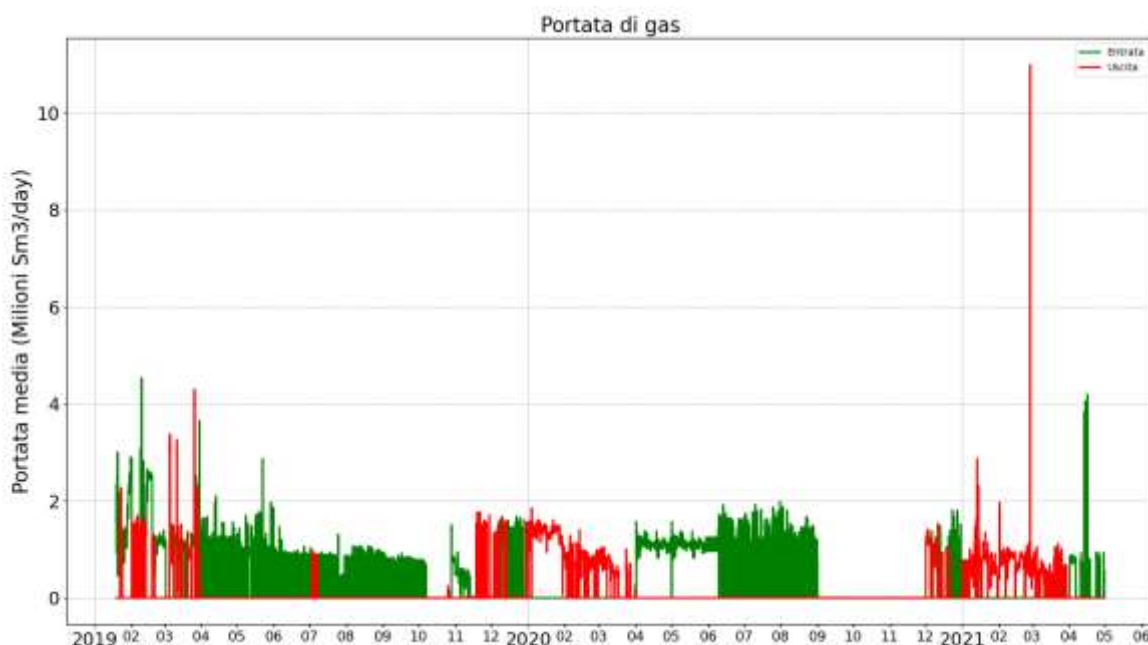


Figura 5 – (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard all'ora) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in entrata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

(c)

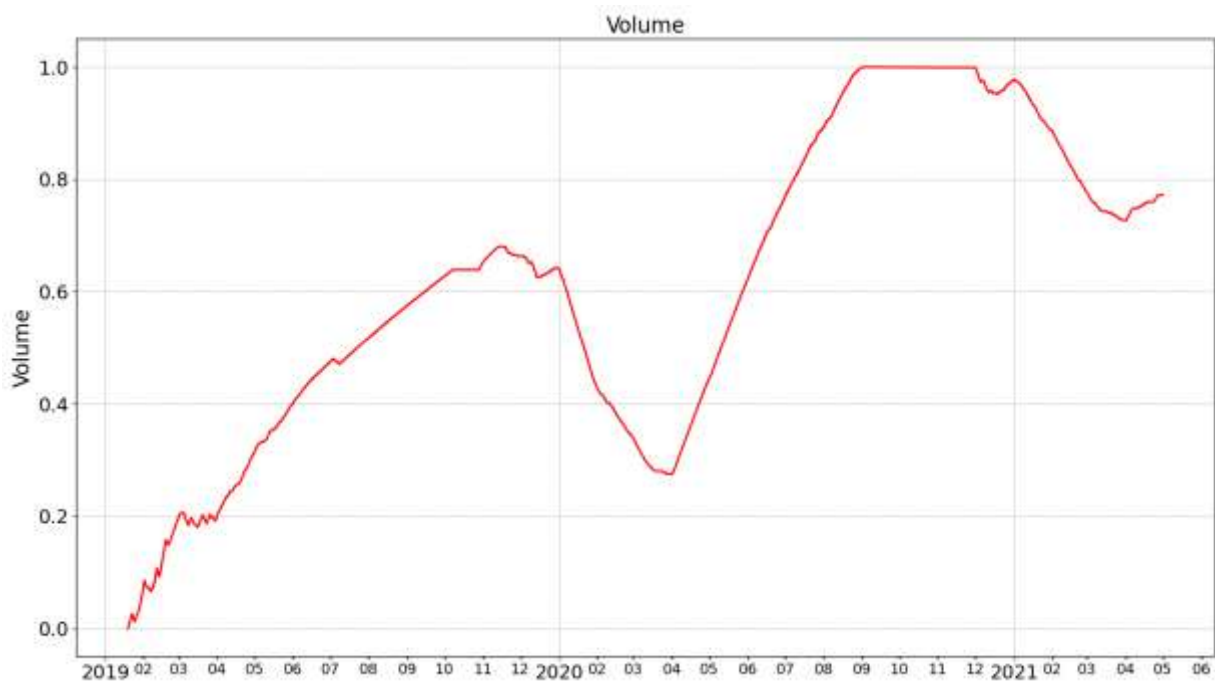


Figura 5 – Continua dalla pagina precedente.

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 la stazione sismometrica. La stazione GNSS è operativa da fine ottobre 2016 ed è in grado di ricevere i segnali di sei sistemi satellitari di navigazione: GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, SBAS e BeiDou.

Le osservazioni (dati in formato RINEX, *Receiver Independent Exchange Format*) della stazione GNSS, sono state elaborate in modo da ottenere le stime giornaliere delle coordinate di OL01. I valori ottenuti sono raccolti in 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.

In questo lavoro, l'intervallo di tempo considerato è 01/01/2017-30/04/2021.

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: 01/06/2019-31/10/2019, 14/11/2019-25/11/2019 e 07/12/2019-10/01/2020. Non è stato possibile recuperare i dati mancanti neanche accedendo ai dati dal disco interno del ricevitore GNSS di OL01.

2.1.1 Dati elaborati

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

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

con il pacchetto software GAMIT/GLOBK, sviluppato dal Massachusetts Institute of Technology (web.mit.edu), 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 30/04/2021, in modo da poter inserire nel calcolo modelli atmosferici (Tregoning et al., 2005), prodotti dal MIT (Massachusetts Institute of Technology) e disponibili con un ritardo compreso tra le due e le tre settimane (<ftp://everest.mit.edu>).

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.

I dati RINEX di OL01 registrati dal 01/01/2017 fino al 30/04/2021 sono 1220, così come le giornate elaborate. L'elaborazione dei dati ha infatti prodotto, per OL01, 1206 soluzioni pari all'utilizzo del 98,85% 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;
- PAVI (Pavia), *baseline* pari a 27.6 km.

Si ricorda che la stazione MILA, i cui dati sono stati elaborati fino al giorno 08/02/2019, è stata dismessa e sostituita da MIL2 (coordinate: 45° 28' 42.145091" N, 09° 13' 45.193712" E, quota: 191.119 m; distante 27.8 km da OL01), disponibile nelle elaborazioni dal 06/03/2019. Considerato che le serie temporali di lunghezza inferiore a 2.5 anni sono soggette a bias non trascurabili nella stima della velocità, e che quindi la loro analisi non porta a risultati attendibili (Blewitt and Lavallée, 2002), nel presente lavoro riportiamo la stazione di MIL2 solo per completezza e ci riserviamo il suo inserimento nell'analisi dei dati soltanto fra qualche mese.

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



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

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/>).

SITE CODE	LOCALITA'	RICEVITORE	ANTENNA	LATITUDINE LONGITUDINE	QUOTA [m]
CREA	Crema	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45° 21' 15,592537" N 9° 41' 07,096872" E	129,818
CREM	Cremona	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45° 08' 47.927515" N 10° 00' 07.025904" E	102,733
MILA	Milano	TPS NET-G3 (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D 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_GG D 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, PAVI e del sito OL01. Le coordinate della stazione MIL2 sono riportate per completezza.

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 01/01/2017-30/04/2021.

Le serie temporali sono disponibili in due sistemi di riferimento diversi: quello internazionale ITRF08 (le cui serie sono mostrate in Appendice C) e quello europeo EURA (le cui serie sono mostrate nelle Figure 7-12). 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 realizzate attraverso un fit lineare sull'intera serie temporale degli spostamenti e quindi rappresentano un valore medio della velocità sull'intero 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 la possibilità di valutare gli spostamenti della stazione in relazione all'attività di stoccaggio.

Confrontando le serie delle stazioni della Rete GNSS LODI, si nota che queste hanno un andamento congruente in ciascuno dei sistemi ITRF e EURA. 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). Tuttavia, le serie temporali riportate nella relazione precedente mostravano un insolito "picco" positivo sulla componente verticale, visibile non solo su OL01 ma in tutte le stazioni nella seconda metà del 2020, picco che è invece assente nelle serie temporali relative a quest'ultimo periodo considerato. I controlli che abbiamo effettuato negli ultimi mesi hanno rivelato che tale "picco" era dovuto a un'incongruenza tra i modelli usati per il calcolo dei due tipi di H-files (files in formato GAMIT contenenti le matrici di covarianza e i parametri per le soluzioni debolmente vincolate, usati come input in GLOBK) delle stazioni di riferimento globali (higs e heur) che combiniamo con la nostra soluzione. Quindi, dopo che sono stati resi disponibili degli H-files con modelli coerenti tra loro dal repository SOPAC (<http://sopac-csrc.ucsd.edu/>), abbiamo riprocessato i dati relativi alla seconda metà del 2020 e il "picco" è stato così corretto.

La [Tabella 7](#) mostra le velocità stimate dal fit delle serie temporali nel sistema EURA considerando il periodo 01/01/2017–30/04/2021. In entrambi i sistemi di riferimento le velocità delle stazioni di CREA, CREM, MILA e PAVI sono simili.

Nel sistema di riferimento ITRF, le velocità stimate delle componenti orizzontali, hanno valori compresi tra 15.9 mm/anno del sito CREA e 16.4 mm/anno del sito CREM in

direzione Nord, e tra 20.2 mm/anno del sito MILA e 20.8 mm/anno del sito CREM in direzione Est. Nella direzione verticale, i valori sono compresi tra -1.0 mm/anno del sito MILA e -0.3 mm/anno del sito CREM.

Nel sistema di riferimento EURA, le velocità stimate hanno valori inferiori o uguali a 1 mm/anno per tutte le stazioni di riferimento per tutte le componenti, orizzontali e verticali. La stazione OL01 mostra invece valori superiori, che si attestano a quasi 2 mm/anno per le componenti orizzontale Nord e verticale.

Le velocità di OL01 si discostano da quelle delle altre stazioni in particolare per la componente verticale. Si ricorda, che tali valori, stimati sull'intero periodo di osservazione della stazione OL01 devono essere considerati ancora preliminari in quanto la quantità di dati disponibili è esigua rispetto ai piccoli valori di velocità di deformazione stimati e le interruzioni di dati nel 2019 accentuano il carattere solo "preliminare" di queste velocità.

	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	17.8	19.2	2.1	1.9	-0.8	2
CREA	15.9	20.5	-0.3	-0.1	0.5	-0.3
CREM	16.4	20.8	-0.34	0.6	0.7	-0.4
MILA	16.2	20.2	-1	0.4	0.2	-1
PAVI	16.1	20.7	-0.2	0.2	0.7	-0.2

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).

È possibile inoltre, che le differenze nelle velocità tra OL01 e le altre stazioni siano dovute a eventuali anomalie locali legate ad esempio allo stoccaggio di gas nel serbatoio. È stato quindi compiuto un ulteriore passo nelle analisi dei dati.

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 calcolato la media del trend di queste stazioni nel sistema di riferimento ITRF e l'abbiamo sottratta, giorno per giorno nelle tre componenti, alla serie temporale di OL01. In questo modo, il segnale residuo su OL01 rappresenta il comportamento locale della stazione stessa. Il risultato è riportato in [Figura 13](#).

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. I valori massimi di spostamento rilevati sono dell'ordine di 5-10 mm, e rientrano,

considerando le osservazioni di alcuni studi precedenti effettuati anche in Lombardia (Teatini et al., 2011; Zhou et al., 2019), all'interno dei valori attesi per l'area sopra il serbatoio di stoccaggio e potranno arrivare ad alcune decine di millimetri quando lo stoccaggio sarà a regime. Considerando la posizione della stazione OL01 rispetto al serbatoio di stoccaggio, lo spostamento in direzione Nord-Ovest è coerente con il progressivo riempimento del serbatoio. Discuteremo meglio questo comportamento nel contesto più completo delle misurazioni satellitari effettuate con la tecnica DInSAR più avanti, nel capitolo 2.2.4.

Un risultato analogo si otterrebbe anche se si scegliesse di calcolare il residuo di OL01 rispetto a solo una delle altre stazioni. Infatti, come si evince dalla [Figura 14](#), le stazioni situate intorno a OL01, ovvero CREA, CREM, MILA (con MIL2), e PAVI, mostrano trend temporali molto simili fra di loro, e questo è indicativo di un comportamento omogeneo delle stazioni stesse.

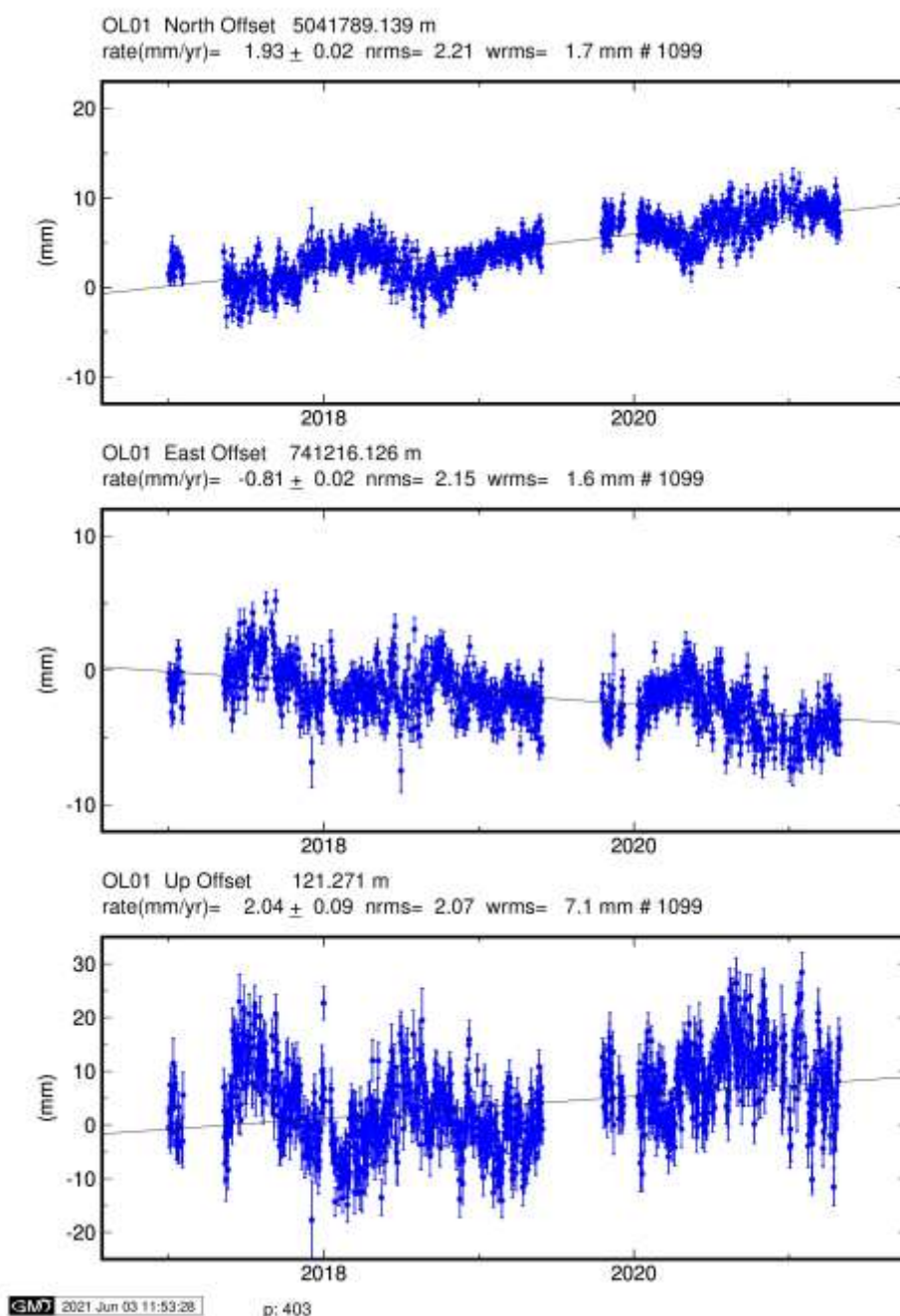


Figura 7 - Serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 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).

