



SUBSURFACE
GEOLOGY AND
GEOPHYSICS



**Analisi integrata delle misure di deformazione superficiale
allo scopo di analizzare i fenomeni di subsidenza dell'area
di San Potito - Cotignola
Aggiornamento al 30 settembre 2020**

Redatto da A. Ponza ed F. L. Guido
verificato da Vincenzo Picotti

Bologna 15 dicembre 2020

Indice

Executive Summary	3
1 Attività di stoccaggio dal 1 aprile al 30 settembre 2020	6
2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2020	9
2.1 Rete geodetica a doppia frequenza	9
2.1.1 Quality check	9
2.1.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni	10
2.2 Rete geodetica a singola frequenza	18
2.2.1 Quality check	18
2.2.2 Analisi dei dati e stima degli spostamenti	19
3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità	33
3.1 Piezometri	33
3.2 Assestimetri	36
4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Cotignola	38
4.1 Analisi delle serie interferometriche sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas . . .	38
4.2 Analisi delle serie interferometriche sul Cluster A in relazione alla movimentazione di gas	44
5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas	48
6 Conclusioni	54
Bibliografia	56

Executive Summary

Il presente report viene redatto ed inviato in ottemperanza alla prescrizione n.8 del documento di VIA n. 773 del 8 Ottobre 2007 di seguito riportata:

Prima dell'inizio dello stoccaggio, la Società proponente dovrà concordare con la Regione Emilia Romagna ed ARPA Ingegneria Ambientale il progetto di un sistema di monitoraggio della subsidenza costituito dall'integrazione di più tecniche:

- una stazione GPS permanente;
- una rete di livellazione - da misurarsi secondo le specifiche dell'alta precisione - che si configuri come rete di raffittimento rispetto alla Rete Regionale di Controllo della Subsidenza;
- monitoraggio satellitare tramite tecnica PSInSAR;
- realizzazione di due stazioni assestometriche a media profondità;
- monitoraggio dei livelli piezometrici tramite una rete di raffittimento della Rete Regionale di Controllo della Piezometria;

Pertanto, nel mese di giugno 2013 la società Edison Stoccaggio ha reso operativa presso l'impianto di stoccaggio di Cotignola una rete di monitoraggio atta a misurare le deformazioni superficiali del terreno tramite diversi strumenti, quali assestimetri, piezometri, stazioni GNSS (rete a doppia e a singola frequenza) e rete di livellazione geometrica di precisione, da utilizzare di concerto con dati di interferometria radar satellitare, relativi all'area di interesse, acquisiti dalla società TRE ALTAMIRA.

Il presente documento costituisce il quindicesimo rapporto relativo all'analisi, all'interpretazione e all'integrazione tra le differenti tipologie di dati monitorati fino alla fine di settembre 2020, ai quali, viene aggiunto a partire dal precedente report 2019 - 2020 il dato GPS della rete geodetica a singola frequenza ottenuto da post-processing operato da Geophi. Il rapporto indaga le possibili relazioni tra la deformazione geodetica (osservazioni GPS, satellitari e rete di livellazione), le oscillazioni piezometriche, la compattazione/dilatazione registrata dagli assestimetri ed i volumi di gas movimentati, con lo scopo principale di provare a discriminare la componente di deformazione geodetica dovuta alla iniezione/estrazione di volumi definiti di gas nello stoccaggio.

A fine settembre 2020, la strumentazione installata presso l'impianto del Cluster-C continua ad essere funzionante. Da valutare a seguito di un intervento di spurgo e manutenzione il corretto funzionamento del piezometro profondo, che mostra ancora un andamento delle misure affetto da qualche anomalia.

Complessivamente, nel semestre 1 aprile – 30 settembre 2020 sono stati iniettati ≈ 301.1 MSmc ed erogati ≈ 2.45 Msmc (Cluster A).

Dal Cluster-A sono stati erogati ≈ 2.45 MSmc ed iniettati ≈ 65.5 MSmc;

Dal Cluster-B sono stati iniettati ≈ 27.4 Msmc.

Dal Cluster-C sono stati iniettati ≈ 220.5 Msmc.

La strumentazione superficiale e intermedia (piezometro superficiale a - 11 m da p.c.; piezometro intermedio a - 67 m da p.c.; assestometro superficiale a - 11 m da p.c.) installata sul Cluster-C mostra variazioni legate alle dinamiche meteorologiche, senza evidenti effetti legati alla movimentazione di gas nel giacimento.

La strumentazione profonda (piezometro profondo installato a - 301 m da p.c. e assestometro profondo installato a - 351 m da p.c.) evidenzia trend legati alla compattazione della colonna stratigrafica. L'andamento dell'assestometro profondo continua a registrare una compattazione al ritmo di $\approx - 3.8$ mm/anno, con dinamiche di deformazione correlate temporalmente con le fasi di iniezione/erogazione, ma non in termini quantitativi: le deformazioni registrate hanno infatti ampiezze non proporzionali al quantitativo di gas in posto nel reservoir. Il piezometro profondo conferma il trend di risalita delle quote piezometriche finora osservato, ma negli ultimi 2.5 anni continua a mostrare un trend lineare che si discosta nettamente dai cicli osservati in precedenza. La mancanza di oscillazioni tipiche dell'andamento stagionale esclude comunque una influenza dell'attività di stoccaggio.

Le misurazioni dello spostamento del suolo, condotte tramite il post-processing del segnale GPS sul Cluster-C (stazioni CLS2 e SP04) e tramite l'interferometria satellitare su tutta l'area della concessione, mostrano nel semestre di iniezione in esame, un trend di sollevamento nell'area del Cluster-C e del Cluster-B. Presso il Cluster-A si registrano scarse deformazioni sul reservoir e non correlabili con l'attività di stoccaggio.

La stazione GPS CLS2 ha qualità del dato (valori di MP1 e MP2) sufficiente ad essere considerata una stazione di buona qualità, in linea con quanto indicato dall'IGS, ed è in grado di fornire risultati da considerare significativi, data la lunghezza raggiunta dalla sua serie temporale (≈ 7 anni). Gli spostamenti nella componente verticale di CLS2 e SP04 ($\approx + 11$ mm in media) mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2020, anche se, in generale, i valori delle oscillazioni non si discostano da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni stagionali legati alle dinamiche del carico idrologico superficiale. Anche le componenti orizzontali di entrambe le serie si correlano con l'attività di stoccaggio, registrando uno spostamento orizzontale (≈ 9.5 mm OSO) che "allontana" le stazioni CLS2 ed SP04 dal centro del Pool CC1.

Dal 21 novembre 2018 è attiva la stazione GNSS a doppia frequenza SP12 installata da Edison Stoccaggio in una zona considerata stabile, a nord del reservoir di San Potito, e sono attive le 10 stazioni rover a singola frequenza (SP-numero tra 1 e 15). SP12 è stata processata assieme a CLS2 nelle rete geodetica a doppia frequenza, inquadrata nel sistema di riferimento IGS14 ed utilizzata allo scopo di stazione base per la rete a singola frequenza del presente monitoraggio; ne vengono riportate la serie temporale delle posizioni e l'analisi

di qualità del dato fino al 30 settembre 2020. La stazione potrà dare risultati significativi dopo un periodo di registrazione dei dati di almeno 2.5 anni, lunghezza della serie temporale ritenuta necessaria dalla comunità scientifica per ottenere una stima realistica delle velocità medie di spostamento attese localmente. Da segnalare un marcato spostamento verso est tra agosto e settembre 2020. Si riportano anche le serie temporali di tutte le stazioni rover a singola frequenza misurate relativamente a SP12 e successivamente corrette rispetto al moto di quest'ultima.

I dati di interferometria, sul Cluster-C, ben si correlano con i trend delle misurazioni GPS, sia per la sincronia con cui avvengono i cambi di tendenza, sia per l'entità degli spostamenti misurati. Le nuove serie temporali di interferometria, nella componente verticale disegnano una bolla di sollevamento all'interno del Cluster-C, con valori fino a +16 mm sopra il centro del giacimento. La componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia un "allontanamento" dei PS dal centro del Cluster-C (da ≈ 3 fino a 10 mm, a seconda della zona investigata).

I dati di deformazione del suolo sul Cluster-C evidenziano una correlazione tra i movimenti del terreno e la movimentazione di gas nel sottosuolo; non si trova tuttavia un chiaro nesso di causa-effetto in quanto sia le serie interferometriche, che quelle GPS, hanno già mostrato variazioni di entità simili in periodi di non movimentazione di gas.

Sul Cluster-B si osserva un'area in leggero sollevamento, localizzata nella parte sud-orientale del reservoir (+2 - + 6 mm, con massimi fino a + 8 mm). Le oscillazioni dei PS precedono temporalmente l'andamento del gas nel Cluster-B; non vi è pertanto una evidente correlazione causa-effetto tra movimentazione del gas e deformazione. Le componenti orizzontali non evidenziano trend deformativi riconducibili alle attività di movimentazione gas su questo Cluster.

Sul Cluster-A sono state evidenziate deformazioni geodetiche medie contenute entro i $\approx 5 - 6$ mm (sia positivi che negativi) non correlabili con la fase di iniezione in esame, né in termini di tempo, né di distribuzione nello spazio.

1 Attività di stoccaggio dal 1 aprile al 30 settembre 2020

Nella concessione di stoccaggio San Potito-Cotignola, nel semestre in esame (aprile - settembre 2020) sono stati erogati ≈ 2.45 Msmc e sono stati iniettati complessivamente ≈ 301.1 MSmc, così suddivisi nei differenti cluster:

Cluster A

Erogazione di 2447537 Smc (≈ 2.45 MSmc) dal 1 al 9 aprile 2020. Iniezione di 65505005 (≈ 65.5 MSmc) dal 29 aprile al 17 settembre 2020.

Cluster B

Iniezione di 27393439 Smc (≈ 27.4 MSmc) tra il 14 maggio e il 27 settembre 2020.

Cluster C

Iniezione di 220551440 Smc (≈ 220.5 MSmc) tra il 1 aprile 2020 ed il 28 settembre 2020.