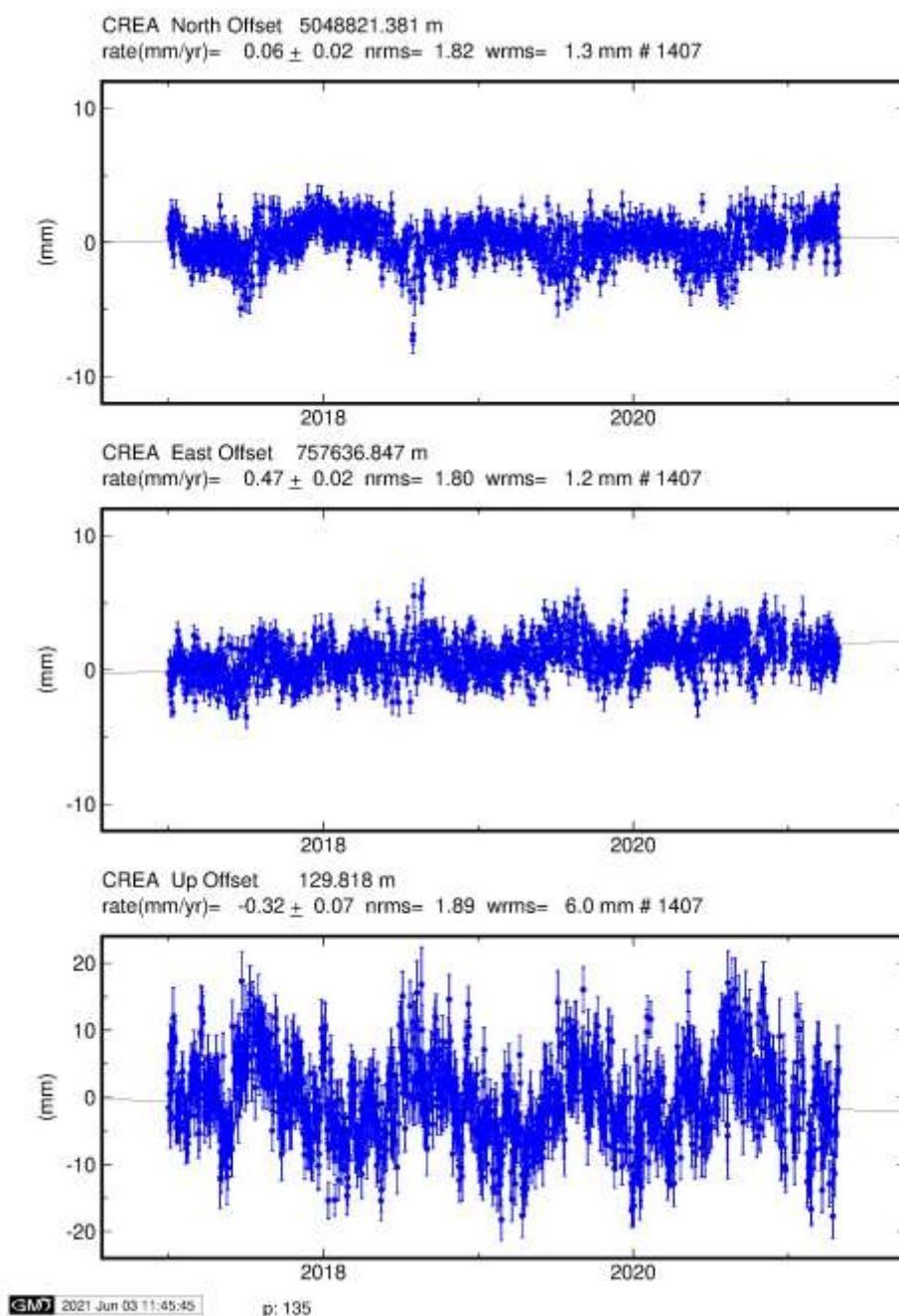


Figura 8 - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

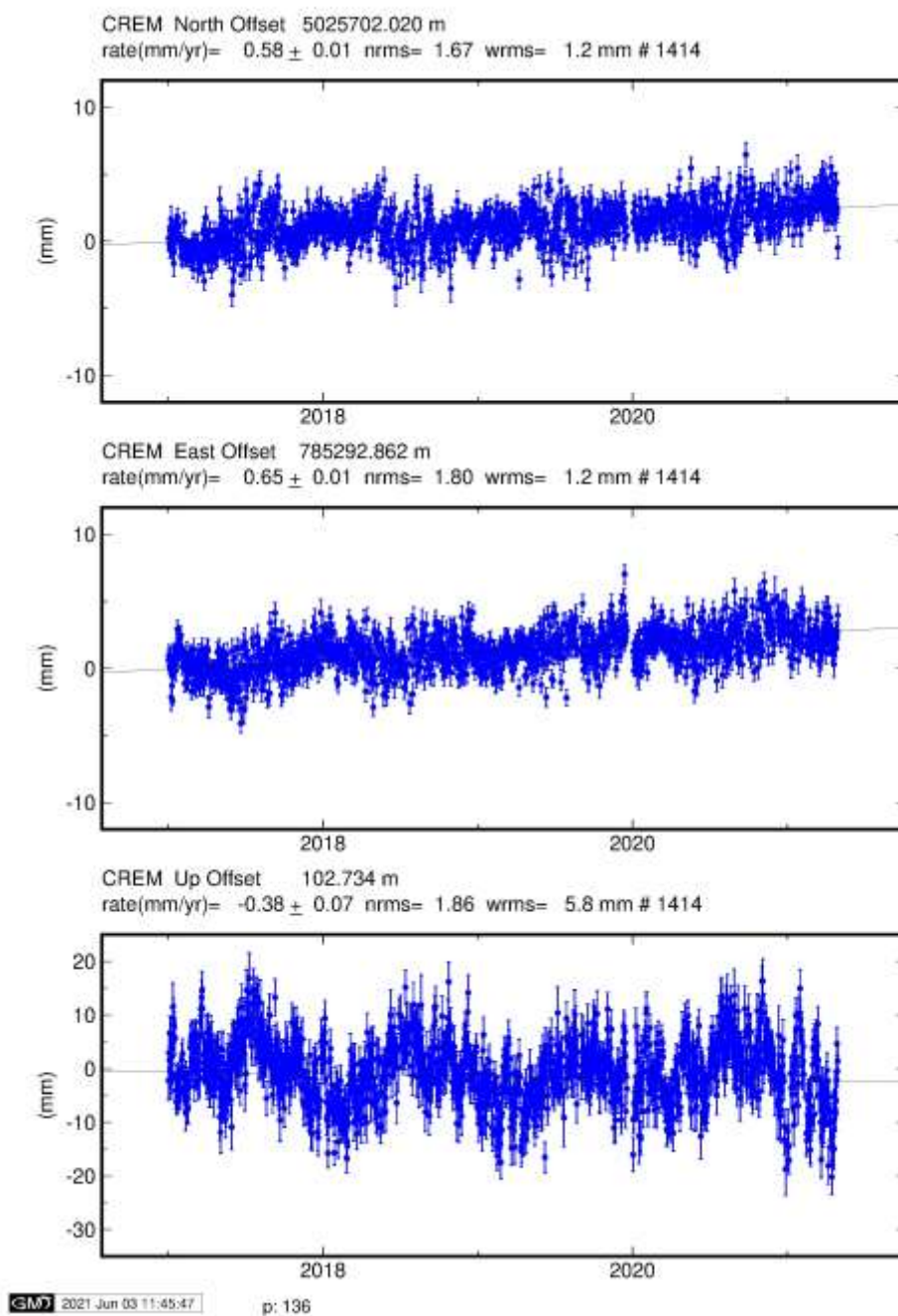


Figura 9 - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

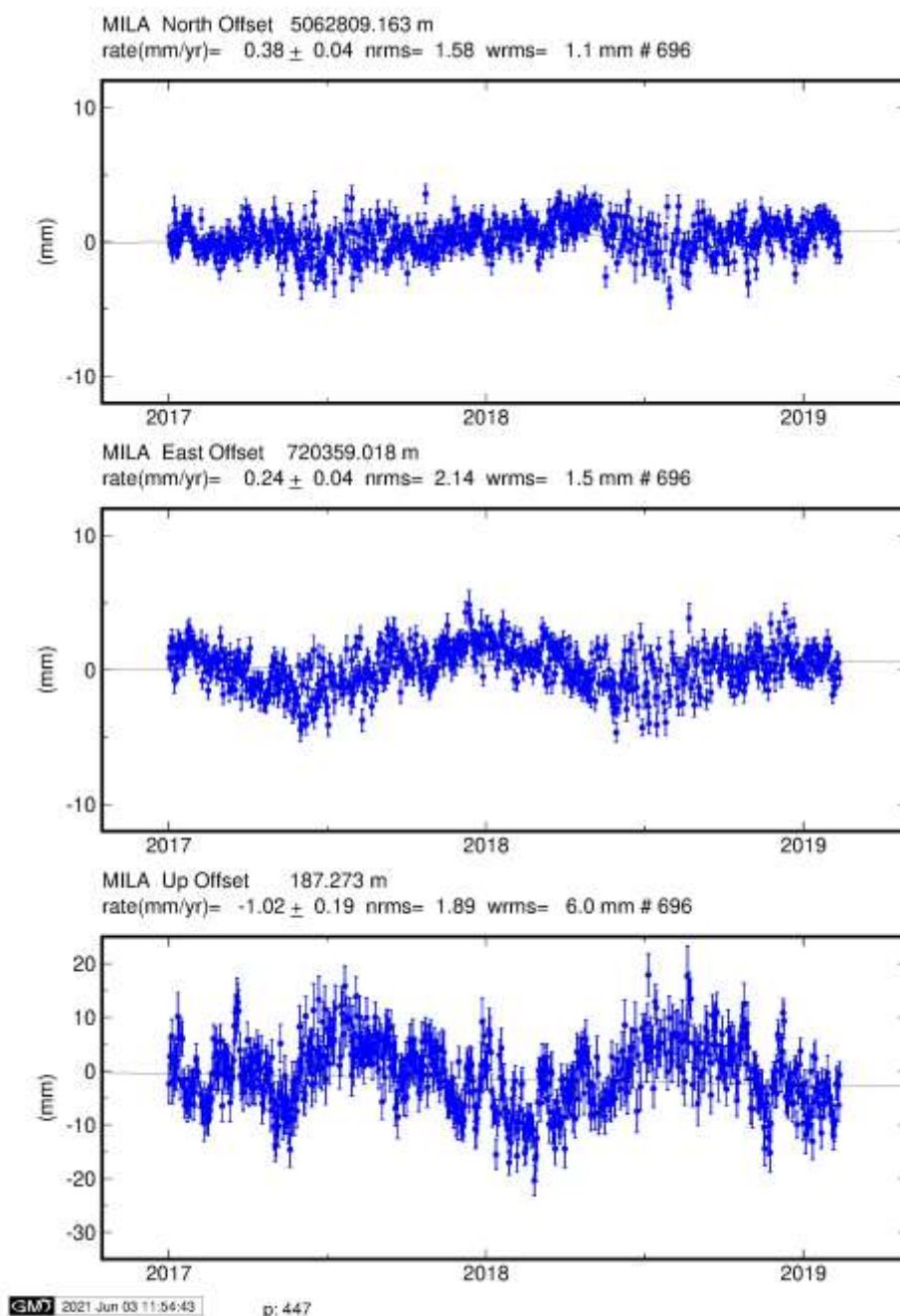


Figura 10 - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

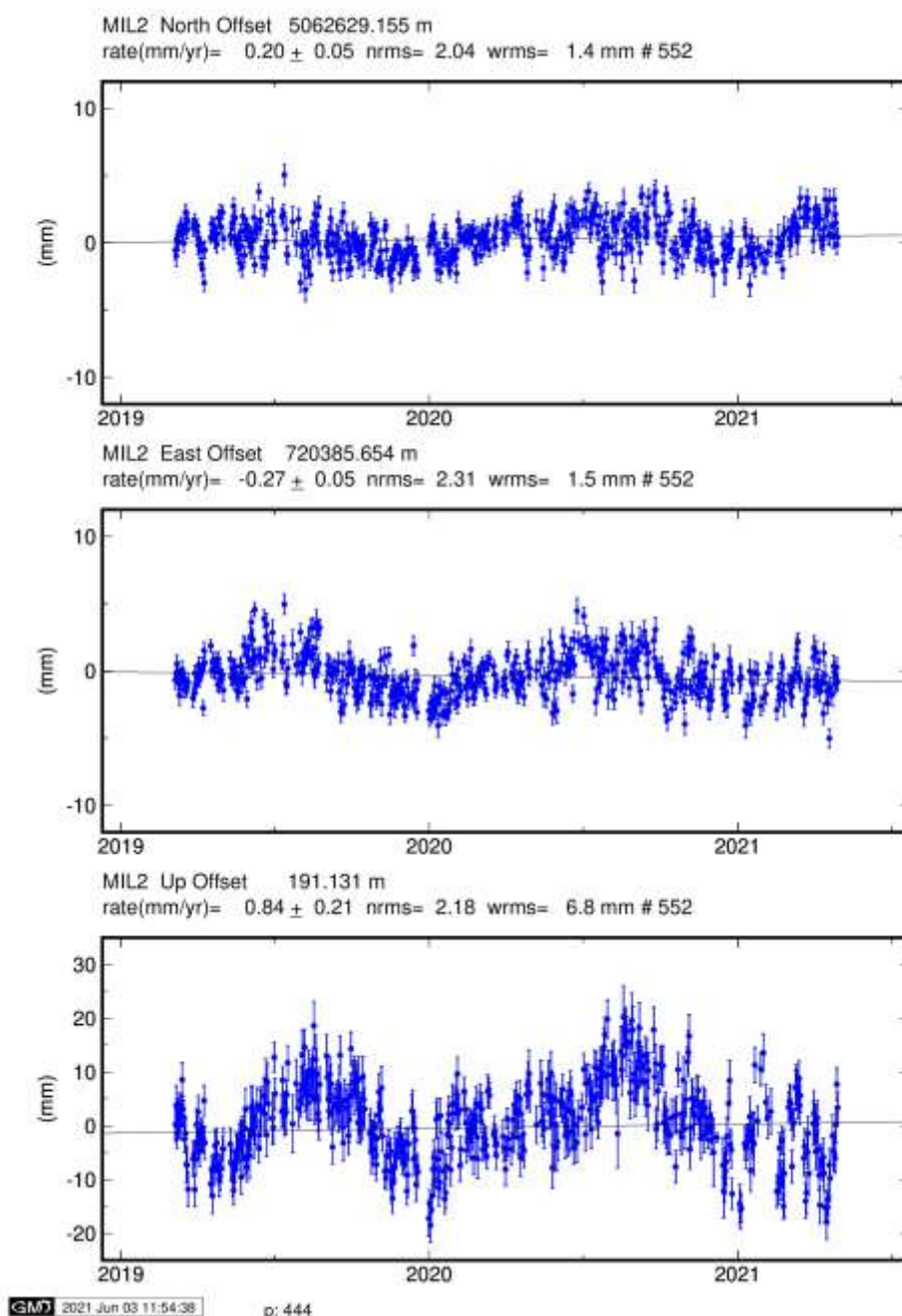


Figura 11 - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

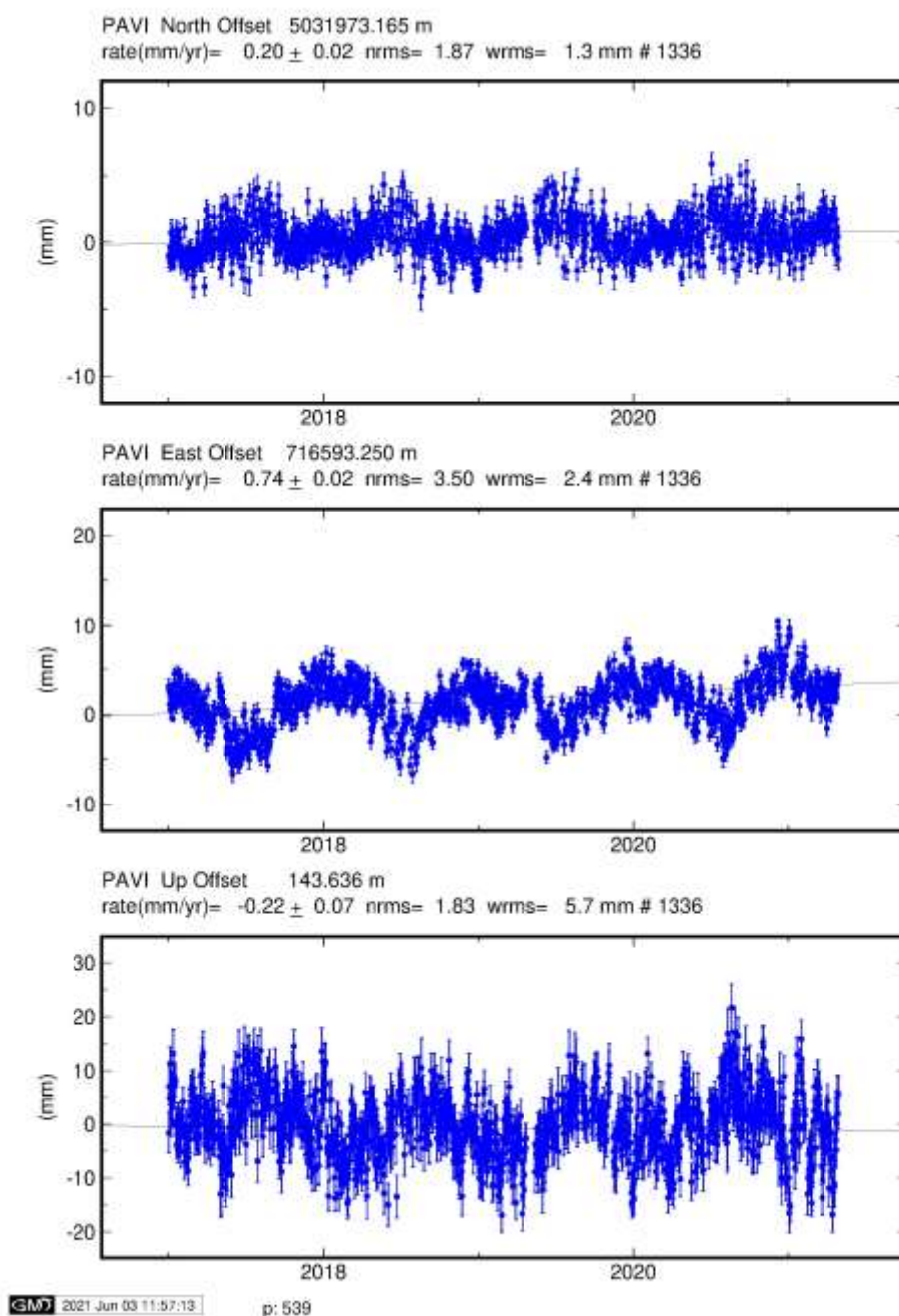


Figura 12 - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle della [Figura 7](#).



OGS

Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

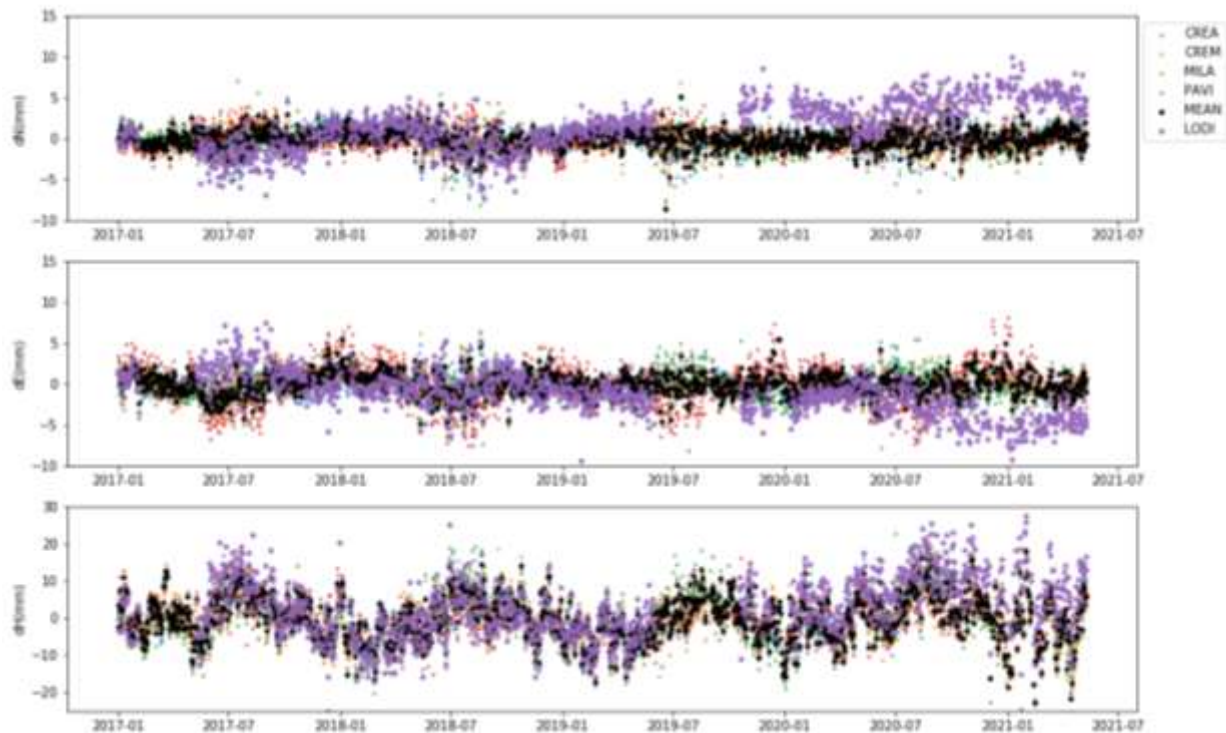


Figura 13 - Residui delle serie temporali NORTH, EAST, UP delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. I colori utilizzati per le stazioni di riferimento sono: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire 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).

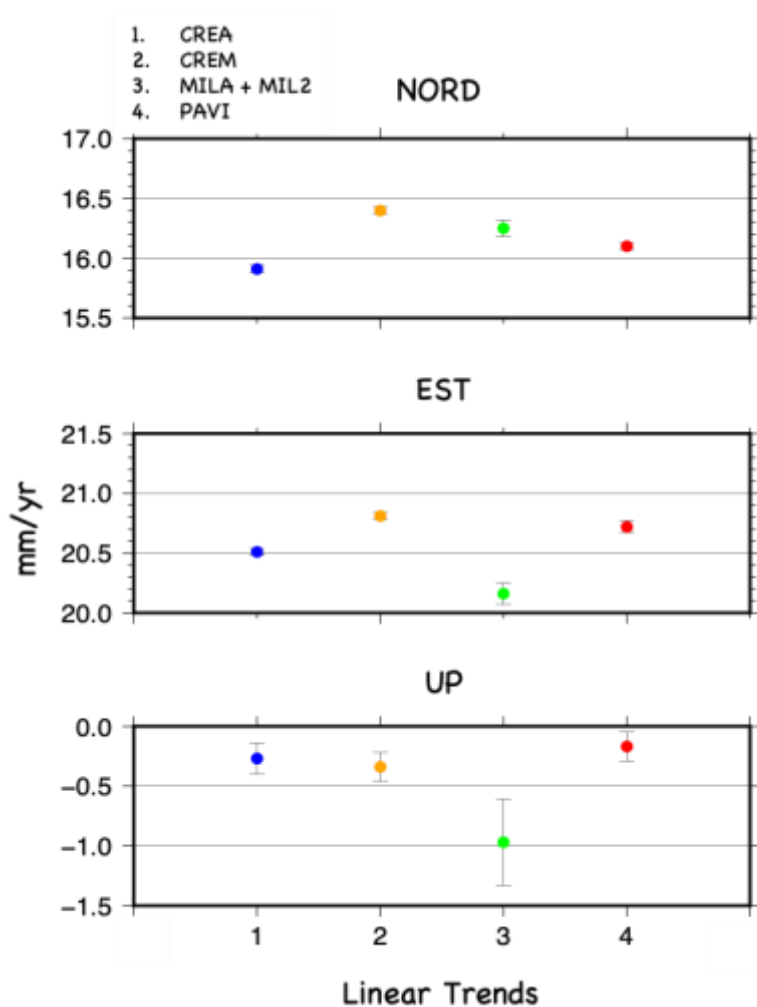


Figura 14 - Trend lineare (nel sistema ITRF) delle stazioni intorno a OL01, calcolato sulle tre componenti a partire dal fit delle serie temporali. CREA, punti blu; CREM, punti arancio; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'arco temporale 2017-2021); PAVI, punti rossi.

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 307 immagini acquisite lungo orbite ascendenti e 319 lungo orbite discendenti, relative al periodo marzo 2015 – aprile 2021; in [Figura 15](#) è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 857 e 899 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

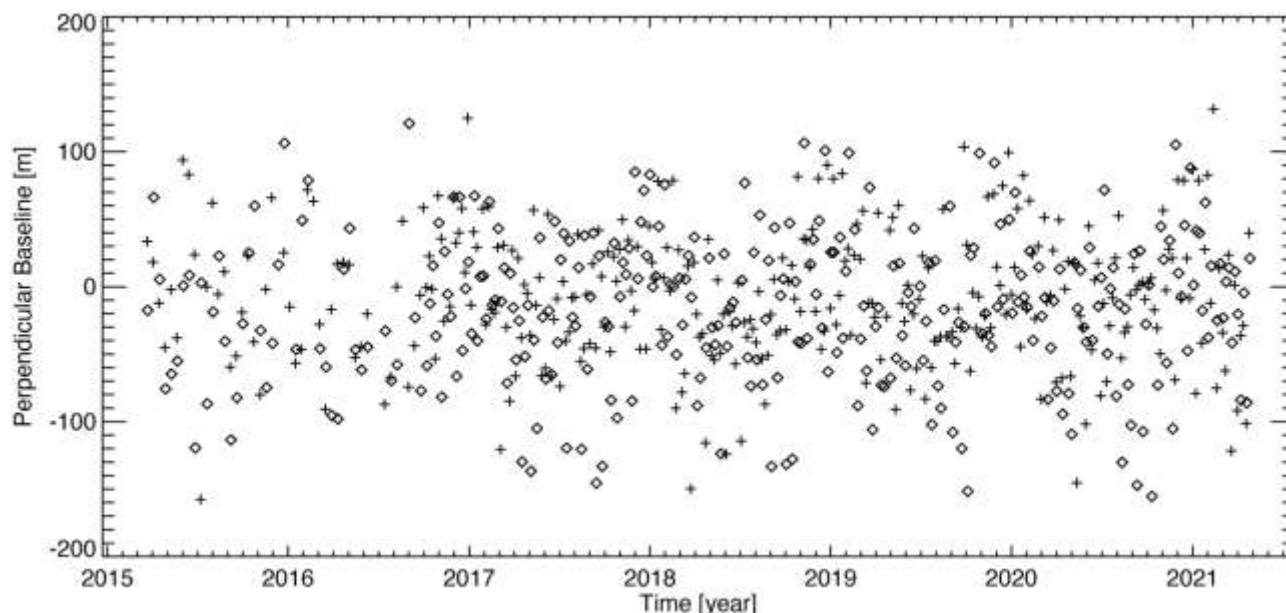


Figura 15 - Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.

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