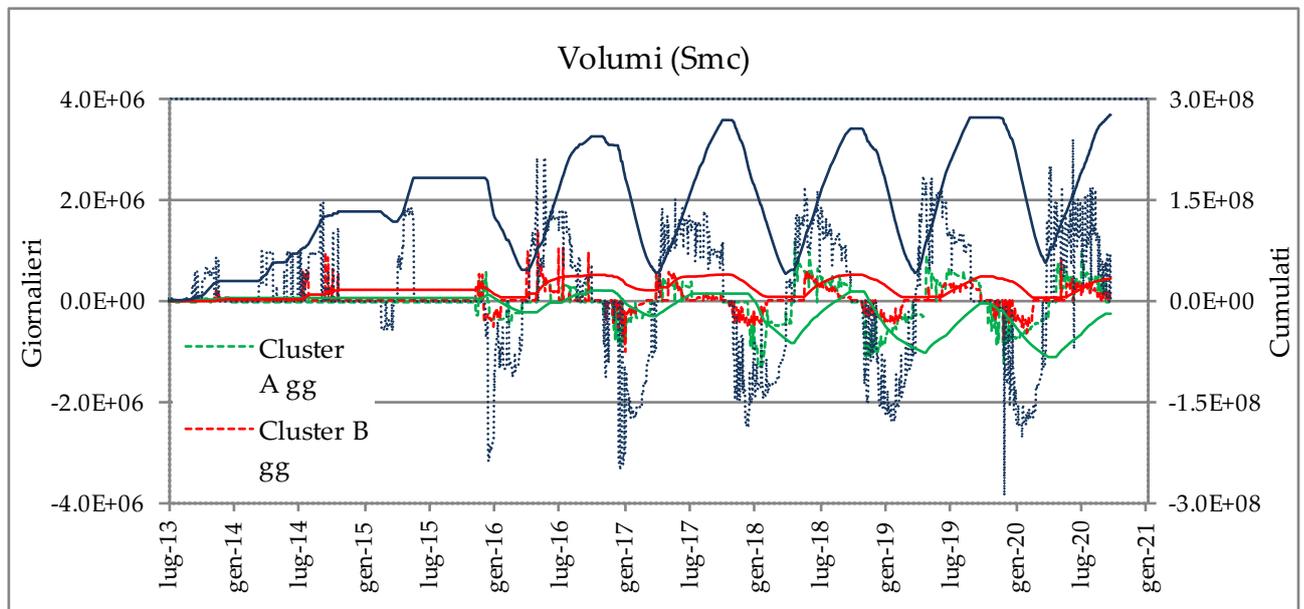


Figura 1.1: Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra.

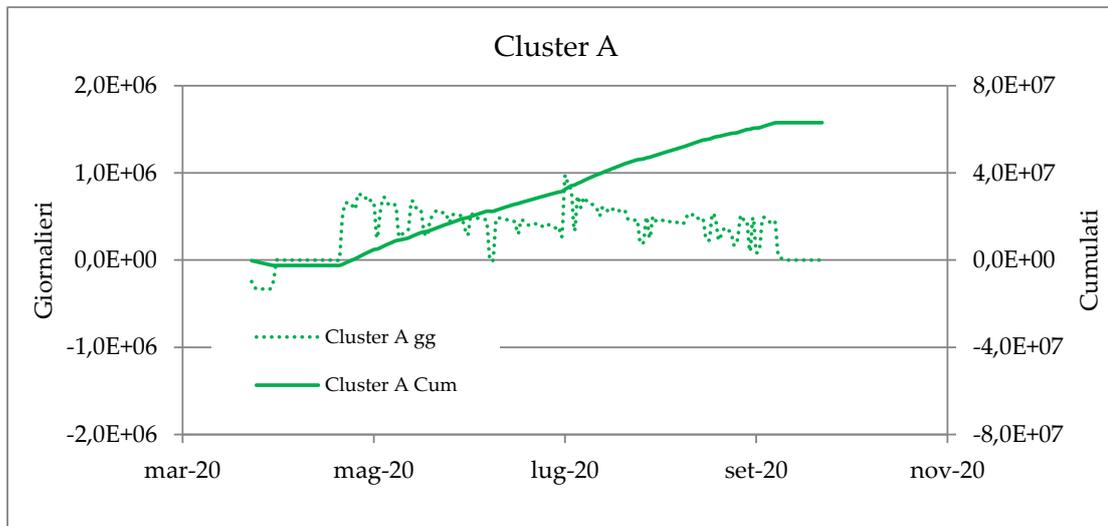


Figura 1.2: Cluster A. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Erogazione di 2447537 Smc (≈ 2.45 MSmc) e iniezione di 65505005 (≈ 65.5 MSmc)

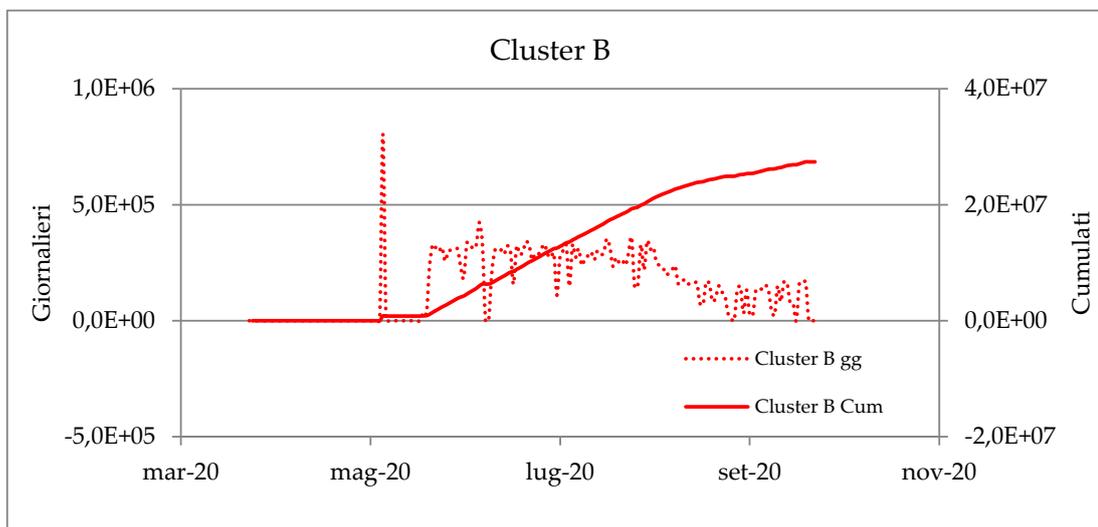


Figura 1.3: Cluster B. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Iniezione di 27393439 Smc (≈ 27.4 MSmc).

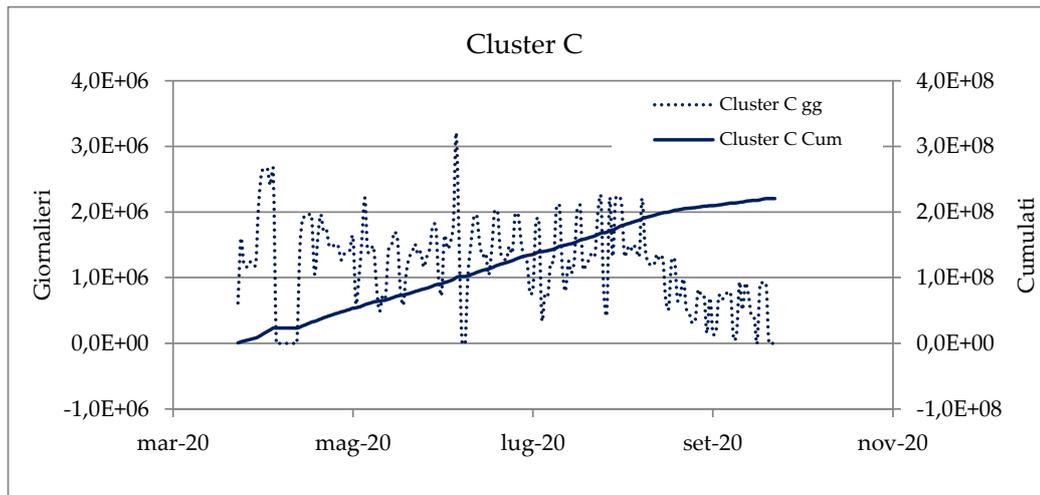


Figura 1.4: Cluster C. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Iniezione di 220551440 Smc (≈ 220.5 MSmc).

2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2020

2.1 Rete geodetica a doppia frequenza

La serie temporale delle posizioni delle stazioni a doppia frequenza CLS2 ed SP12 è stata aggiornata attraverso l'analisi dei dati giornalieri fino alla data del 30 settembre 2020 (Day of Year 2020/274). Il dato di CLS2 si ferma al doy 180, a causa di un blocco e successivo spegnimento del ricevitore, il cui corretto funzionamento è stato ripristinato purtroppo solo ad ottobre 2020.

E' stata inoltre aggiornata la serie temporale degli indici di qualità (MP1, MP2) sia di CLS2, che di SP12, fino al doy 180 e 274 rispettivamente. Le serie temporali delle stazioni analizzate sono state determinate nel sistema di riferimento IGS14 (<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>).

2.1.1 Quality check

I dati RINEX giornalieri delle 2 stazioni sono stati analizzati con il software TEQC (<http://facility.unavco.org/software/teqc>), che rappresenta uno standard internazionale per il trattamento in fase di pre-processamento di dati GPS e per la valutazione della loro qualità. A questo scopo, gli indici principalmente utilizzati sono i seguenti (in parentesi sono indicati i valori riscontrati su stazioni permanenti di buona qualità):

- MP1: root mean square (RMS) dato dai multipath sulla fase L1, ossia dovuto a riflessioni del segnale radio inviato dai satelliti che influiscono sul corretto calcolo della distanza satellite-ricevitore (0.1 - 0.5 m);
- MP2: RMS dato dai multipath sulla fase L2 (0.1 - 0.5 m);
- Cycle Slips (CS): salti di ciclo che occorrono quando il ricevitore perde il tracking dei satelliti in vista (0 - 5000 per intervalli di campionamento a 30 s).

Ricordiamo che prendendo come riferimento la rete IGS dell'International GNSS Service (<http://igsb.jpl.nasa.gov>), il 50% delle stazioni IGS ha valori di RMS per MP1 inferiori a 0.4 m e valori di MP2 inferiori a 0.6 m, mentre 2/3 delle stazioni ha valori di MP1 inferiori a 0.5 m e di MP2 inferiori a 0.75 m. Per quanto riguarda i Cycle Slips, più del 50% delle stazioni IGS ha valori inferiori a 5000 e inferiore a 1000 per almeno 2/3 delle stazioni IGS.