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

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

Si sottolinea che tutti i risultati mostrati fanno riferimento all'area comune ed ai pixel comuni alle analisi effettuate sui dati acquisiti dalle orbite discendenti ed ascendenti da parte dei satelliti Sentinel-1A (S-1A) e Sentinel-1B (S-1B) che compongono la costellazione. Si segnala inoltre che, al fine di minimizzare quanto più possibile eventuali effetti di decorrelazione o rumorosità presenti nei risultati, ai prodotti interferometrici finali è stata applicata una soglia di coerenza 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 – aprile 2021

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

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-25/04/2021	319	899

Ascendente	23/03/2015-26/04/2021	307	857
------------	-----------------------	-----	-----

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

2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – aprile 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 319 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – aprile 2021 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 16](#); grazie ad essi sono stati generati 899 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

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

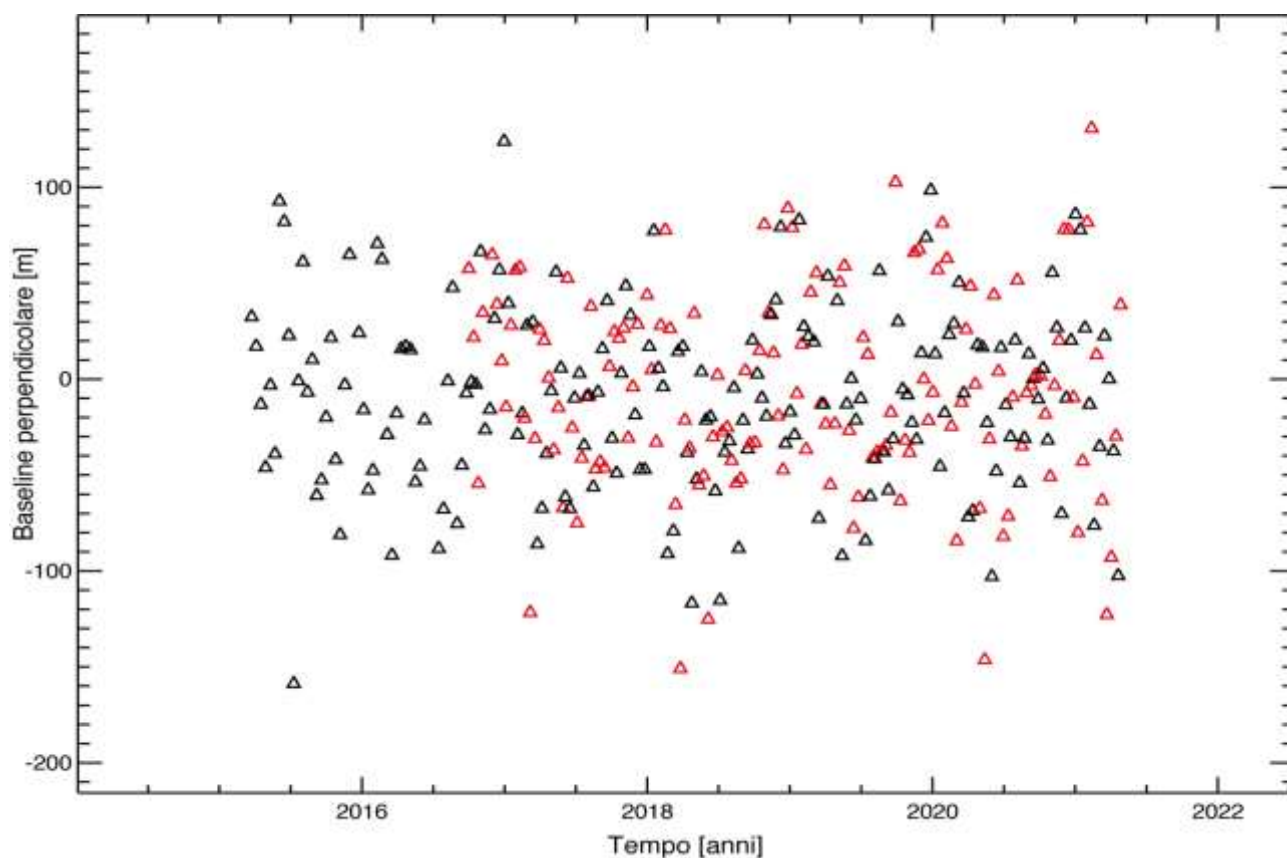


Figura 16 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GPS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in [Figura 17](#) sono evidenziate le posizioni delle tre stazioni GPS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline bianche) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina nel riquadro bianco indica la posizione del sito di stoccaggio.