In Figura 2.1 è mostrato l'andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e CS della stazione CLS2 fino al 28 giugno 2020. La serie temporale di oltre 7 anni mostra chiaramente come i parametri di MP1 e MP2 presentino un andamento stagionale, con valori più elevati nel periodo autunnale - invernale che si abbassano e stabilizzano

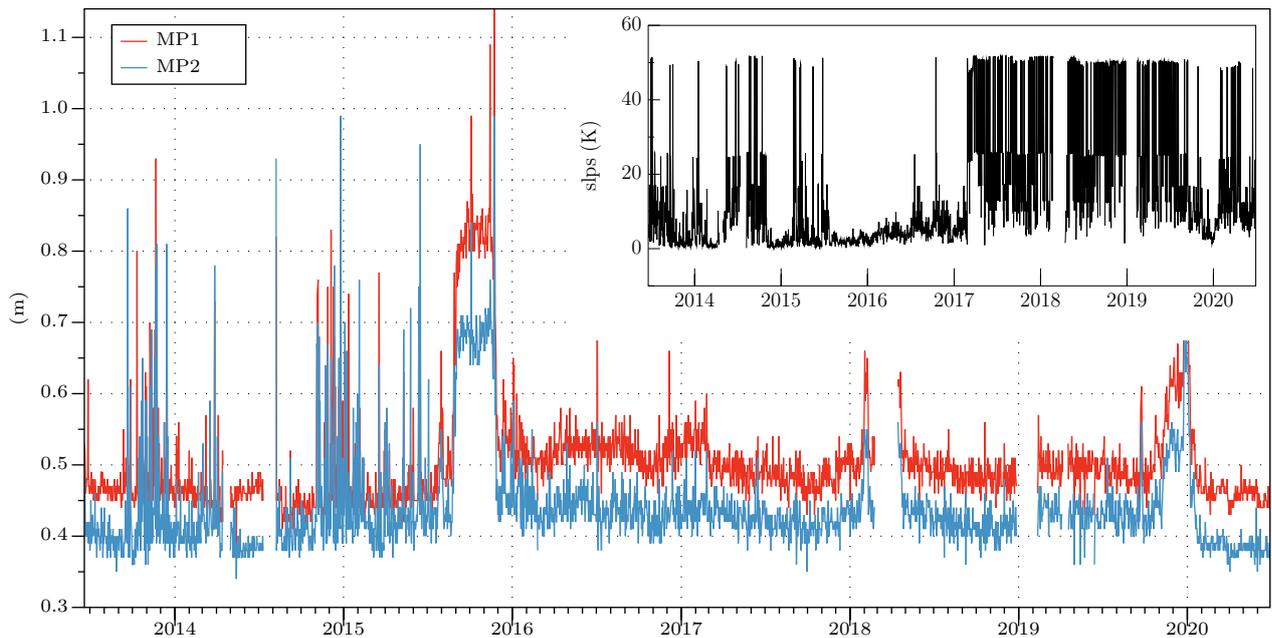


Figura 2.1: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione CLS2 fino al 30 settembre 2020.

in primavera - estate (seppur in presenza di qualche picco) in linea con i valori indicati dall'IGS per una stazione di buona qualità. Nel trimestre in esame (aprile - giugno), i valori restano al di sotto di 0.5 m e 0.4 m per MP1 e MP2 rispettivamente.

In Figura 2.2 è mostrato l'andamento dei valori di MP1, MP2 e CS della stazione SP12 durante il suoi primi 22 mesi di acquisizione. I valori di multipath, in abbassamento nel semestre estivo, sono mediamente compresi tra 0.45 m e 0.60 m, mentre i valori di cycle slips sono sempre al di sotto di 280, in aumento nel semestre.

2.1.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni

A settembre 2018, in occasione di un aggiornamento del software di processing (Geophi, Report-14004COT01-GEOPH-EDIS0-DV13-REV00, 2019), era stata rivista anche la rete di inquadramento (22 stazioni al 30 settembre) utilizzata per l'analisi delle posizioni di CLS2 che, in base ad essa erano state riprocessate a partire dal 2013, anno di inizio delle acquisizioni. A partire dal 22 novembre 2018 (DOY 326) è stata aggiunta nel processamento la nuova stazione di Edison Stocaggio SP12, e con essa altre nuove stazioni regionali ed internazionali per un numero complessivo che si allarga ad un massimo di 32 (periodo in cui tutte le stazioni scelte sono state contemporaneamente attive). Pertanto, a partire dal 22 novembre 2018 i dati RINEX giornalieri registrati dalle stazioni CLS2 e SP12 sono stati processati con il software scientifico GAMIT versione 10.71 (ultima release,

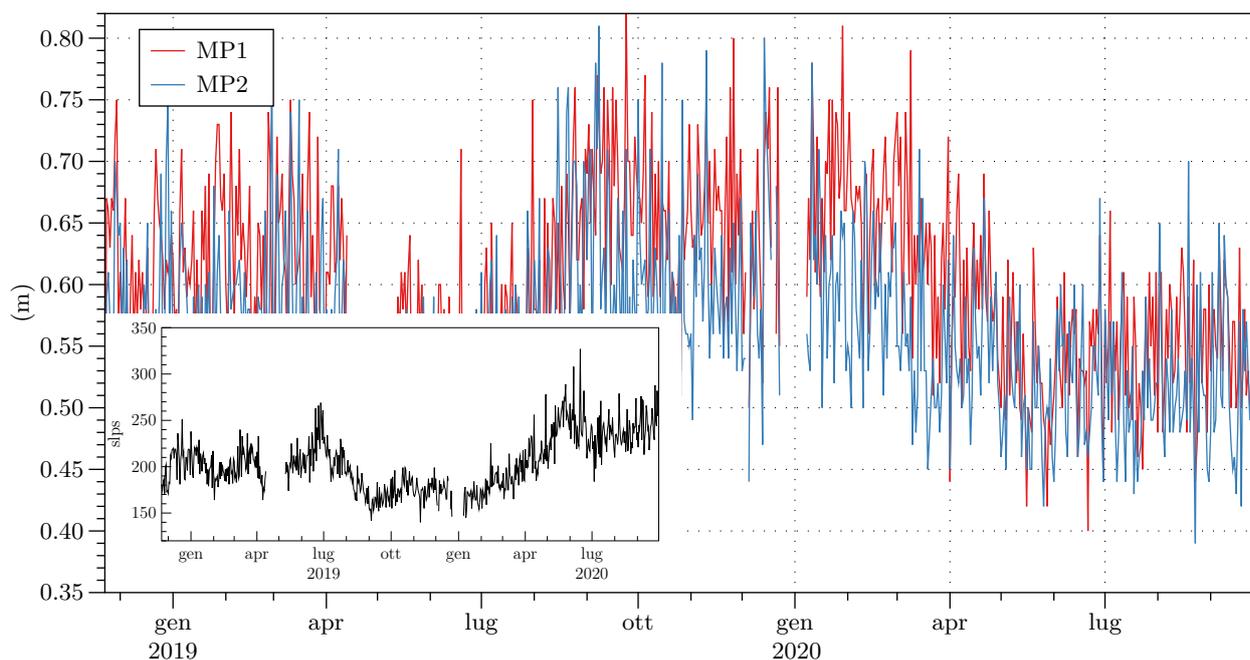


Figura 2.2: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione SP12 fino al 30 settembre 2020.

Herring et al., 2010) assieme a quelli registrati da altre 30 stazioni (Fig. 2.3) afferenti a diverse reti GPS/GNSS permanenti in Emilia-Romagna, Italia settentrionale ed Europa, in questo caso al fine di ottenere informazioni relative a punti fuori dalla zona di subsidenza della Pianura Padana e dell'area pede-Appenninica, nota dalla letteratura scientifica più recente. Successivamente, le soluzioni giornaliere debolmente vincolate, ottenute con il software GAMIT, sono state inquadrare nel sistema di riferimento internazionale IGS14 attraverso il modulo GLOBK del software, utilizzando le stazioni di riferimento IGS14 incluse nella rete (ed es. NOT1, TRO1).

La rete risulta così strutturata con:

Stazioni GNSS disponibili entro una distanza di 15 - 60 km (Fig. 2.3 a)

- CODI (Codigoro), ITIM (Imola), ITRN (Rimini) e RAVE (Ravenna) della rete Topcon-Netegeo-Emilia Romagna;
- BRIS (Brisighella), BLGN (Bologna) e RSMN (Rep San Marino) della rete RING dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV);
- BOLG (Bologna), GARI (Porto Gabribaldi), MOPS (Modena), MEDI (Medicina) della rete internazionale EUREF (Regional Reference Frame sub-commission for Europe).

Stazioni della rete geodetica internazionale EUREF operative sul territorio italiano ed europeo (Fig 2.3 b)

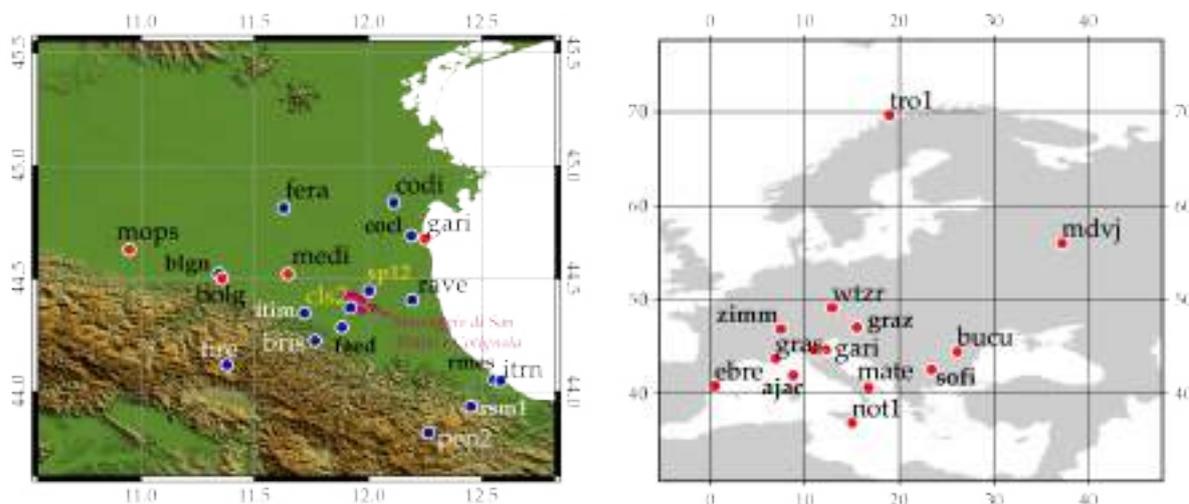


Figura 2.3: Mappa della rete geodetica utilizzata per il processing dei dati e per l'inquadramento nel sistema IGS14 di CLS2 e SP12. Fig. a): rete regionale di stazioni situate attorno al reservoir di San Potito e Cotignola: in rosso le stazioni di riferimento EUREF, in blu le stazioni delle reti RING e Netgeo Emilia-Romagna. Fig b): stazioni di riferimento europee delle reti EUREF.

- MATE (Matera, CS), NOT1 (Noto, CS), AJAC (Ajaccio, Corsica), GRAS (Caussols, Francia), EBRE (Roquetes, Spagna), ZIMM (Zimmerwald, Svizzera), GRAZ (Graz, Austria), WTZR (Baden, Germania), TRO1 (Tromso, Norvegia, CS), MDVJ (Mendeleev, Russia; CS), BUCU (Bucarest, Romania), SOFI (Sofia, Bulgaria).

La nuova stima delle coordinate della stazione CLS2 nel sistema di riferimento IGS14, riportate al 19/03/2013 (decimal year 2013.464382), restituisce:

X: 4468303.03409 (m) Y: 943210.61863 (m) Z: 4437714.13377 (m)

Latitudine: N 44° 22' 16.456439" Longitudine: E 11° 55' 10.336740" Quota: 60.76373 (m)

Le figure 2.4 e 2.5 mostrano l'andamento delle posizioni nel tempo, per la componente est, nord e verticale della stazione CLS2, nel sistema di riferimento IGS14 (Fig. 2.4) e in un sistema di riferimento locale Adriatic-fixed (Fig. 2.5), in cui le posizioni orizzontali sono state ruotate utilizzando le coordinate e la velocità di rotazione di un polo di rotazione Euleriano per la microplacca Adriatica, determinato in un lavoro di Serpelloni et al. (2016) e definito da Lon. - 26.56° E., Lat. 61.95° N e velocità di rotazione 0.521°/Ma. Rispetto a questo sistema di riferimento locale si nota da gennaio 2016 l'inizio di una fase deformativa in cui le posizioni si discostano significativamente dal modello (lineare + stagionale). Di seguito sono riportate le ampiezze (e incertezze associate) delle componenti annuali e semi annuali (in mm) ottenute analizzando la serie temporale aggiornata al 28 giugno 2020:

- Ampiezza Annuale Est: 2.530 ± 0.052 mm; Nord: 1.691 ± 0.061 mm;

CLS2 COTIGNOLA Edison Lon/Lat: 11.9195 44.3712
 Time Span (yrs): 7.0261 N.Epochs: 2393 N.Obs: 2393

A - Sistema di riferimento IGS 14

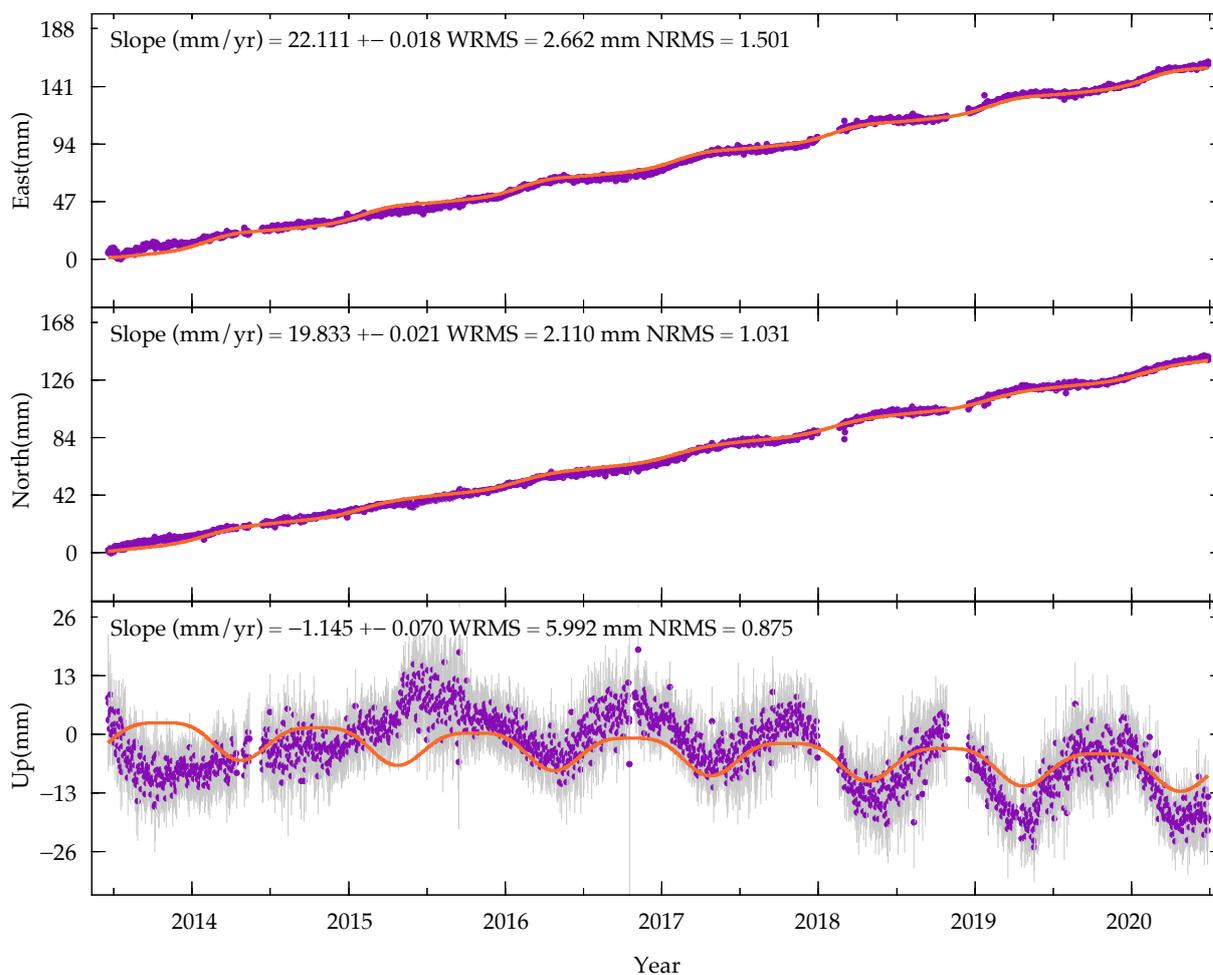


Figura 2.4: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 28 giugno 2020, nel sistema di riferimento IGS14. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

- Ampiezza Annuale Up: 3.892 ± 0.202 mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Est: 0.439 ± 0.051 mm; Nord: 0.193 ± 0.059 mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Up: 0.918 ± 0.201 mm.

Le velocità stimate per le tre componenti, E, N e Up nel sistema di riferimento IGS14 analizzando la serie temporale aggiornata al 30 settembre 2020 sono (in mm/anno):

- Velocità Est: 22.111 ± 0.018 (mm/anno);
- Velocità Nord: 19.833 ± 0.021 (mm/anno);
- Velocità Verticale: -1.145 ± 0.070 (mm/anno).

Le incertezze (1 sigma) riportate nelle stime di velocità sono le incertezze formali, ottenute dall'analisi ai minimi quadrati assumendo che il rumore nella serie temporale sia solo di tipo gaussiano.

La stima delle coordinate della stazione SP12 nel sistema di riferimento IGS14, riportate al 22/11/2018 (decimal year 2018.8918), restituisce:

X: 4461144.67625 (m) Y: 948495.33556 (m) Z: 4443722.01177 (m)

Latitudine: N 44° 26' 49.429752" Longitudine: E 12° 0' 11.048836" Quota: 44.71672 (m) La serie temporale di SP12 è mostrata in figura 2.6. Le velocità nelle 3 componenti est, nord e verticale non sono ancora da ritenere del tutto attendibili, a causa della brevità della serie temporale. Da letteratura, si ritiene un periodo di registrazione di 2.5 anni come l'intervallo minimo per una stima significativa della velocità (Blewitt and Lavallee, 2002; Serpelloni et al., 2013). Da segnalare ancora uno spostamento anomalo anche nell'ultimo semestre di monitoraggio di ≈ 17 mm verso est e di cui la maggior parte (≈ 12 mm) nei soli mesi di agosto e settembre. Nella componente verticale la stazione subisce un abbassamento graduale di ≈ -14 mm (Fig. 2.7) in linea con quanto avvenuto nel semestre estivo del 2019.

CLS2 COTIGNOLA Edison Lon/Lat: 11.9195 44.3712
Time Span (yrs): 7.0233 N.Epochs: 2393 N.Obs: 2393

B - Sistema di riferimento Adria fixed

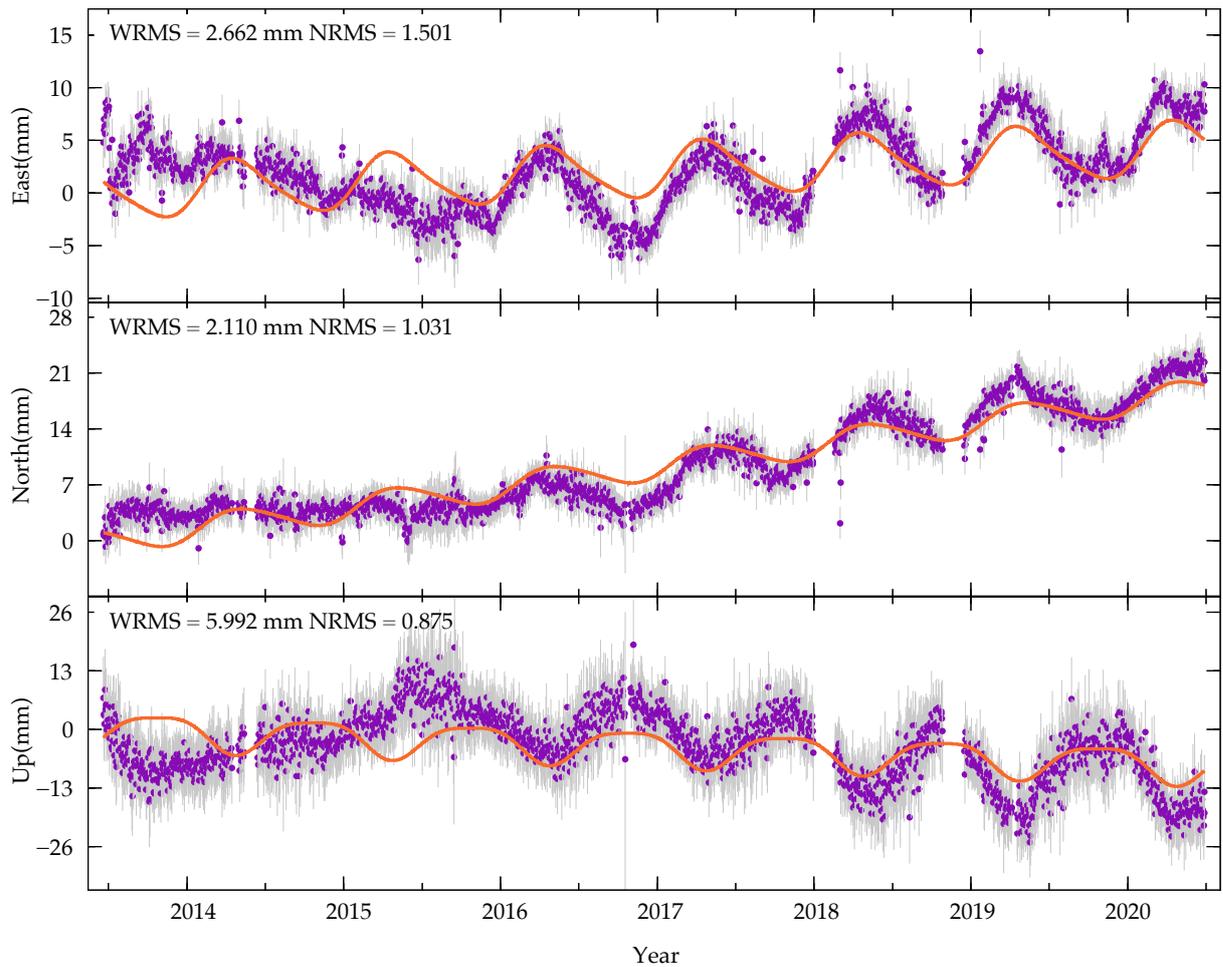


Figura 2.5: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 28 giugno 2020, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016).