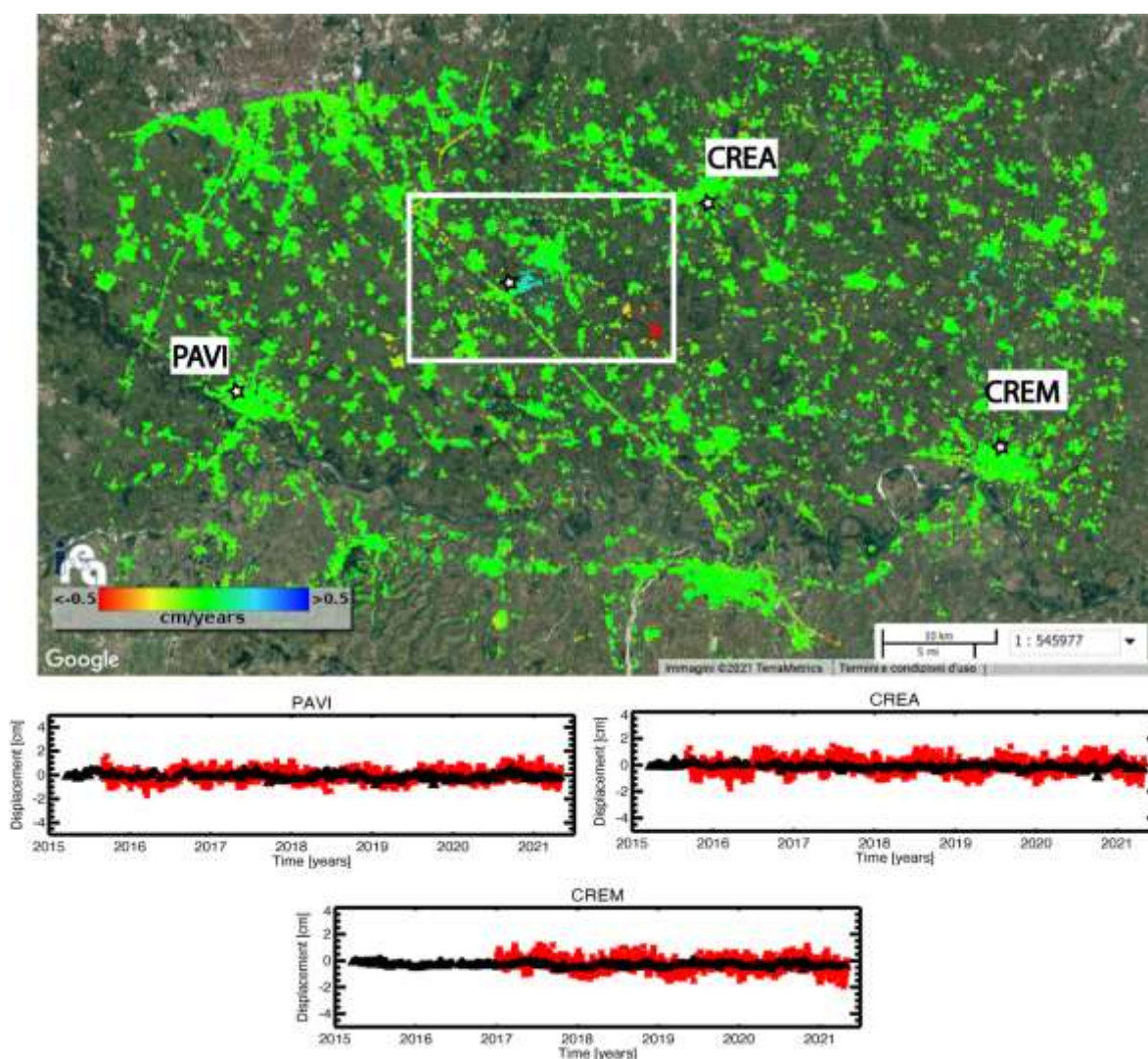


Figura 17 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2021. La stellina nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 16](#).

Come si evince dai grafici, i confronti tra le misure radar DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo; ciò è anche testimoniato dai valori delle deviazioni standard delle differenze tra le due misure di deformazione, il cui valor medio è inferiore a 0.4 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 17](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in [Figura 17](#)).

L'analisi effettuata evidenzia che, coerentemente con le precedenti analisi, nelle aree identificate dai punti P1 e P3 non si rilevano deformazioni significative (superiori a 2–3 mm/anno). Nella zona circostante il punto P2, invece, si nota un trend di sollevamento del suolo (avvicinamento al sensore lungo la sua linea di vista) a partire dall'inizio del 2019, periodo in cui sono iniziate le attività di stoccaggio, fino a settembre 2019, con un'escursione di circa 1 cm e velocità media di circa 1 cm/anno. Tale trend sembra poi assumere un andamento lievemente oscillante con uno spostamento di circa 1.5 cm. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza 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.

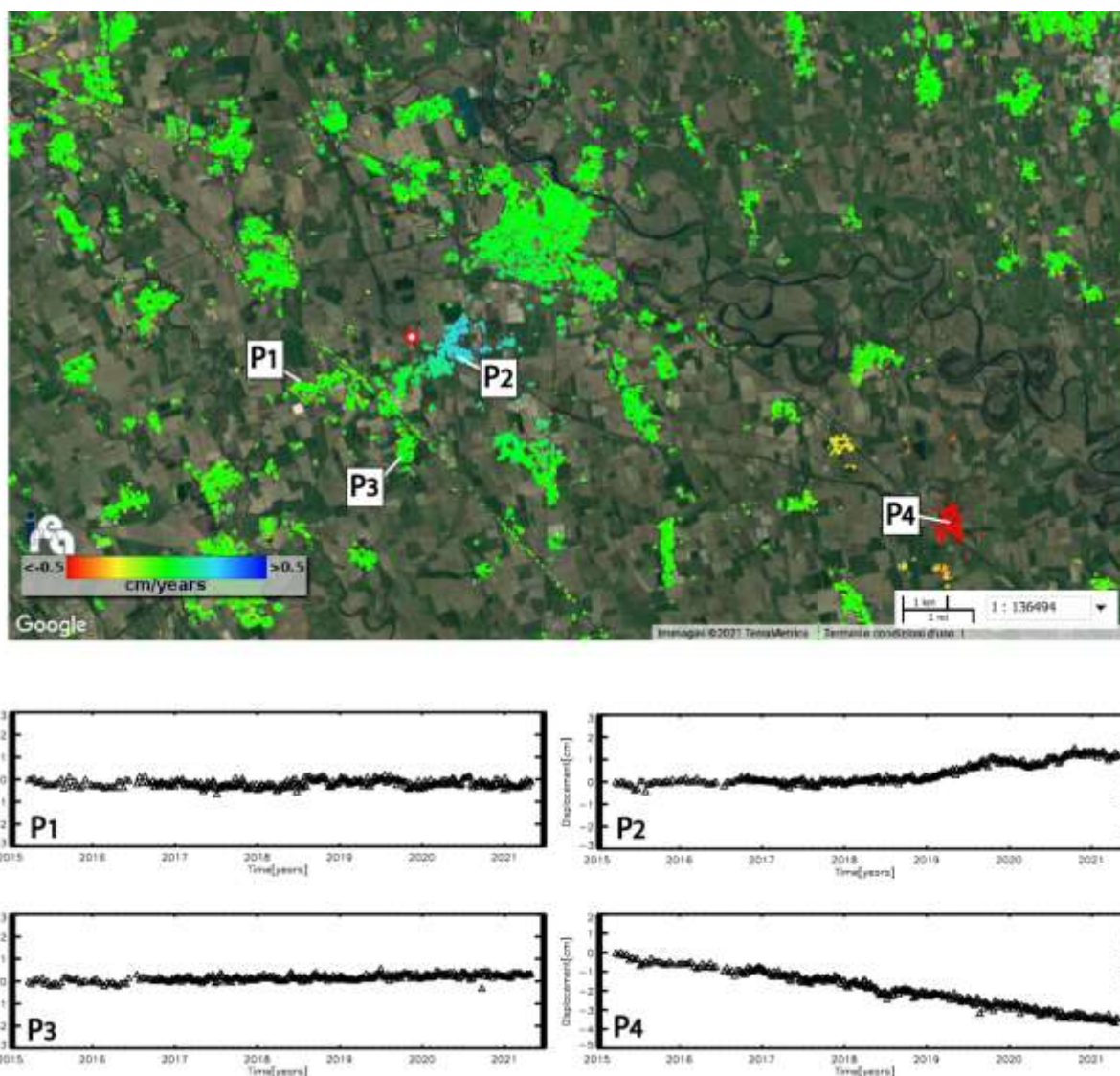


Figura 18 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 17](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto 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 - aprile 2021.

2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 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 – aprile 2021 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, sono stati utilizzati 307 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 19](#), con i quali sono stati generati 857 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in [Figura 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.

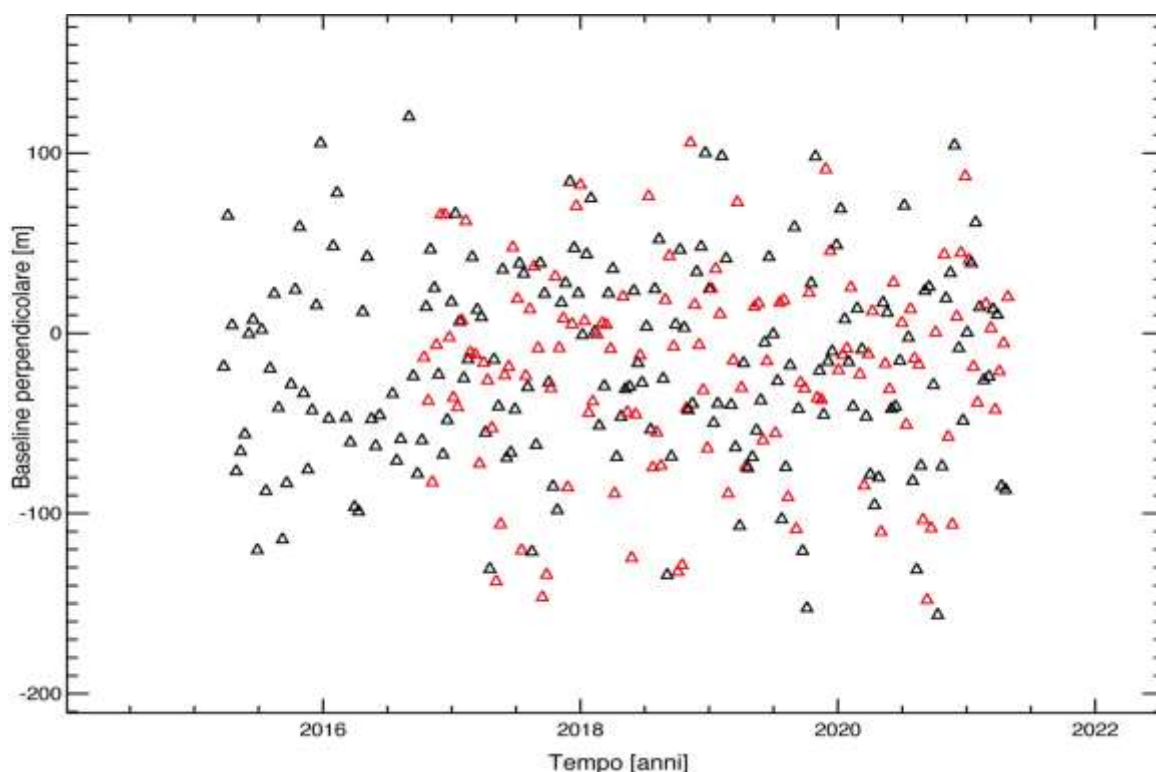


Figura 19 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.

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

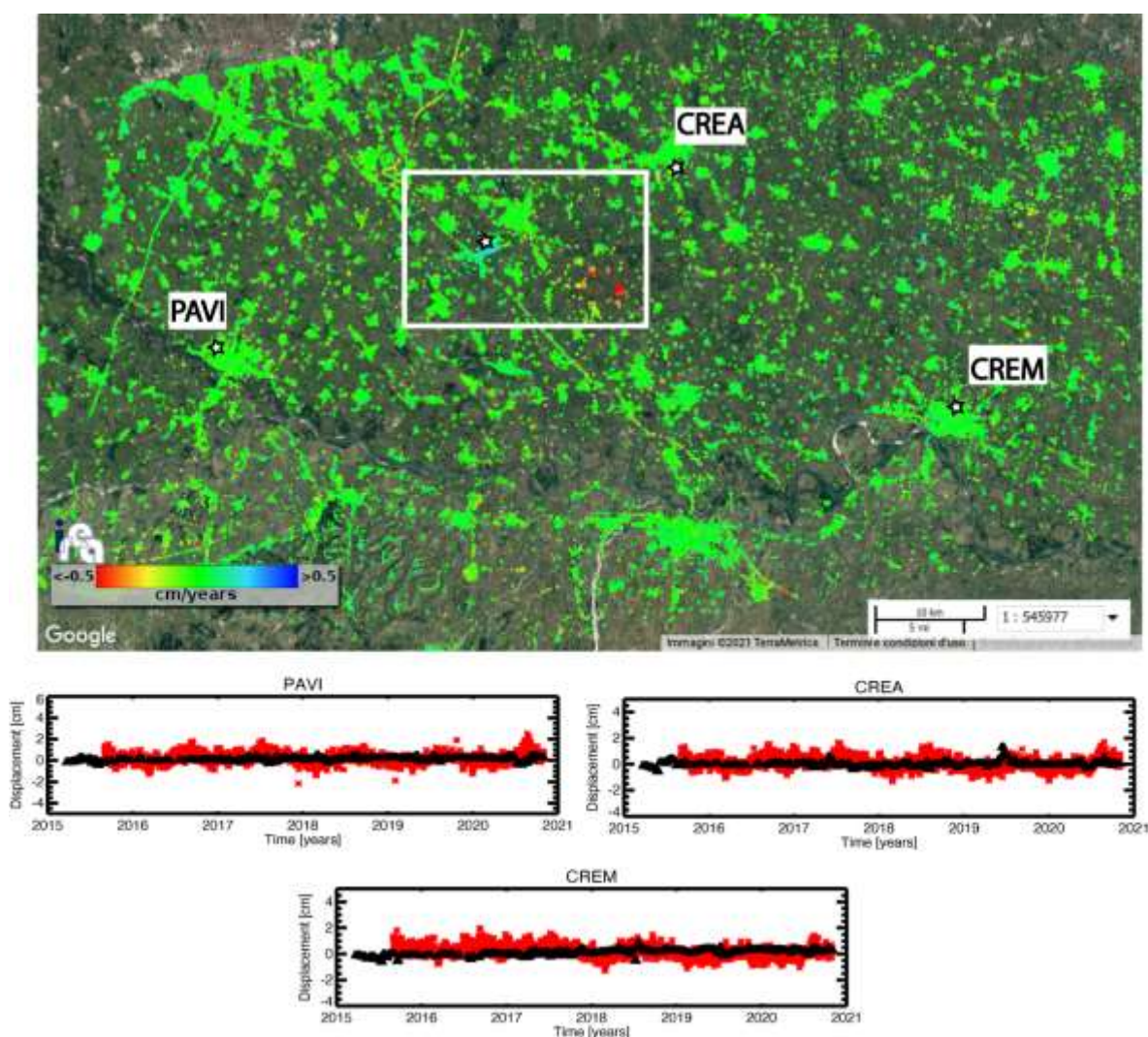


Figura 20 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2021. La stellina nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 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, fino circa a settembre 2019, con un'escursione di circa 1 cm e velocità media di circa 1 cm/anno. Tale trend sembra poi assumere un andamento lievemente oscillante con uno spostamento di circa 1.5 cm. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza di attività di stoccaggio di gas anche in Lombardia (Teatini et al, 2011; Zhou et al, 2019). Tale trend deformativo è analizzato con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.4.

È inoltre chiaramente identificabile un effetto deformativo 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.

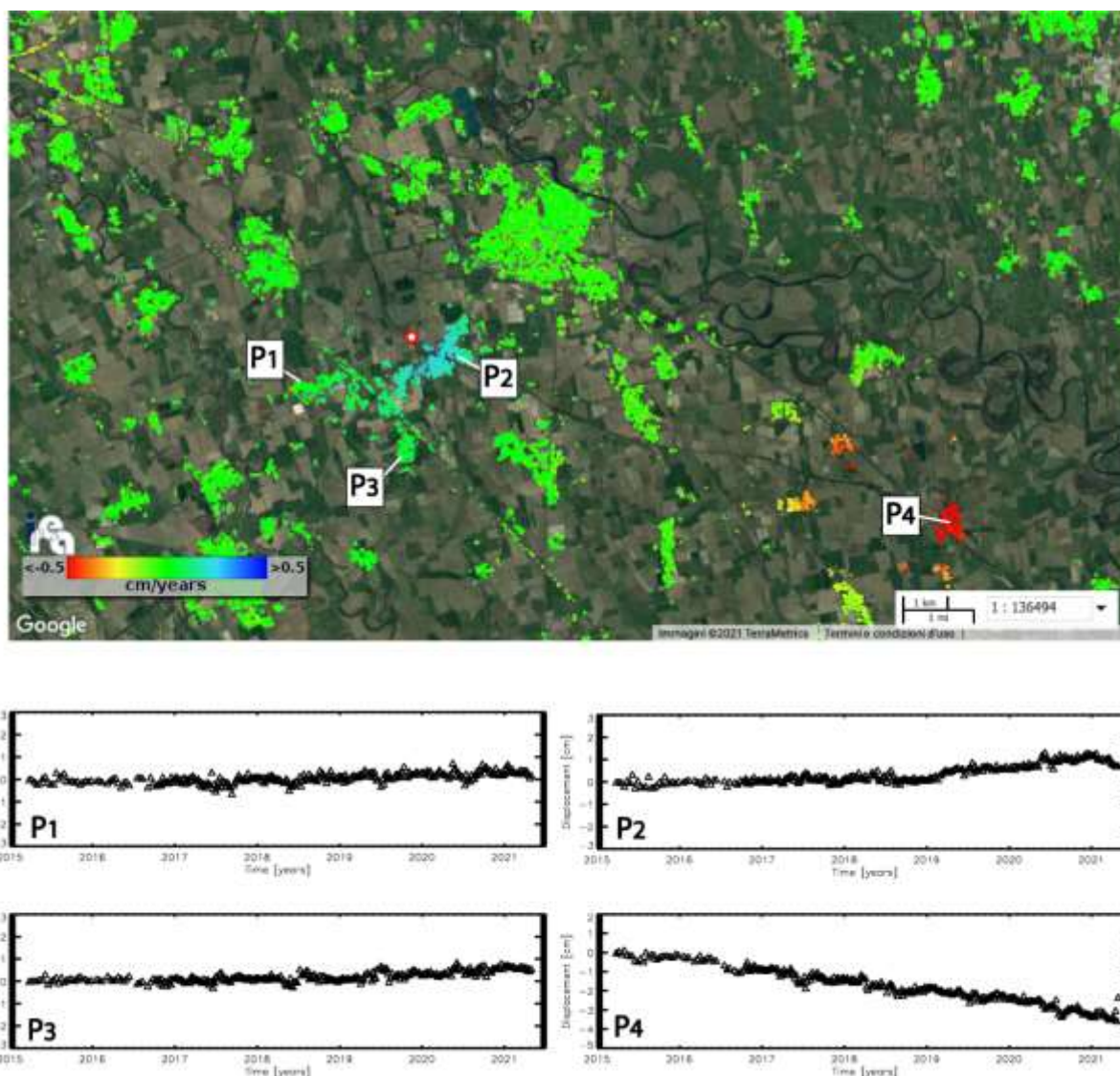


Figura 21 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 17](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto 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 ascendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 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 valor 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 valor medio di circa 0.3 cm.

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

Le [Figure 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-aprile 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 avente una velocità media di circa 1.5 cm/anno a partire dall'inizio del 2019 fino circa a settembre 2019, periodo a partire dal quale il trend sembra assumere un comportamento lievemente oscillante con un sollevamento complessivo di circa 1.5/2 cm. 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.

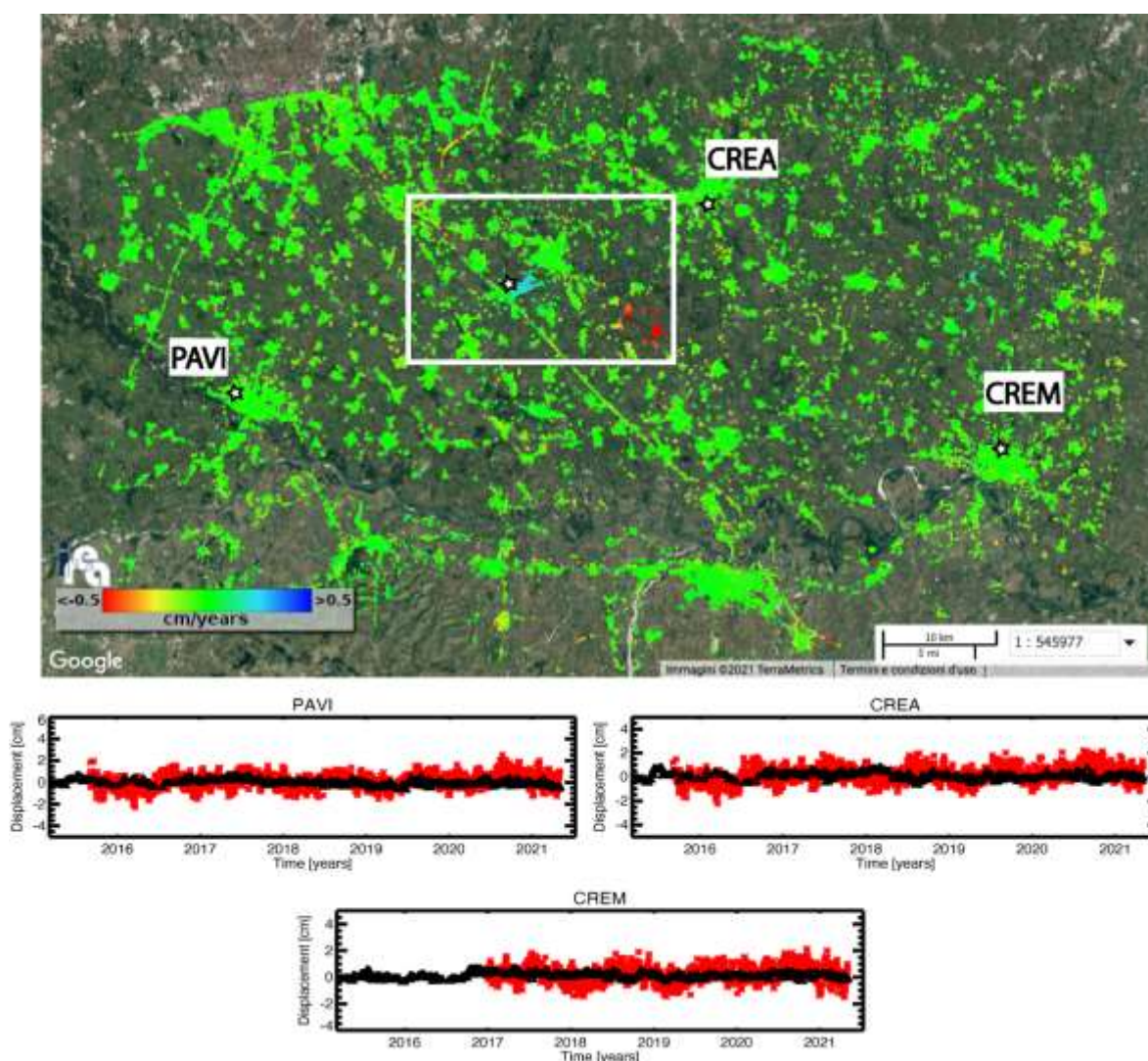


Figura 22 - Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni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

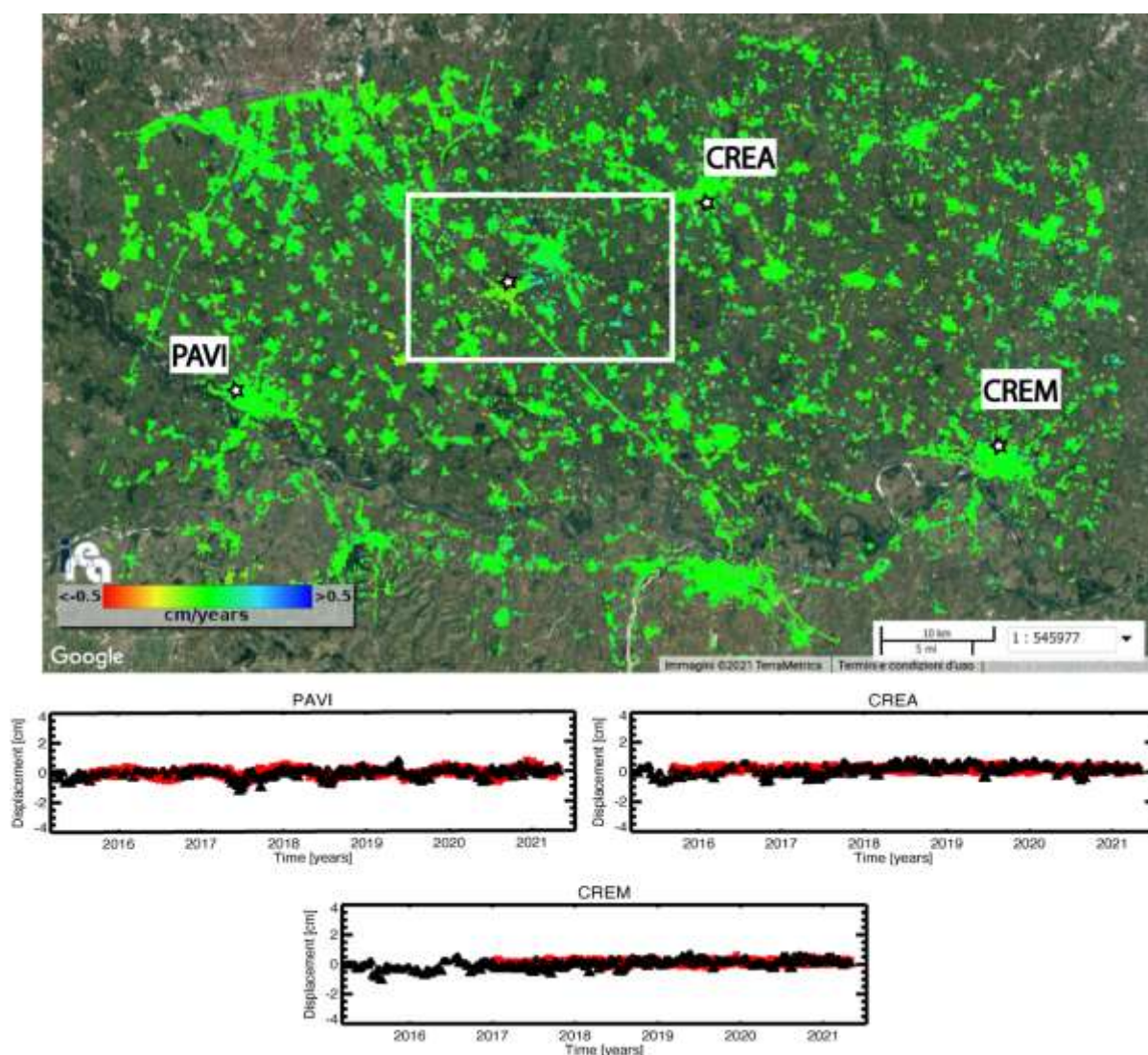


Figura 23 - Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni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

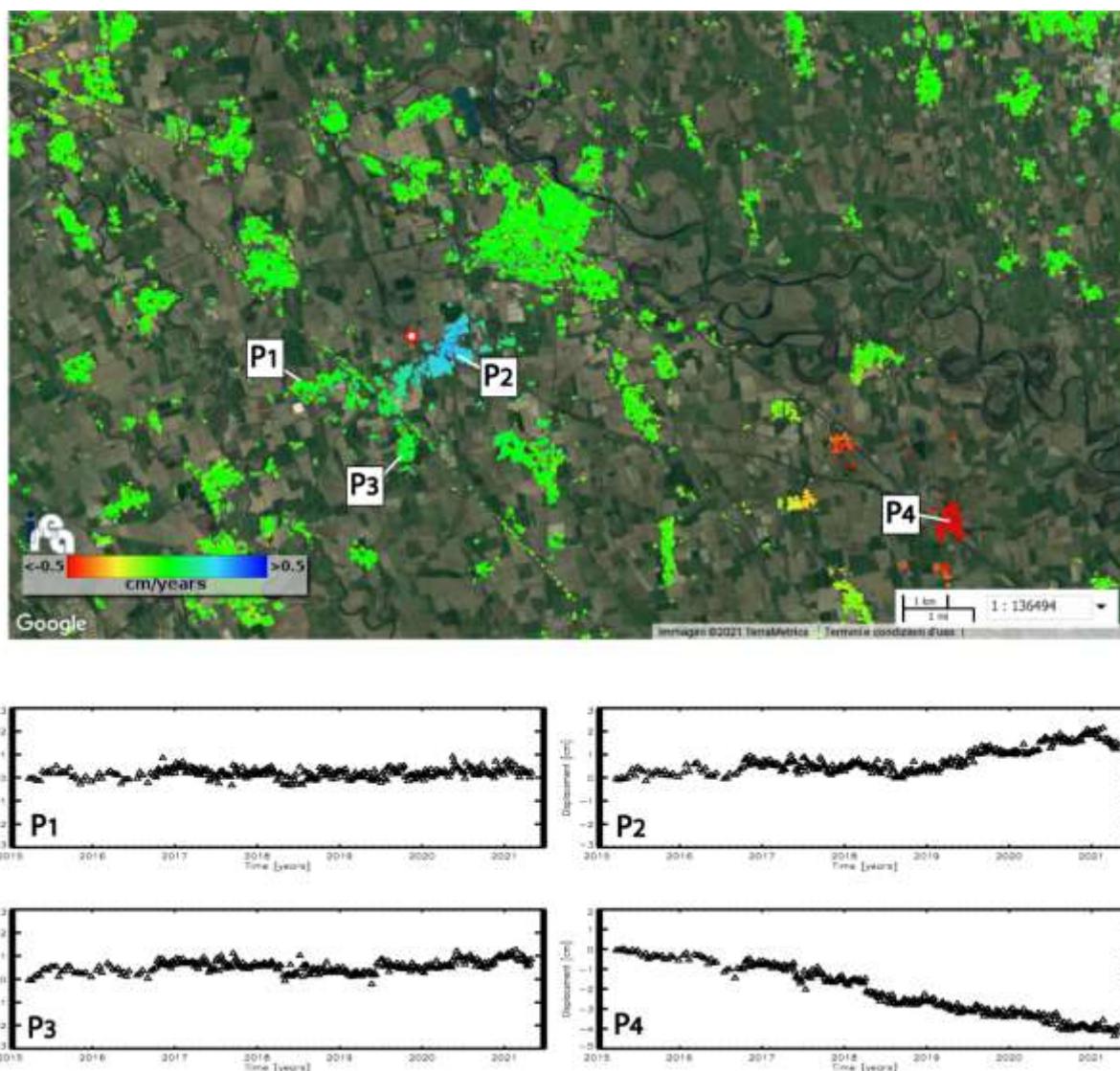


Figura 24 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di [Figura 23](#) in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto 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).

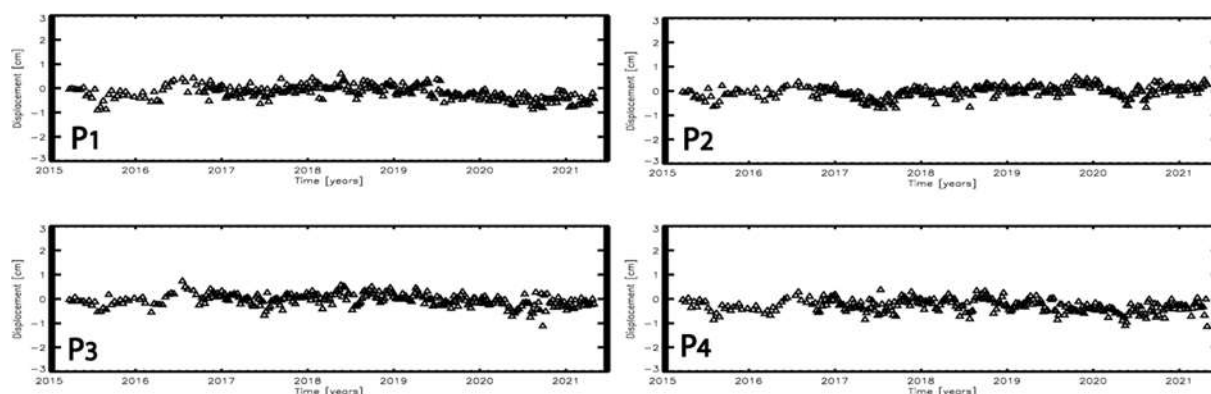
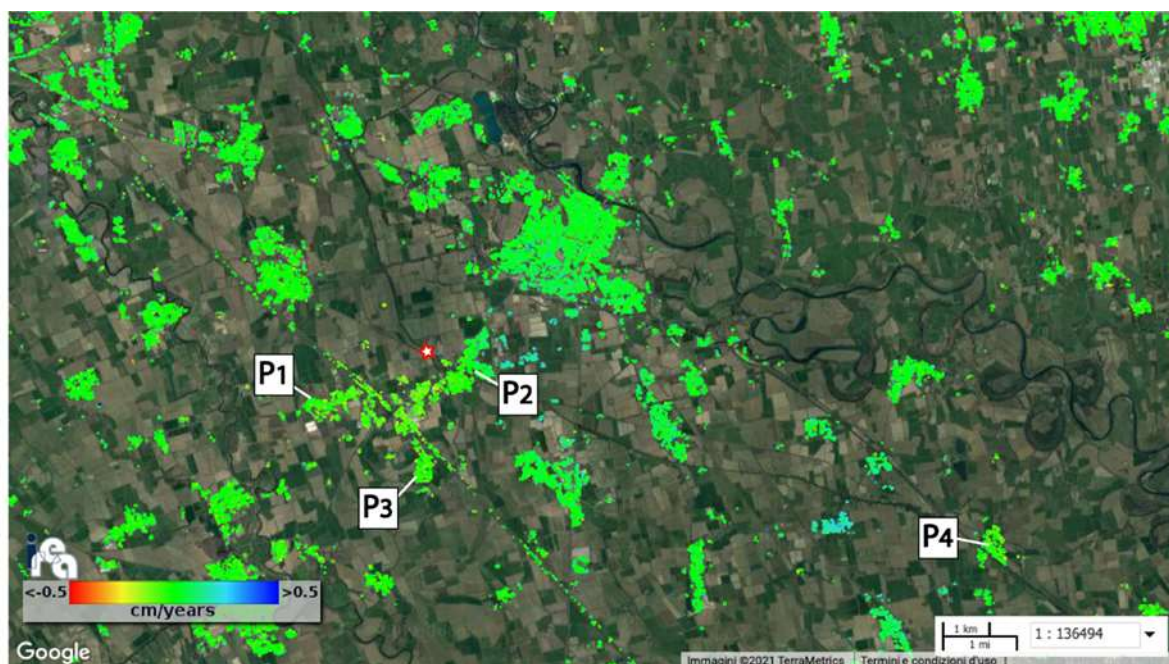


Figura 25 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione [Figura 24](#) in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto 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 fino circa a settembre 2019, periodo a partire dal quale tale sollevamento assume un comportamento lievemente oscillante. 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.