SP12 SAN POTITO Edison Lon/Lat: 12.0031 44.4471

Time Span (yrs): 1.8555 N.Epochs: 632 N.Obs: 632

Sistema di riferimento IGS14

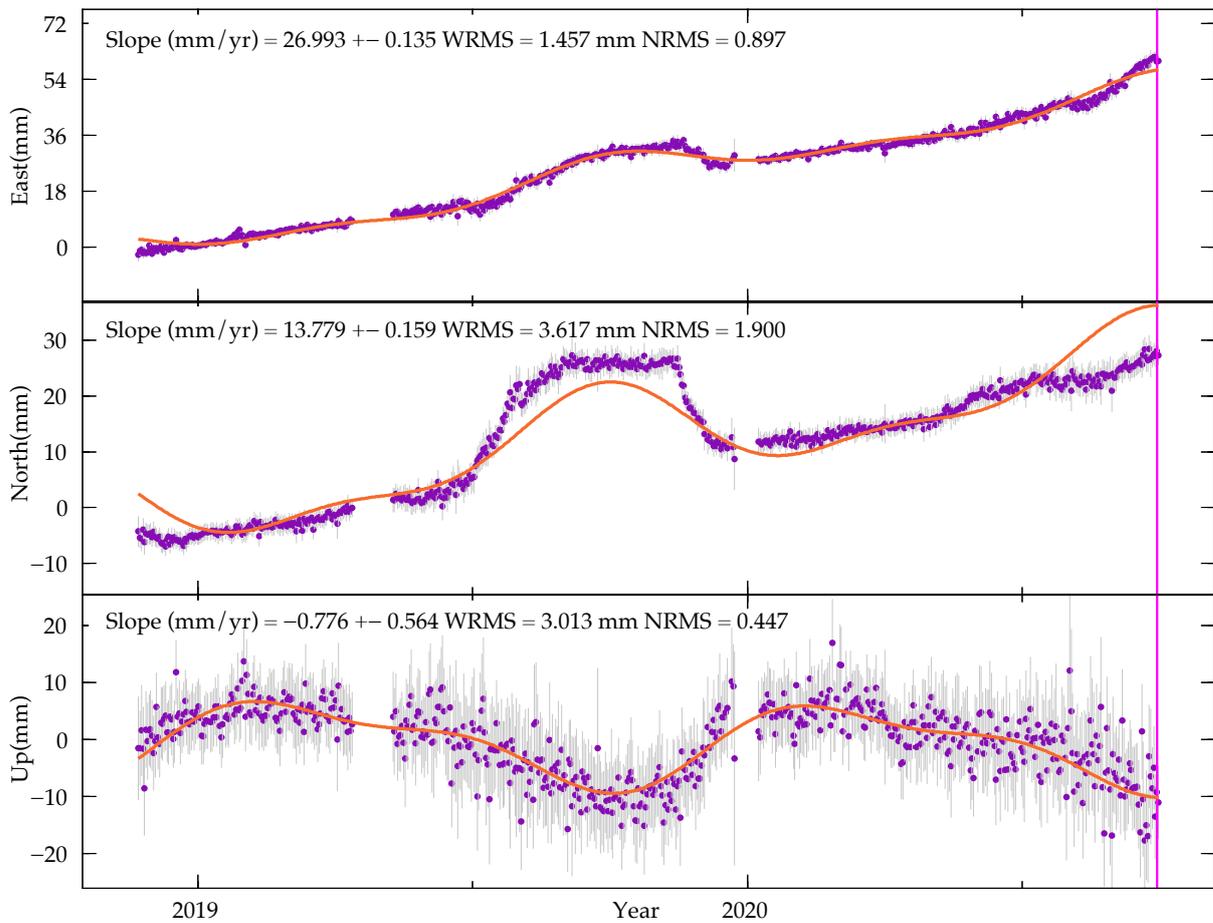


Figura 2.6: Serie temporale delle posizioni della stazione SP12, aggiornata al 30 settembre 2020, nel sistema di riferimento IGS14. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

SP12 SAN POTITO Edison Lon/Lat: 12.0031 44.4471

Time Span (yrs): 1.8555 N.Epochs: 632 N.Obs: 632

Sistema di riferimento Adria fixed

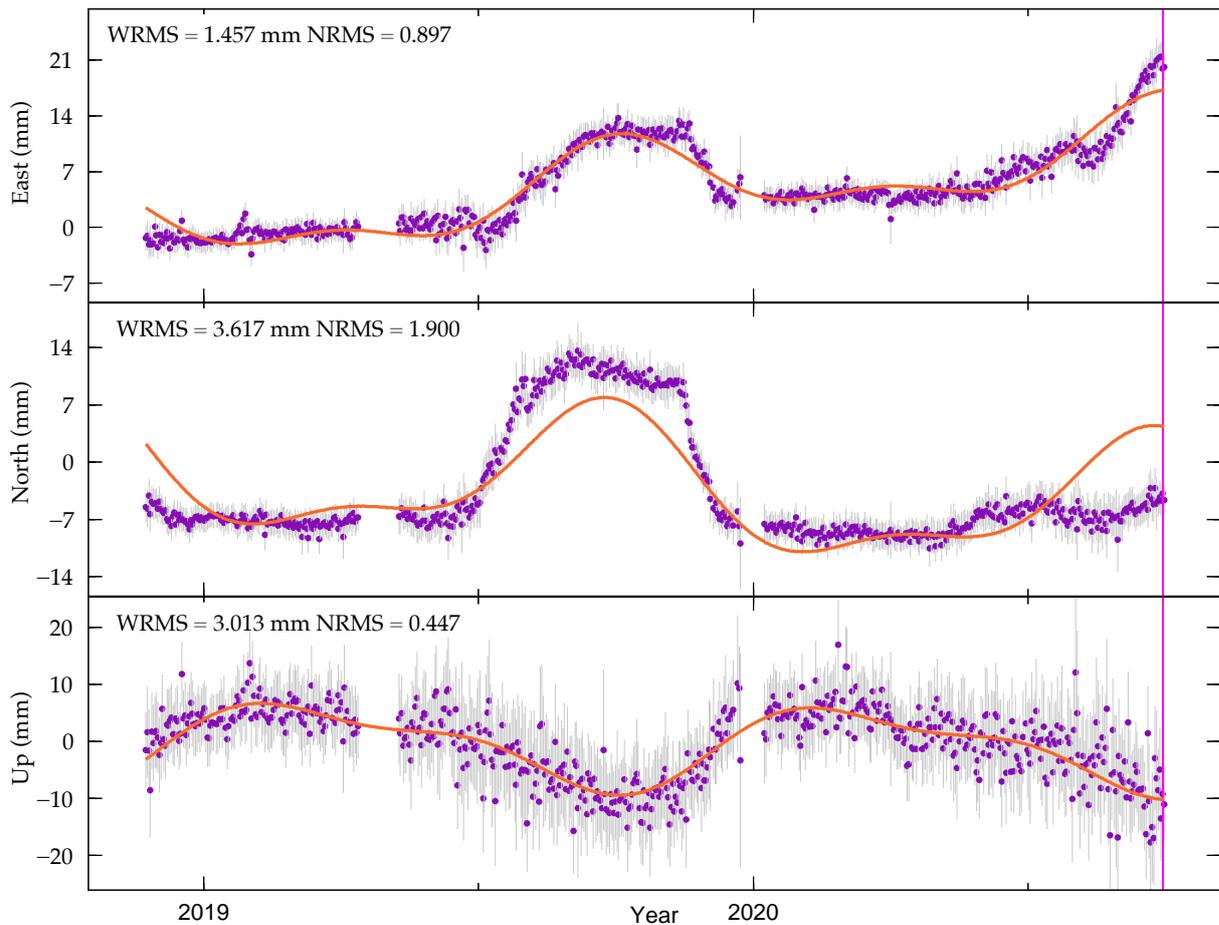


Figura 2.7: Serie temporale delle posizioni della stazione SP12, aggiornata al 30 settembre 2020, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016). Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

2.2 Rete geodetica a singola frequenza

La rete geodetica locale è costituita da 10 ricevitori GNSS a singola frequenza posizionati nell'intorno dei reservoir di San Potito e Cotignola, e dalle due 2 stazioni GNSS a doppia frequenza SP12 e CLS2, incluse anche nella rete a doppia frequenza descritta al paragrafo 2.1. Come mostrato nella mappa di figura 2.8, le lunghezze delle linee di base tra i ricevitori a singola frequenza e la stazione di riferimento SP12 variano dai 5.5 km di SP02 (la più vicina) ai ≈ 11 km di SP11. I ricevitori GNSS a singola frequenza sono assemblati a partire da schede U-BLOX NEO M8T e collegati ad antenne low cost MOBI GPS L1, per le quali non si effettua una calibrazione assoluta del centro di fase.

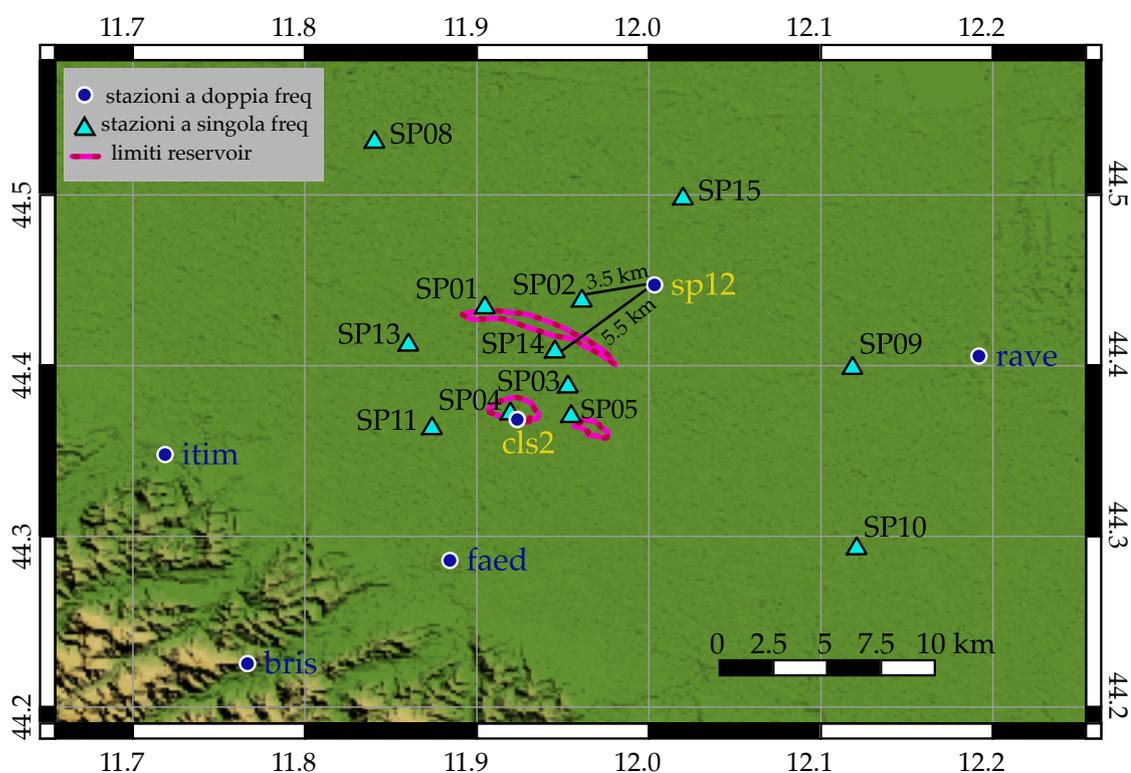


Figura 2.8: Mappa della rete a singola frequenza attorno ai reservoir di San Potito e Cotignola. In azzurro (triangoli) le stazioni Edison Stoccaggio a singola frequenza; in blu le stazioni Edison Stoccaggio a doppia frequenza CLS2 ed SP12 (etichetta gialla) e le stazioni regionali a doppia frequenza più vicine (etichetta blu).

2.2.1 Quality check

I dati RINEX giornalieri di ciascun ricevitore a singola frequenza sono stati analizzati con il software open source G-Nut/Anubis (<https://www.pecny.cz/Joomla25/index.php/gnss/sw/anubis>) sviluppato presso l'Osservatorio Geodetico Pecny (Dipartimento di Geodesia e Geodinamica del Research Institute of Geodesy, Car-

Stazione	Obs attese	Obs proc	%proc/att	ambfix	%fix/proc	outl rimossi
SP01	183	182	99.45%	182	100.00%	14
SP02	183	182	99.45%	181	99.45%	16
SP03	183	171	93.44%	169	98.83%	15
SP04	183	171	93.44%	170	99.42%	15
SP05	183	182	99.45%	181	99.45%	15
SP09	183	182	99.45%	181	99.45%	11
SP11	183	182	99.45%	180	98.90%	17
SP13	183	182	99.45%	181	99.45%	11
SP14	183	180	98.36%	180	100.00%	15
SP15	183	182	99.45%	167	91.76%	11

Tabella 2.1 - Confronto tra dati attesi e processati e tra dati processati e ad ambiguità risolta per le stazioni della rete a singola frequenza di San Potito e Cotignola nel semestre di monitoraggio aprile -settembre 2020.

GAMIT/GLOBK (release 10.71, della precedente 10.70, Herring et al., 2010): le posizioni giornaliere di tutte le stazioni (inclusa CLS2) sono state vincolate a 1 cm relativamente alla posizione di SP12, le cui coordinate a-priori, precedentemente stimate attraverso le soluzioni della rete a doppia frequenza inquadrata nel sistema di riferimento IGS14, sono qui state considerate con velocità di spostamento pari a zero. Il moto di SP12, essendo già stato determinato, non è infatti di interesse e può essere assunto pari a zero al fine di non introdurre errori nelle linee di base all'interno della rete locale implementata attorno ai due giacimenti di gas. Inoltre, impostando a zero la velocità per tutte le stazioni nella soluzione, qualsiasi movimento "assoluto" dovuto al moto delle placche diviene comune all'intera rete e non influisce sulla soluzione.

L'operazione sopra descritta consente dunque di:

- operare in un sistema di riferimento locale, senza che gli errori "assoluti" di posizionamento si propaghino significativamente tra le posizioni relative utili per lo studio della rete a singola frequenza;
- inquadrare allo stesso tempo tutta la rete locale nel sistema di riferimento internazionale IGS14, poiché la posizione di SP12, e la sua variazione nel tempo, sono già state determinate in precedenza (analisi e soluzioni della rete a doppia frequenza);
- escludere dalla soluzione di ciascuna stazione la componente di moto assoluto (tettonico).

Le soluzioni giornaliere debolmente vincolate, ottenute con il modulo GAMIT del software, sono state ulteriormente ristrette rispetto alla posizione di SP12 utilizzando il modulo GLOBK del software, vincolando ad 1 mm (rispetto alle proprie coordinate a priori ottenute dalla soluzione a doppia frequenza) la posizione di SP12, rispetto alla quale le posizioni delle altre stazioni sono state calcolate nelle componenti locali Nord, Est e Up, attraverso procedure di sola traslazione in x, y, e z. Le serie temporali così ottenute descrivono dunque

lo spostamento nel tempo delle stazioni a singola frequenza lungo le 3 componenti N, E ed UP rispetto a SP12. Gli errori associati alle misure della rete locale hanno valori minimi di $\approx \pm 1.5$ mm con massimi fino ± 5.5 mm, che aumentano in maniera proporzionale alla lunghezza della linea di base tra le varie stazioni e SP12.

Dalle serie temporali sono stati rimossi valori anomali (outliers) che ricadono al di fuori dell'intervallo $\pm 3\sigma$ (corrispondenti ad un livello di confidenza del 99%) rispetto alla regressione locale (o regressione mobile) LOESS (*locally estimated scatterplot smoothing*) con finestra di campionamento ad un mese. Tali valori coincidono in prevalenza con giorni in cui i dati delle stazioni risultano essere incompleti.

Il dato che viene presentato nelle figure che seguono corrisponde alle serie temporali delle stazioni a singola frequenza dalle quali sono poi stati rimossi gli spostamenti di SP12 calcolato in un sistema di riferimento *Adria fixed* (vedi par. 2.1.2, pp. 17), e dalle quali sono stati anche rimossi gli outliers secondo il criterio appena esposto. Infatti, la serie temporale di spostamento a doppia frequenza della stazione SP12 mostra come anche nel semestre in esame, e in particolare da agosto a settembre 2020, SP12 abbia subito un rapido e "anomalo" spostamento verso est di ≈ 12 mm (≈ 17 mm nell'intero semestre; Figs. 2.6 e 2.7). Durante il semestre di iniezione in esame, nella componente verticale SP12 subisce un abbassamento di ≈ -14 mm. Soprattutto il marcato spostamento nella componente E, inatteso per una stazione ritenuta stabile, influenza l'andamento delle serie temporali degli spostamenti delle stazioni a singola frequenza, misurati relativamente ad essa: la maggior parte delle serie temporali dei ricevitori rover sono infatti caratterizzati da una forma speculare rispetto a quella di SP12 (vedi anche Report14004COT01-GEOPH-EDIS0-DV16-REV01.pdf). Esse descrivono un graduale sollevamento nella componente Up ed un brusco spostamento verso ovest da agosto a fine settembre 2020. La somma degli spostamenti della serie temporale a doppia frequenza di SP12, con gli spostamenti dei rover GNSS a singola frequenza, restituisce gli effettivi spostamenti di ciascun ricevitore, ripuliti dagli spostamenti anomali di SP12; essi risultano più utile per controllare e poi descrivere nel testo il moto effettivo delle stazioni a singola frequenza, ubicate in zone ritenute suscettibili di possibili effetti indotti dalla movimentazione di gas (ad es. SP01, SP04, SP05, Figs 2.10, 2.14, 2.16).

La stazione SP01 è installata all'interno dell'area di proiezione in superficie del giacimento di San Potito, nella parte nord-occidentale, un'area che dagli studi dei report precedenti (deformazioni analizzate tramite interferometria) non risulta influenzata dallo stoccaggio, ma dalle naturali dilatazioni e compattazioni stagionali del terreno. Nel semestre in esame (aprile - settembre 2020), come si vede bene dalle figure 2.9 e 2.10, SP01 subisce un graduale abbassamento nella componente Up di ≈ -10 mm, imputabile prevalentemente alla compattazione dei sedimenti più superficiali causata dalla siccità estiva (Fig. 2.10).