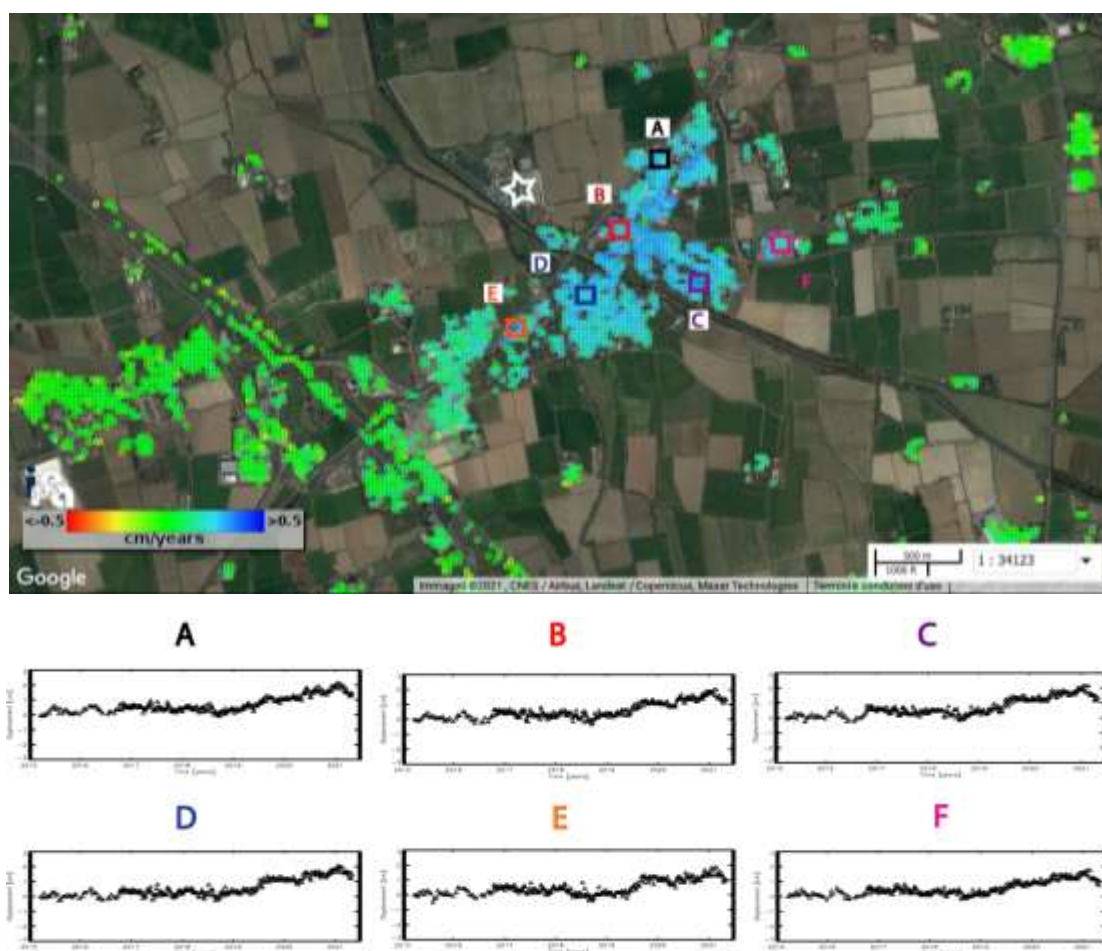


Figura 26 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale 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, che corrisponde a una velocità media di deformazione di circa 1,5 cm/anno. A partire da settembre 2019 tale sollevamento appare assumere un trend oscillante con un valore tra 1.5 e 2 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 uniformemente sui punti campionati, con livelli di deformazione locale ridottissimi e quindi ampiamente entro la massima deformazione accettabile.

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 1/11/2020-30/4/2021 e corrisponde alla fase di estrazione del terzo anno di stoccaggio.

Nei sei mesi rendicontati l'infrastruttura di monitoraggio ha operato correttamente senza interruzioni di rilievo e sono stati localizzati tre 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. Non vi sono elementi che indichino nelle aree di rilevazione l'insorgenza di sismicità legata allo stoccaggio del gas nel deposito naturale.

Monitoraggio delle deformazioni superficiali

Per ciascun sito della Rete GNSS Lodi sono state calcolate le serie temporali fino alla data del 30/04/2021 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 ad aprile 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, distante circa

15 km dall'area di stoccaggio, che mostrava un trend di deformazione sostanzialmente lineare, con un tasso di circa 1 cm/anno che non può ritenersi correlato all'attività di stoccaggio a causa dell'elevata distanza da esso.

L'analisi interferometrica effettuata con i dati più recenti acquisiti dai sensori Sentinel-1 (S-1) è consistente con i risultati ottenuti con i dati precedenti fino a Dicembre 2018. A partire dall'inizio del 2019 le mappe e le serie temporali di deformazione relative ai dati acquisiti da orbite discendenti ed ascendenti mostrano un lieve effetto deformativo nell'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio con una significativa componente verticale, avente un trend di sollevamento del suolo con un tasso di circa 1,5 cm/anno. Tale trend di sollevamento è atteso e coerente con i comportamenti deformativi del suolo rilevati e studiati in altri siti caratterizzati da attività di stoccaggio del gas, dove si mostra che la deformazione superficiale segue inizialmente la fase di caricamento del deposito di stoccaggio per poi oscillare intorno ad un valore medio in accordo alla ciclicità delle operazioni. Tale fenomeno deformativo appare distribuito uniformemente sui punti campionati, con livelli di deformazione locale ridottissimi ricadente quindi entro la massima deformazione accettabile. Questa quantità sarà stimata con maggiore accuratezza successivamente, con il progredire del fenomeno deformativo.

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

Si evidenzia inoltre che è stata effettuata anche una dettagliata analisi dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS/GNSS rese disponibili da OGS. Tali confronti hanno prodotto valori delle deviazioni standard delle differenze tra le misure di spostamento DInSAR e quelle geodetiche che sono non superiori a 0.5 cm, risultando quindi assolutamente in linea con l'accuratezza della tecnica SBAS riportate in letteratura.

Sito web

A fine marzo 2021 è stata messa in linea la versione inglese del sito web. L'Appendice D mostra una breve statistica degli accessi al sito stesso.

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 Tonto, A. (2005). Local Magnitude in Northeastern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(2):579–591.
- Garbin, M., and E. Priolo (2013). Seismic event recognition in the Trentino area (Italy): Performance analysis of a new semi-automatic system, *Seismol. Res. Lett.* 84, 65–74, doi: 10.1785/0220120025.
- Kumar, U., Chao, B. F., & Chang, E. T. Y. (2020). What causes the common-mode error in array GPS displacement fields: Case study for Taiwan in relation to atmospheric mass loading. *Earth and Space Science*, 7, e2020EA001159. <https://doi.org/10.1029/2020EA001159>
- Lahr, J. C. (1984). HYPOELLIPSE/VAX: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude and First-Motion Pattern, US Geological Survey Open-File Report, 84-519, 76 pp.
- 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-12-2021-2021>.
- 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). Progetto per la realizzazione dell’infrastruttura di monitoraggio sismico per la concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio” presso

Cornegliano Laudense (LO). 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 Sperimentative per la Stima dell'Amplificazione Sismica, Studi teorici ed applicazioni professionali*, Aracne Ed., 431-445.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2015a). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. *Seismological Research Letters*, 86, 978-984, doi: 10.1785/0220140175. Available at <http://srl.geoscienceworld.org/content/early/2015/02/18/0220140175.full.pdf>.
- Priolo E., Romanelli M., Plasencia-Linares M. P., Garbin M., Peruzza L., Romano M. A., Marotta P., Bernardi P., Moratto L., Zuliani D. and Fabris P. (2015b). Seismic Monitoring of an Underground Natural Gas Storage Facility – The Collalto Seismic Network. *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 GPS 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 1/11/2020-30/4/2021, considerato in questa relazione. Ogni tabella si riferisce a un mese. Le barre orizzontali blu indicano la disponibilità dei dati per le stazioni corrispondenti (codice OL##). L'ascissa indica il tempo rappresentato come giorno del mese corrente. Per ogni stazione è mostrato solo il canale verticale (HHZ) del sismometro posto in pozzo.



OGS

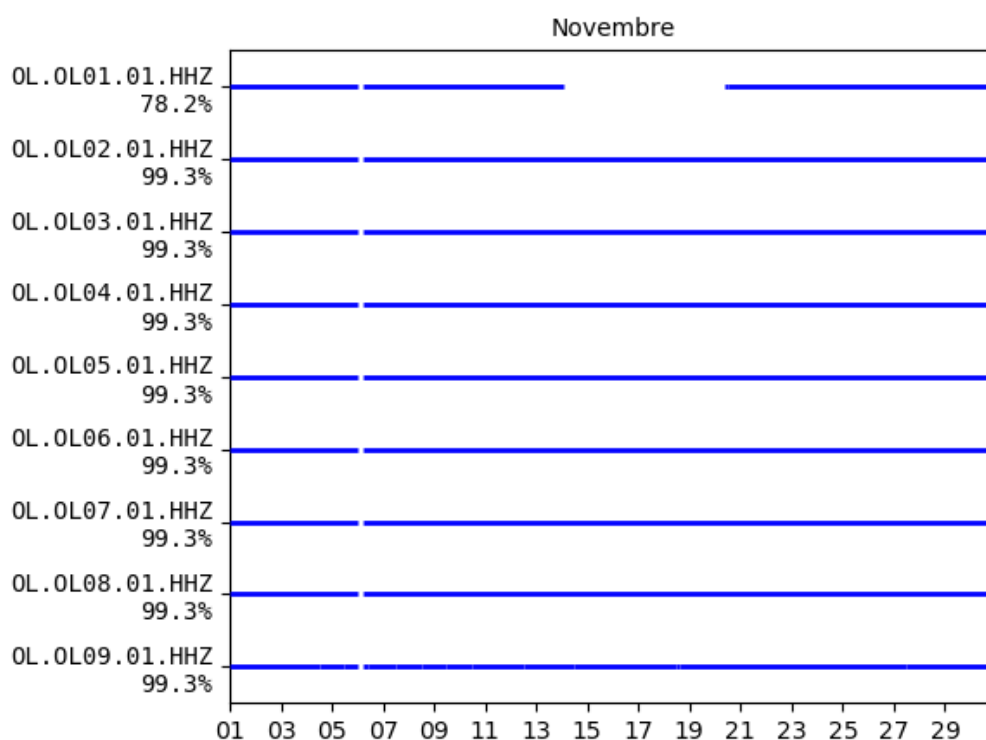
Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



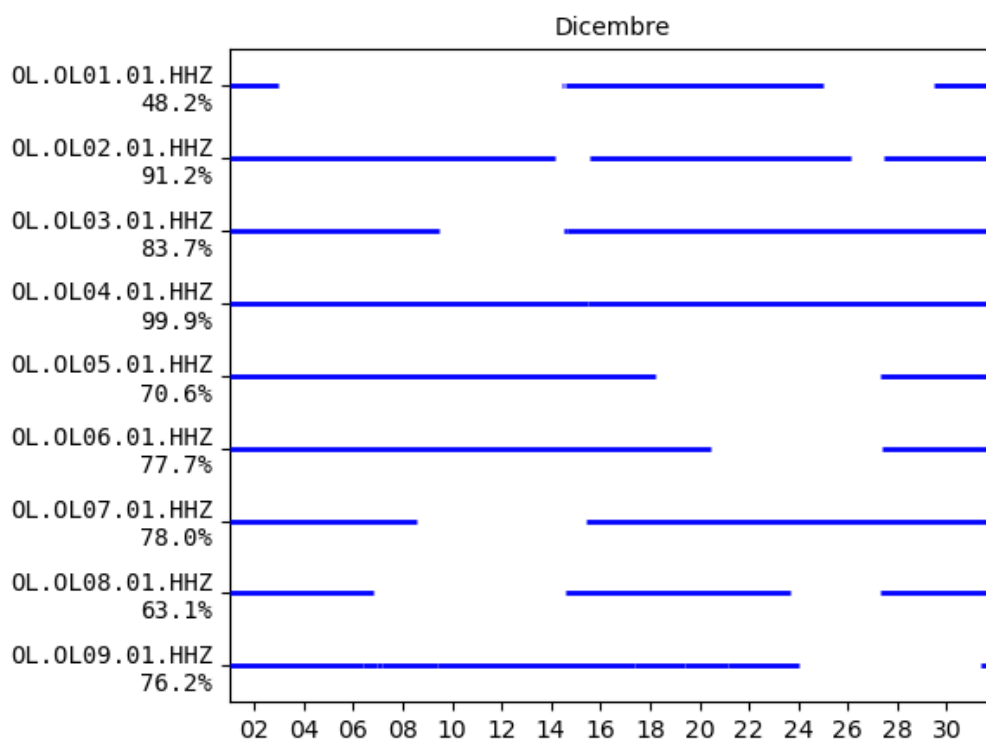
Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

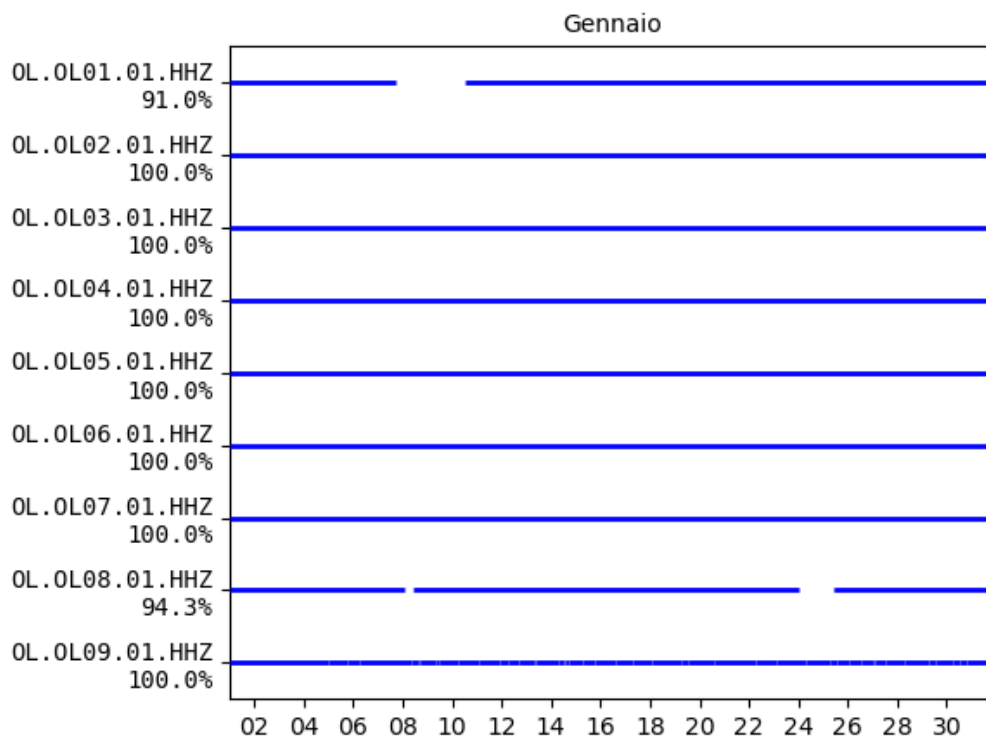
Novembre 2020



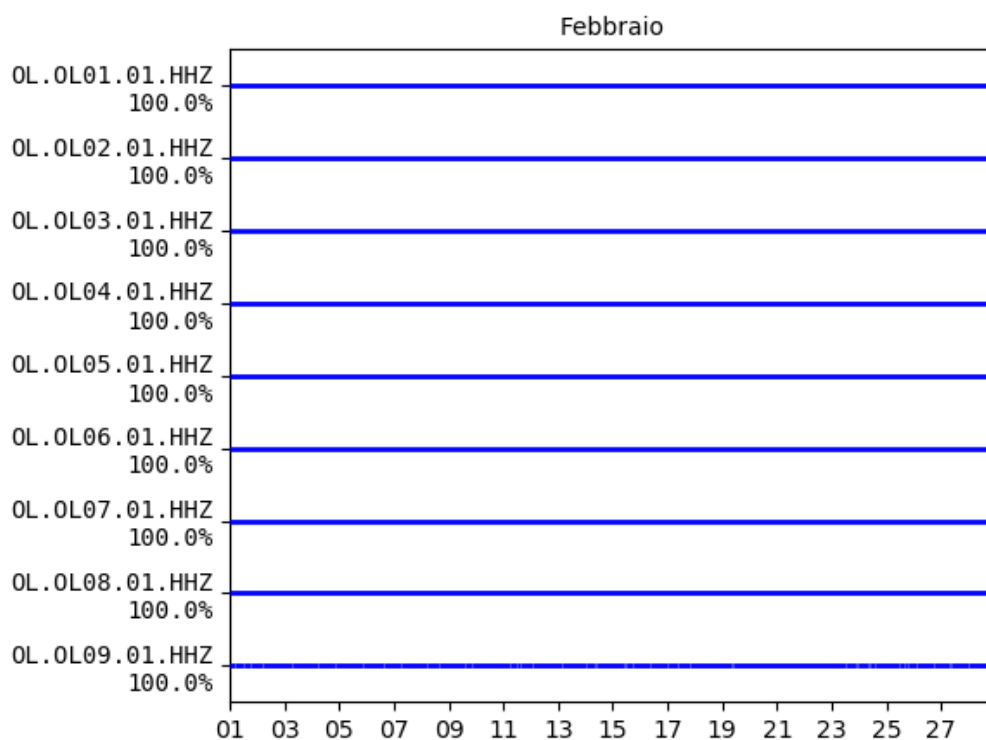
Dicembre 2020



Gennaio 2021



Febbraio 2021





OGS

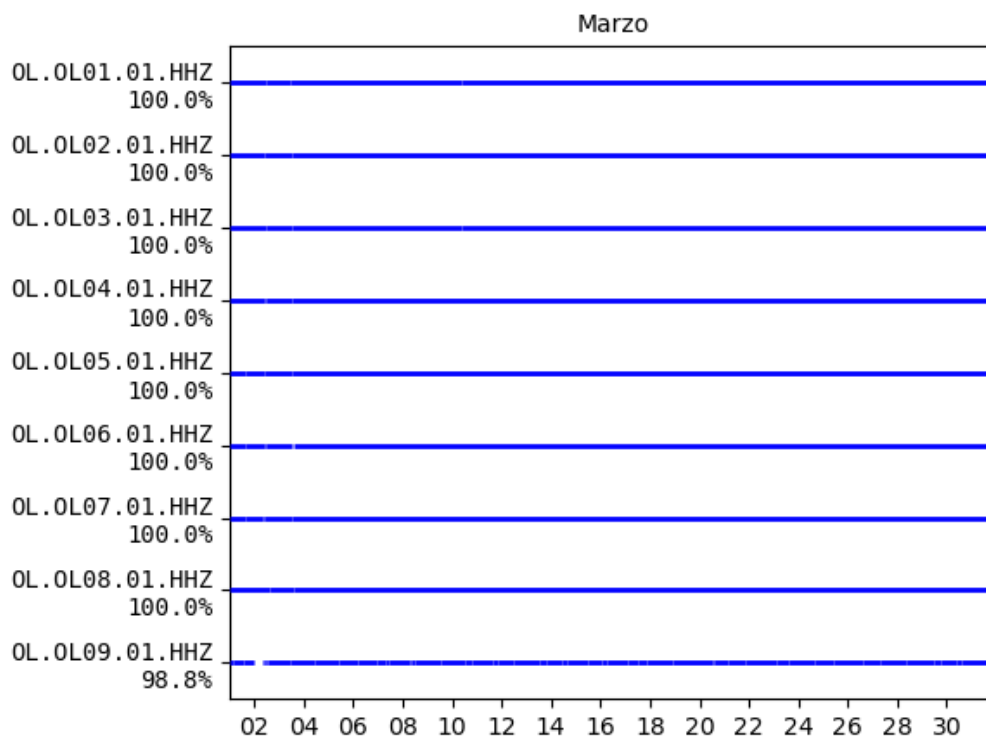
Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



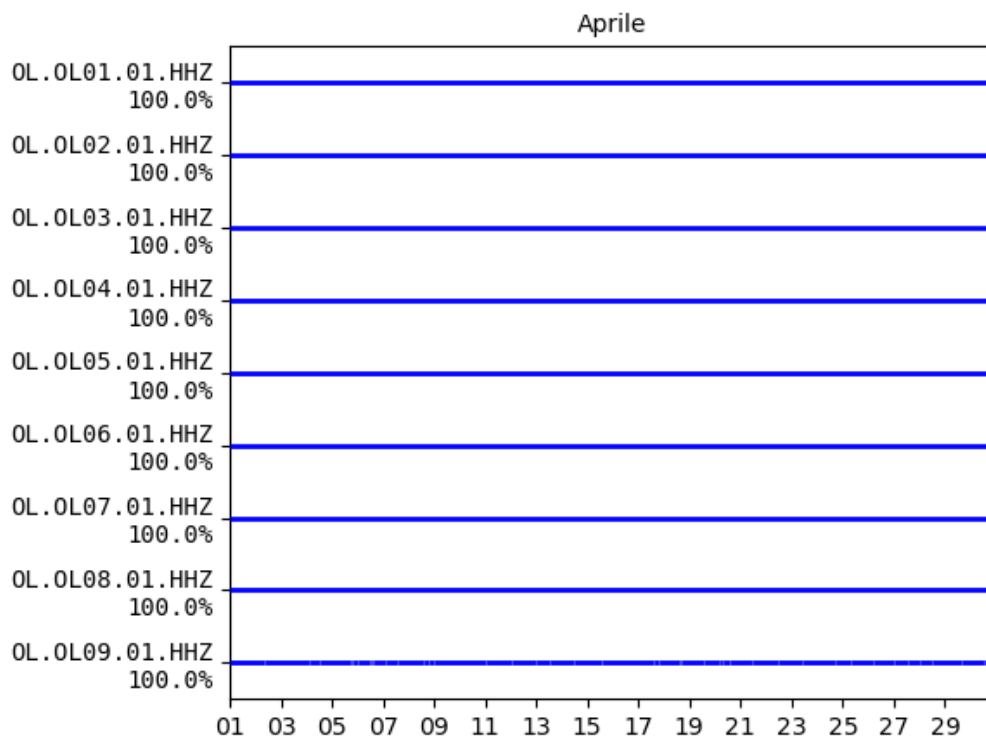
Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

Marzo 2021



Aprile 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)
MI	magnitudo locale
Q	qualità della localizzazione
GAP	angolo di gap (gradi)
No	numero di fasi
Ns	numero di stazioni
errh1	errore orizzontale 1 (km)
errh2	errore orizzontale 2 (km)
errv	errore verticale (km)
rms	residuo medio (s)
Location	località

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

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



OGS

Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

Corneigliano Laudense Seismic Network Event List

File generated on: 2021-06-22 09:39:34.672037

Location Method: Hypoellipse

Earth Model: cornl

#	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	1.5	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	1.0	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	1.0	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	0.9	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	2.0	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	1.2	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	2.0	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

§ Parametri dell'evento del 17/12/2020 verificatosi nei pressi di Milano determinati da INGV (<http://terremoti.ingv.it/event/25805541>):

2020/12/17 15:59:22 lat=45.474 lon=9.155 prof=55 km, Ml=3.8

La RMCL ha localizzato questo evento a una profondità di 42 km e stimato per esso una magnitudo pari a ML 3.3. Si nota una certa discrepanza rispetto ai parametri forniti dalla Rete Sismica Nazionale di INGV, che ha stimato la profondità a 55 km e la magnitudo locale a ML 3.8. Ciò è dovuto sia alla diversa configurazione della rete RMCL che è progettata per avere massima accuratezza nei due Domini di rilevazione, rispettivamente Interno ed Esterno, sia al fatto che per calibrare correttamente le procedure usate rispettivamente per la localizzazione e per il calcolo della magnitudo deve essere disponibile un dataset di eventi sismici più corposo di quello fin qui ottenuto dalla RMCL.

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).

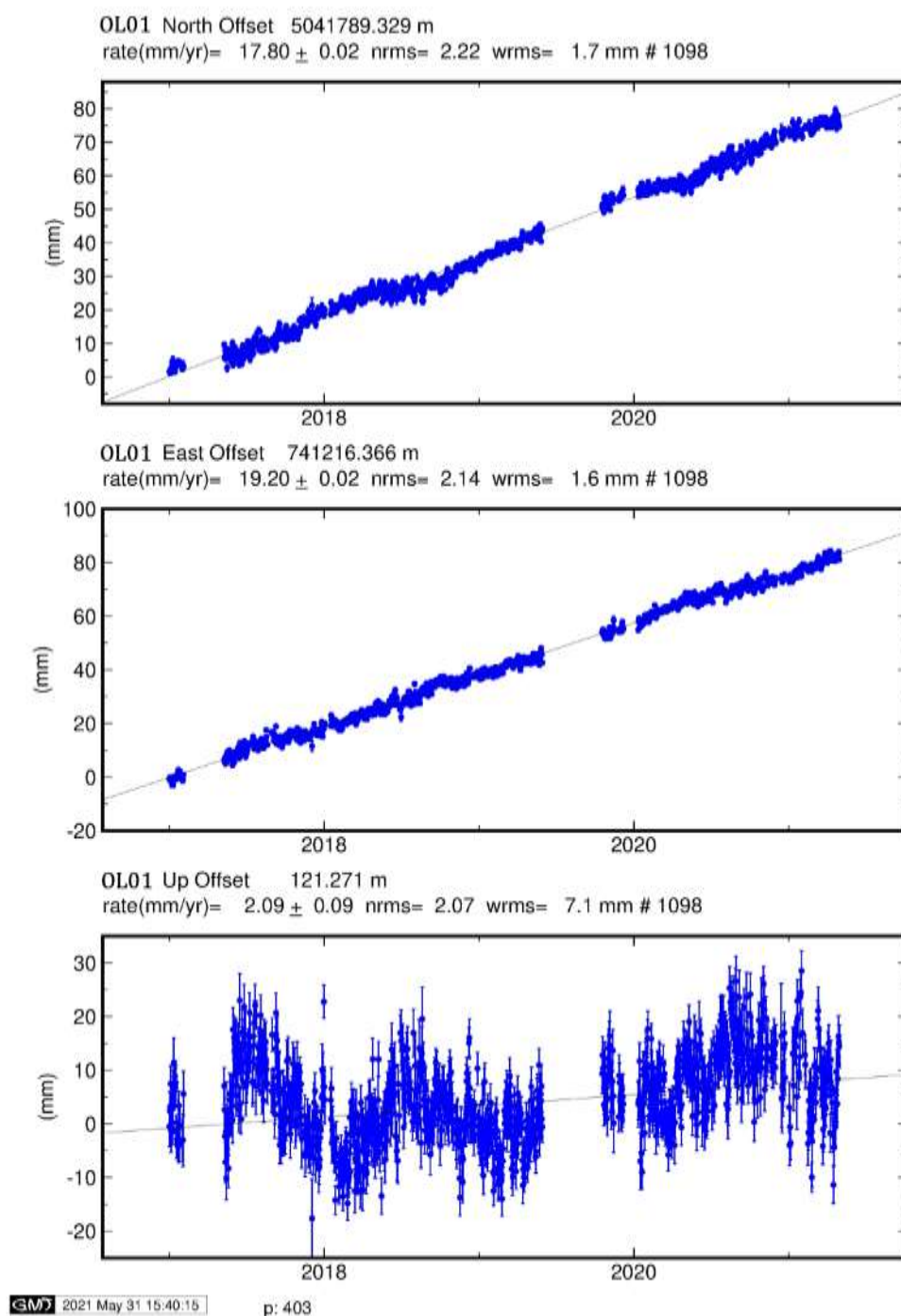


Figura C.1 – Serie temporale della stazione OL01 secondo il sistema di riferimento ITRF08.

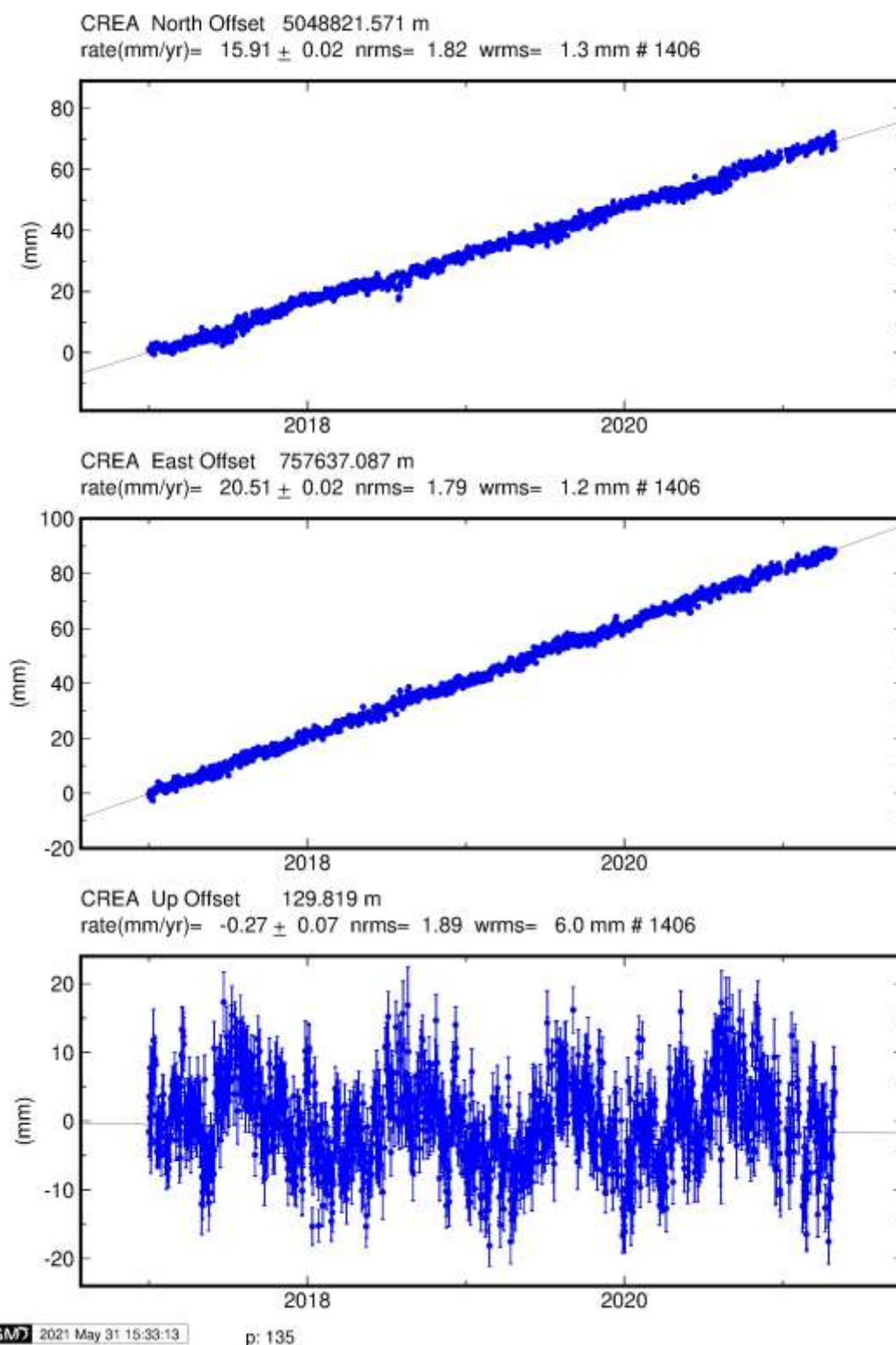


Figura C.2 – Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF08.