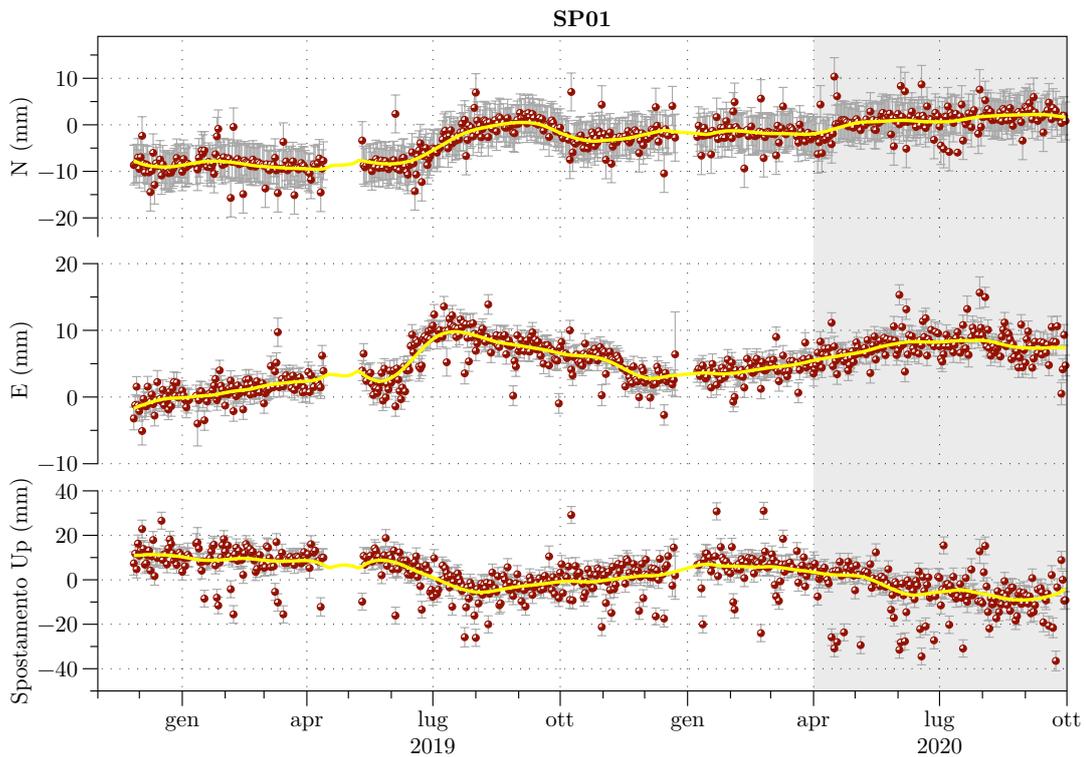


Figura 2.9: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP01 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

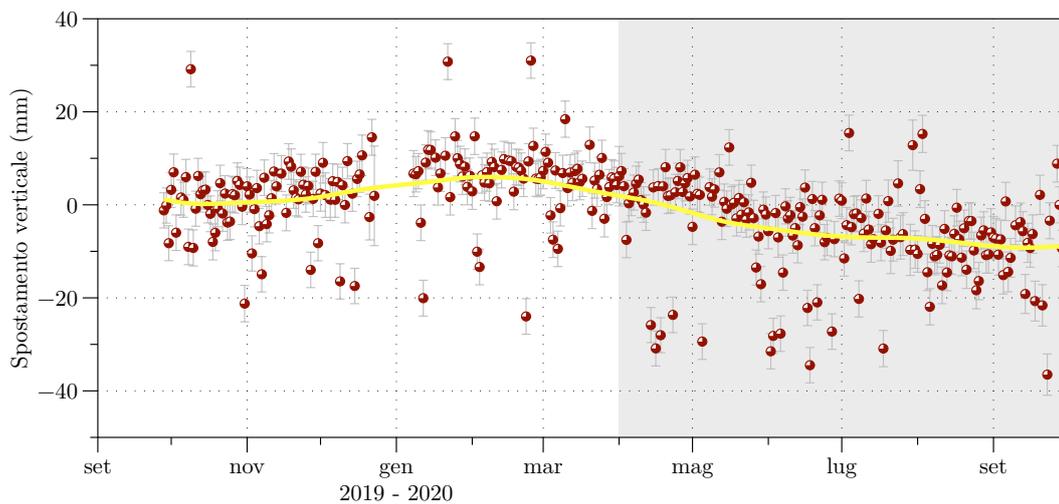


Figura 2.10: Serie temporale dello spostamento del ricevitore GNSS SP01 corretto dal moto di SP12, nelle componente UP, tra aprile e settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

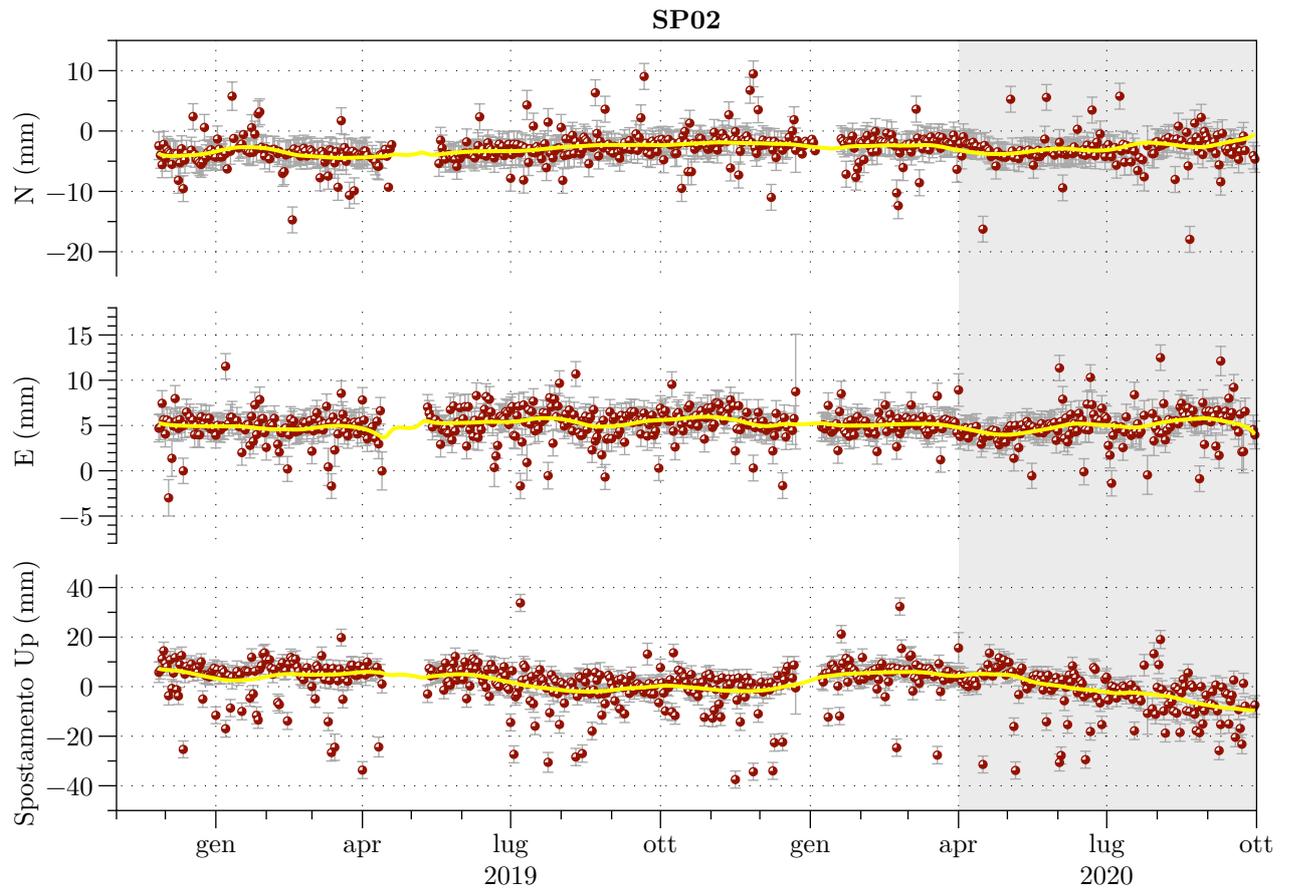


Figura 2.11: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP02 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

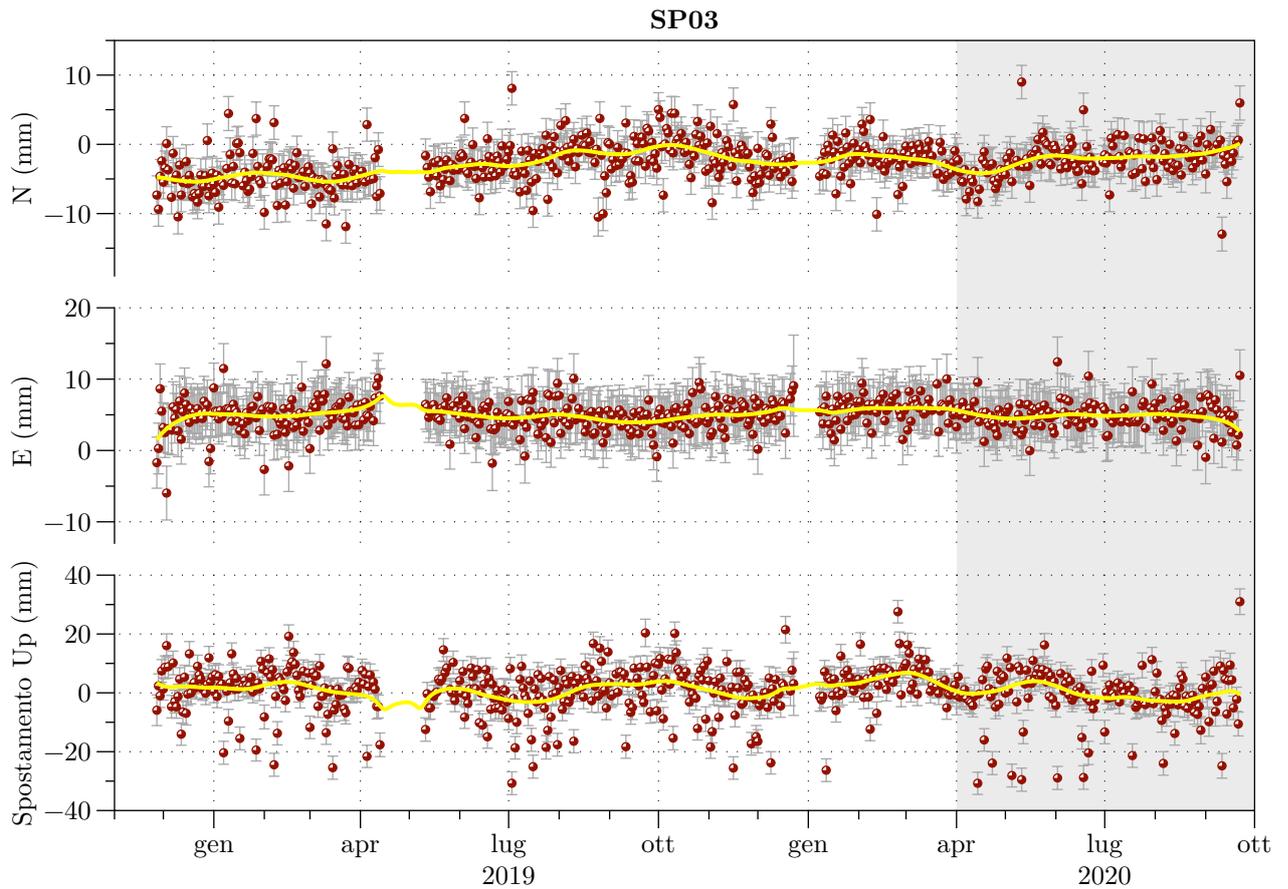


Figura 2.12: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP03 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

La stazione SP04 è posizionata sul Cluster-C, all'interno del impianto di stoccaggio, ed è l'unica stazione a singola frequenza i cui spostamenti possono essere direttamente confrontati con una stazione a doppia frequenza, CLS2, che le dista circa 40 m. Nel periodo di erogazione in esame, la serie temporale di SP04 (dalla quale sono stati rimossi gli spostamenti di SP12) descrive nella componente Up un sollevamento medio di $\approx +11$ mm (curva di fit gialla in Fig. 2.13, blu in Fig 2.14). Tale serie risulta fondamentale per la descrizione delle deformazioni al di sopra del Cluster C durante questo semestre di monitoraggio, in quanto la serie di CLS2 si interrompe a fine giugno 2020.