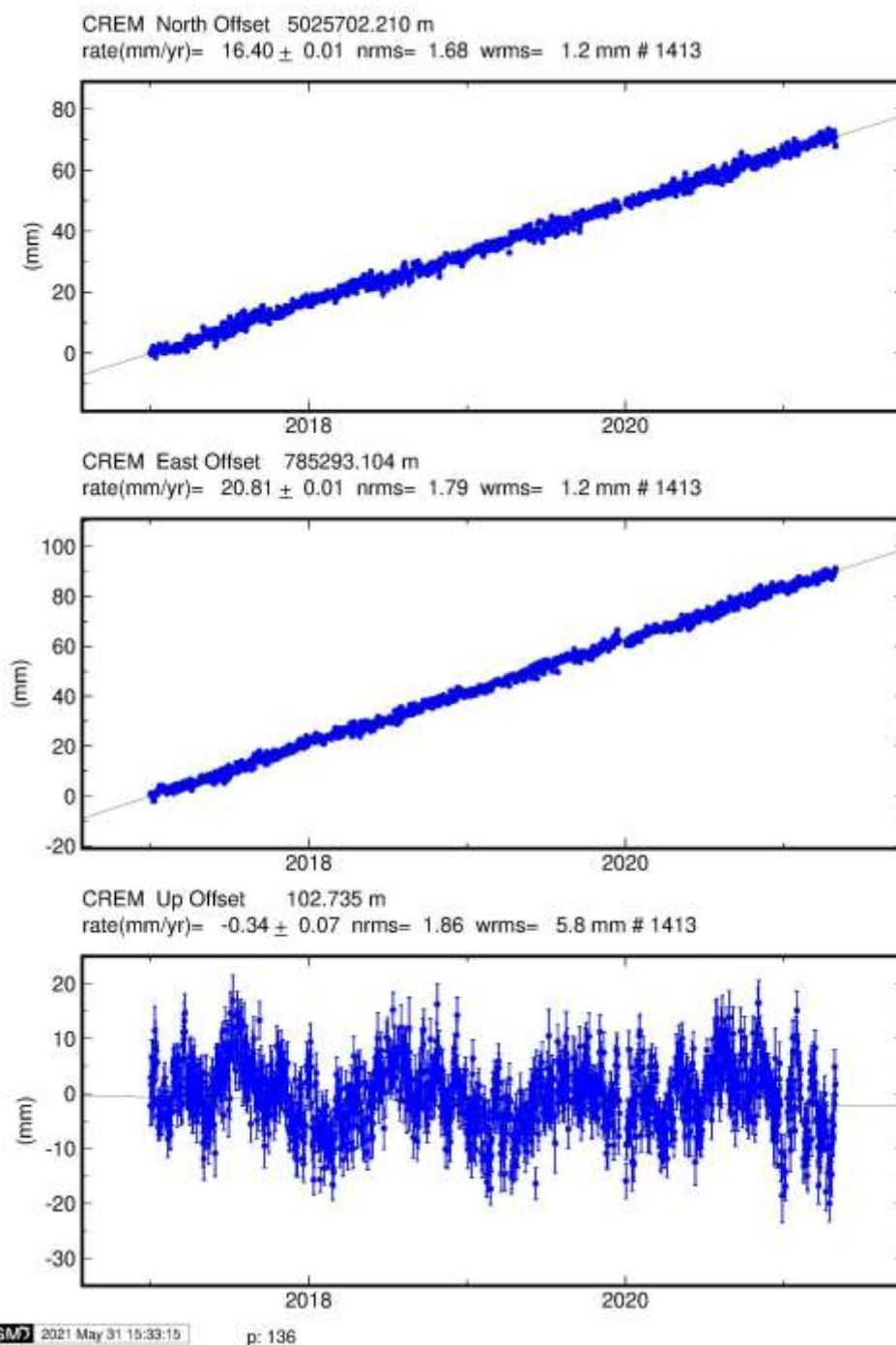


Figura C.3 – Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF08.1

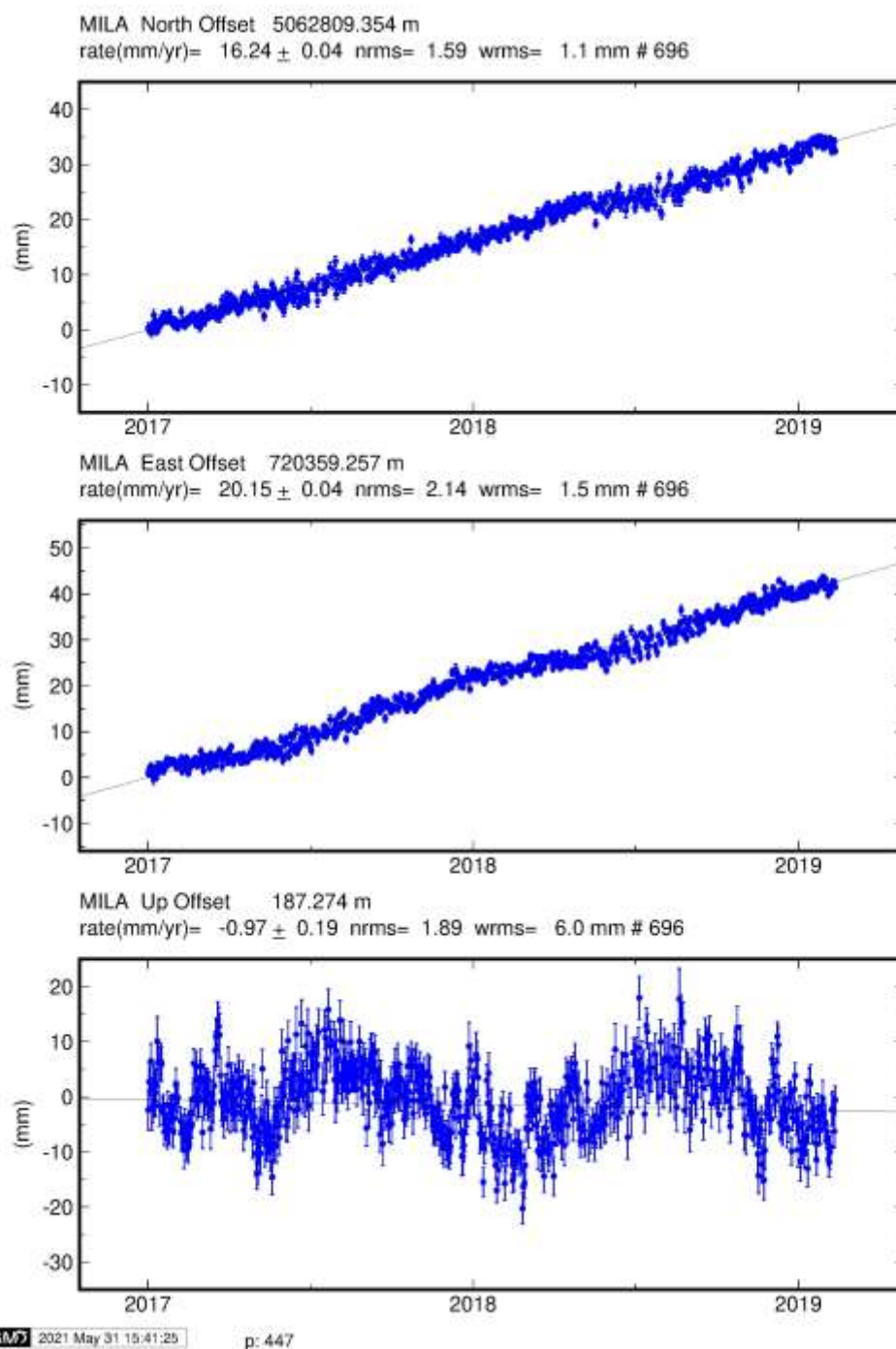


Figura C.4 – Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF08.

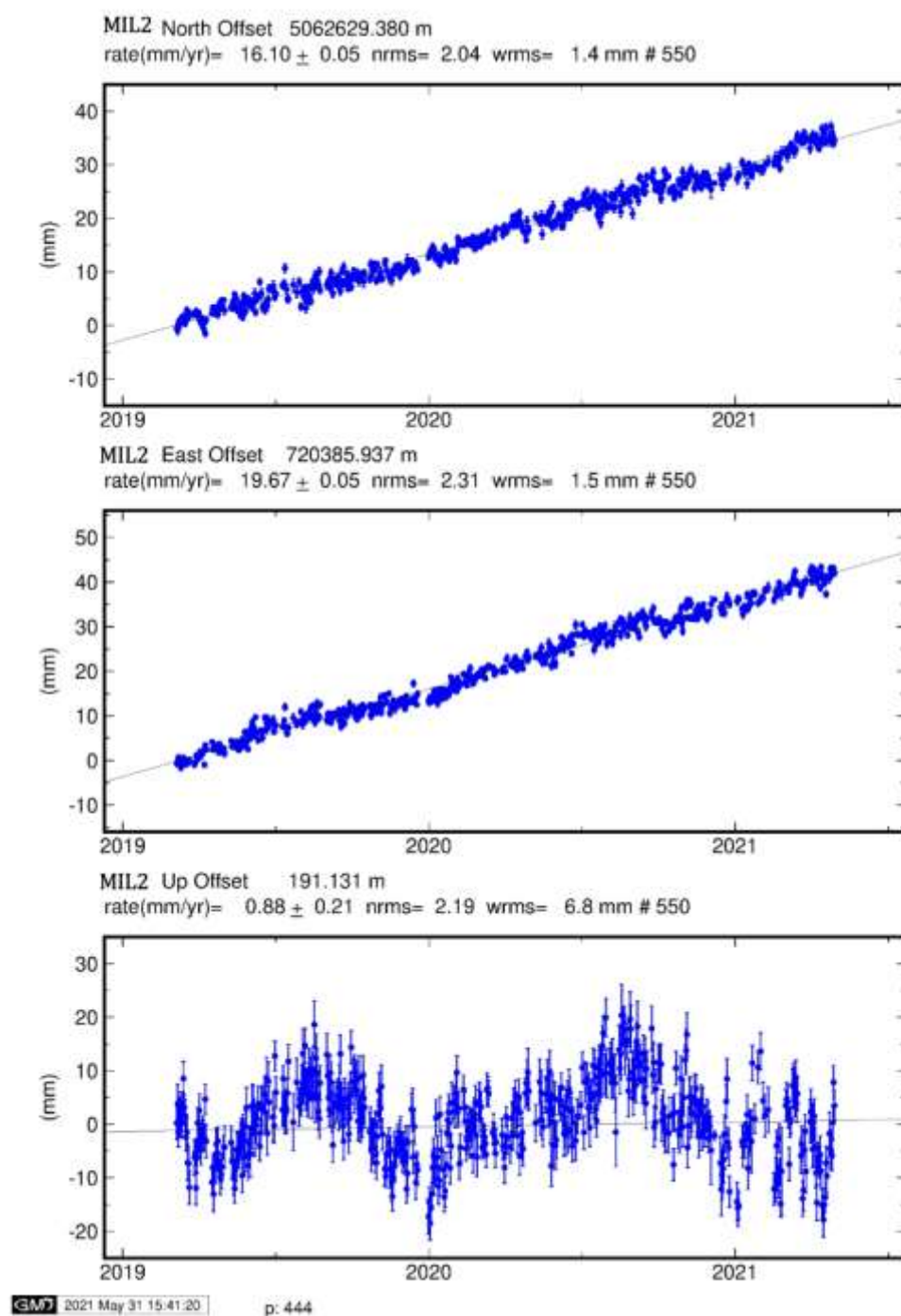


Figura C.5 – Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ITRF08.

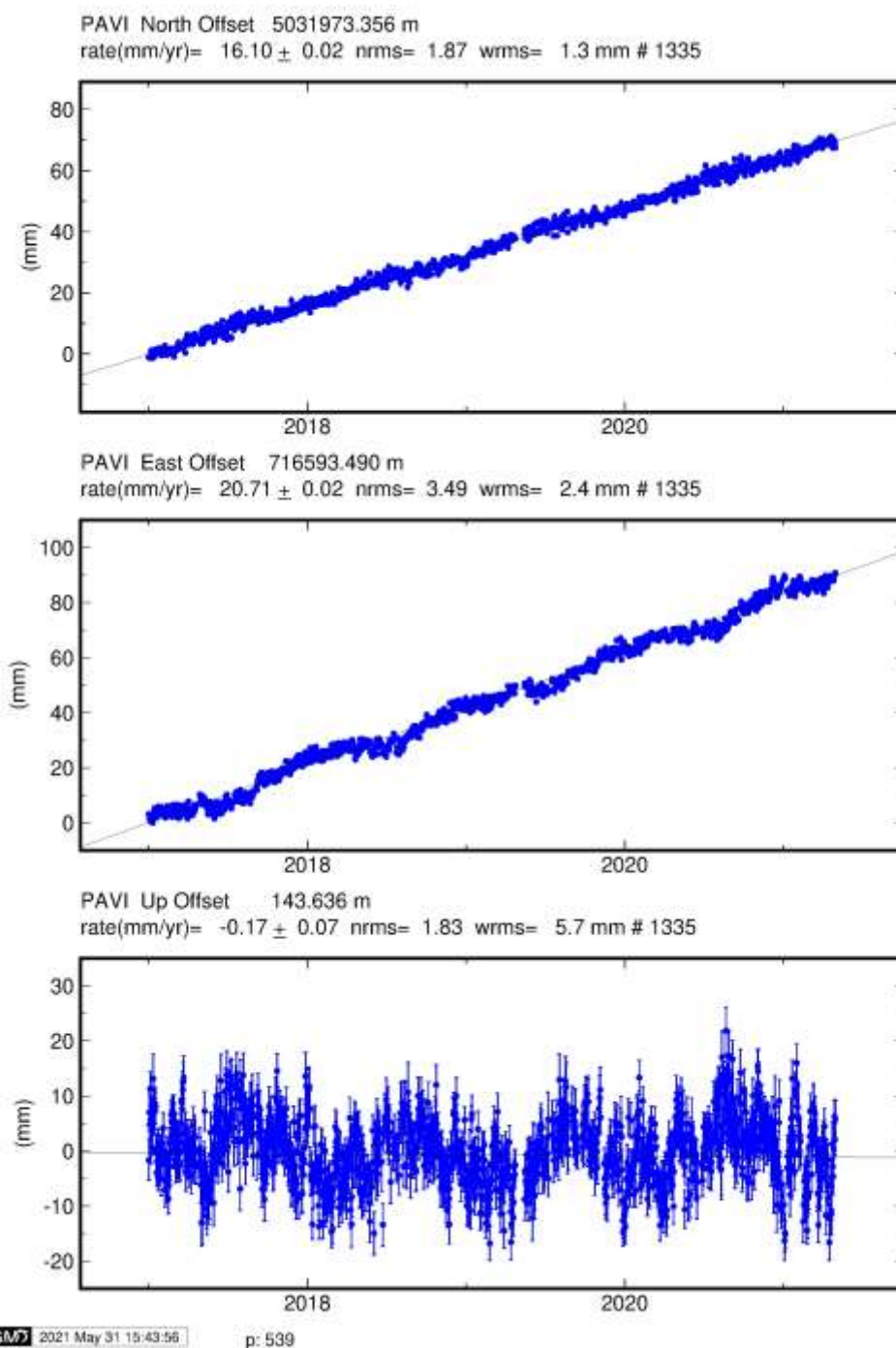


Figura C.6 – Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF08.

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 01/11/2020-30/4/2021 il sito web è stato visitato da circa 700 utenti, provenienti principalmente dall'Italia, come riportato in Figura D.1. Ricordiamo che a fine marzo 2021 è stata messa in linea la versione inglese del sito web.

Rapporto 21.1

1 nov 2020 - 30 apr 2021

Tutti gli utenti
100,00% Sessioni

Sessioni



Sessioni e % nuove sessioni per Paese

Paese	Sessioni	% nuove sessioni
Italy	652	39,11%
United States	16	100,00%
United Kingdom	11	36,36%
Indonesia	9	88,89%
China	6	100,00%
Philippines	6	83,33%
Germany	5	100,00%
France	4	100,00%
India	4	100,00%
South Africa	4	100,00%

Utenti

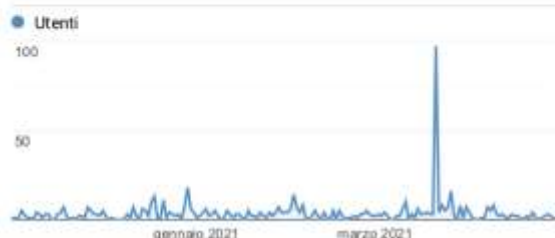


Figura D.1 – Rendiconto delle visite effettuate sul sito web nel periodo 1/11/2020-30/4/2021 per paese di provenienza e numero di utenti. Il picco visibile nella serie temporale del numero di utenti a fine marzo 2021 (più precisamente 97 utenti alla data del 21/3/2021) corrisponde agli accessi effettuati per la messa in linea della versione inglese del sito web.