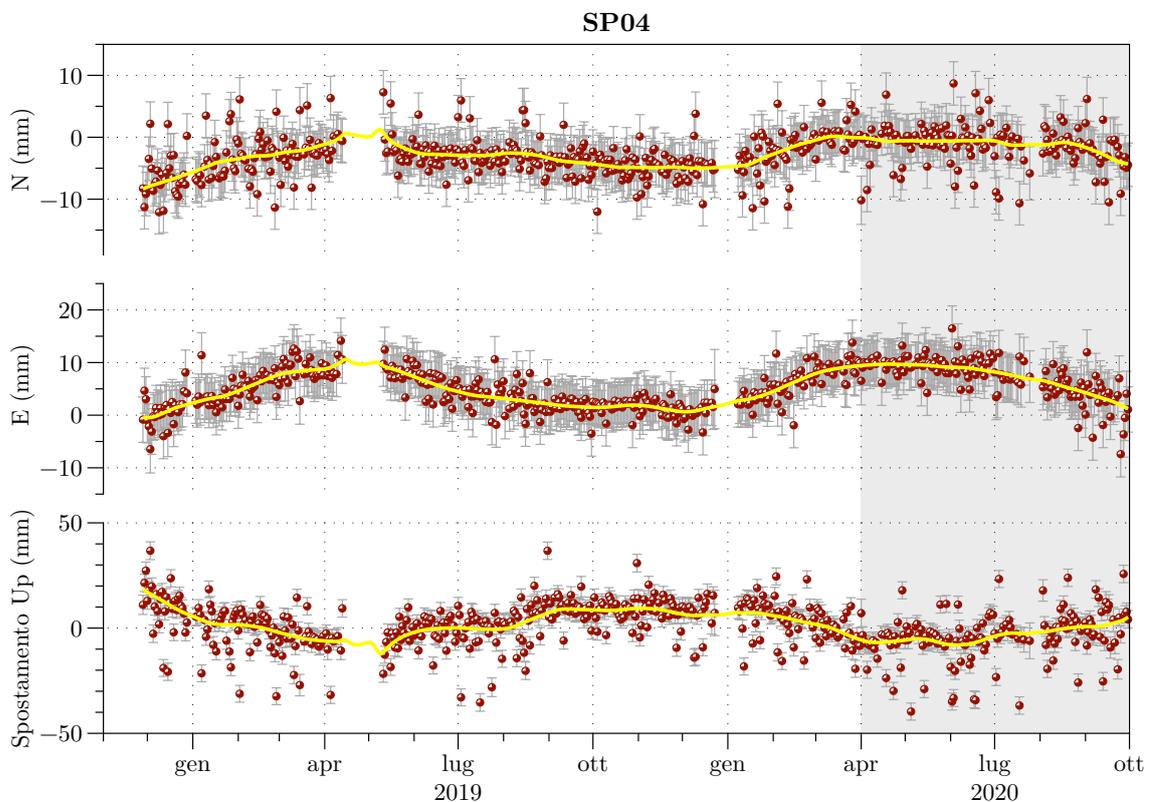


Figura 2.13: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP04 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

In questa occasione, mancando la serie temporale di CLS2 da luglio a settembre si è scelto di processare la serie di SP04 come tutte le altre stazioni, senza usare la strategia di stabilizzazione di SP04 rispetto a SP12 e CLS2 descritta nel precedente report (cap. 2.2, par. 2.2.2, pag. 27). In ogni caso, come si vede bene in figura 2.14, la serie di SP04 ben si accorda con quella di CLS2 per ampiezza e cambi di fase delle oscillazioni.

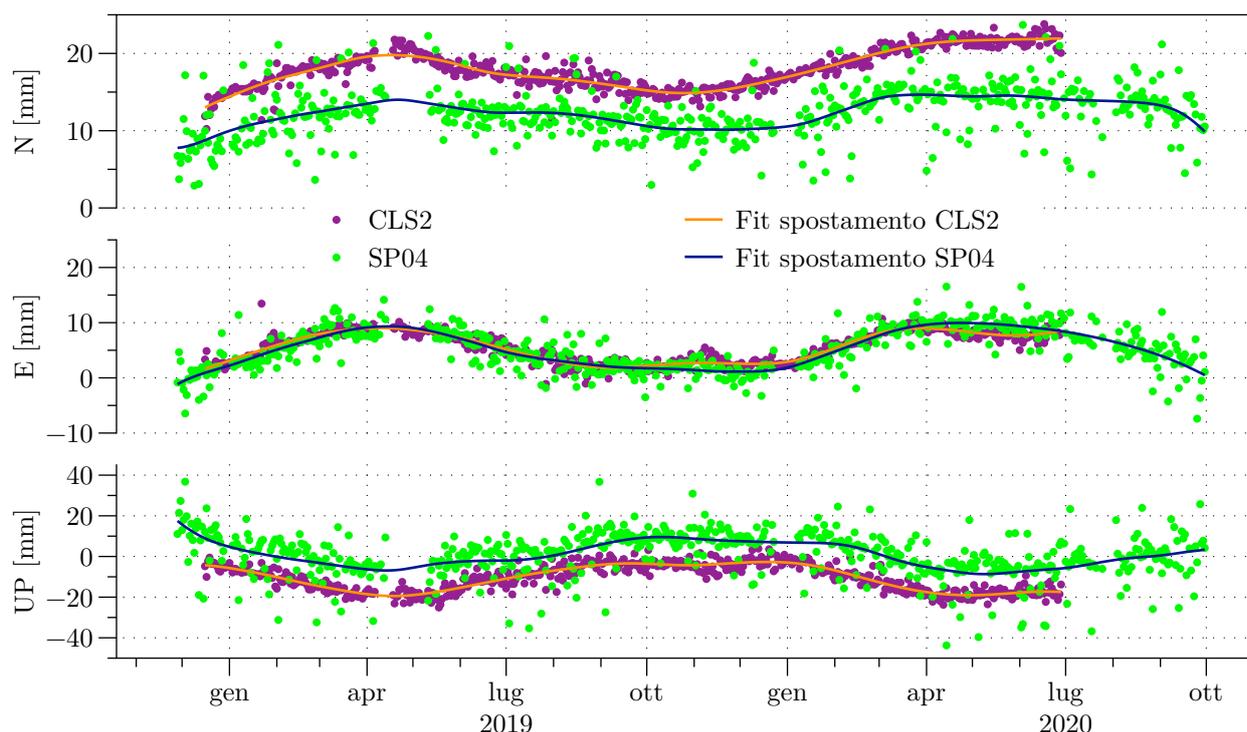


Figura 2.14: Confronto tra la serie temporale di CLS2 processata nelle rete a doppia frequenza e la serie a singola frequenza di SP04.

La stazione SP05 è posizionata nelle vicinanze del Cluster-B, ≈ 500 m a nord-ovest della proiezione in superficie dei limiti del reservoir ed allineata lungo il profilo CB (Fig. 4.2) che collega i 2 cluster. Nonostante sia al di fuori della proiezione in superficie del giacimento si può ipotizzare che l'area su cui è localizzata possa subire deformazioni indotte dalle attività di stoccaggio nei livelli dei reservoir (Fig. 4.1). La stazione SP05 non mostra alcuna evidente deformazione verticale durante l'ultimo semestre di monitoraggio (≈ -1 mm, Figs 2.15 e 2.16).

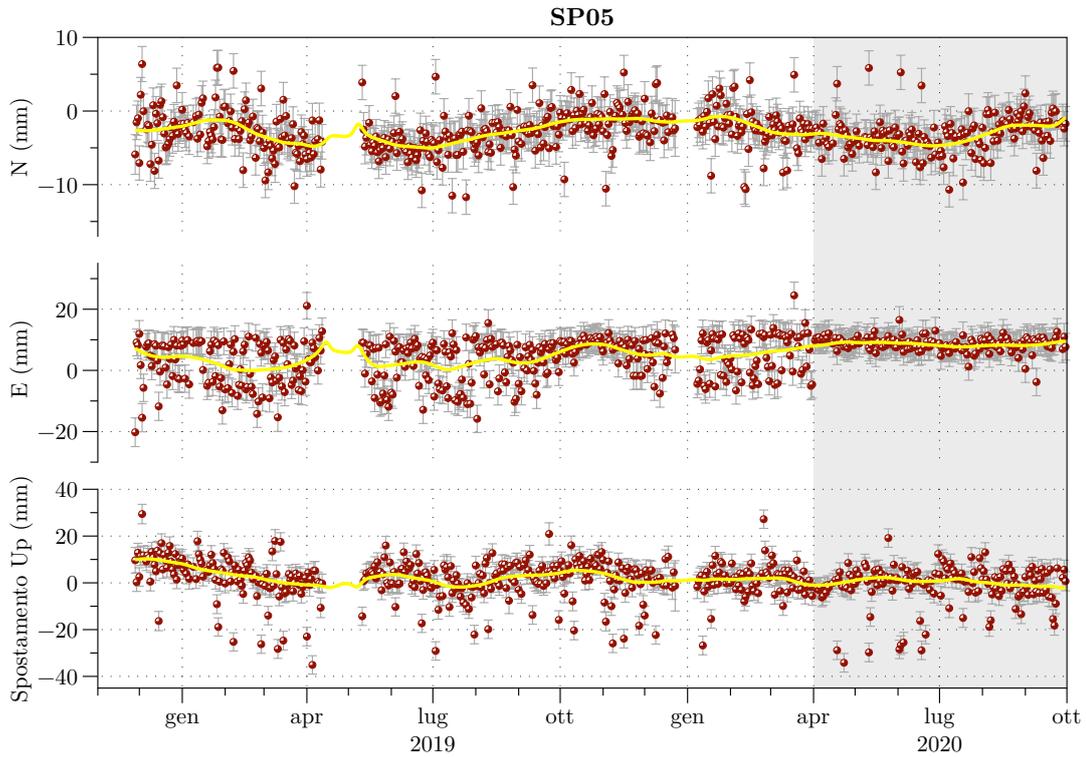


Figura 2.15: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP05 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

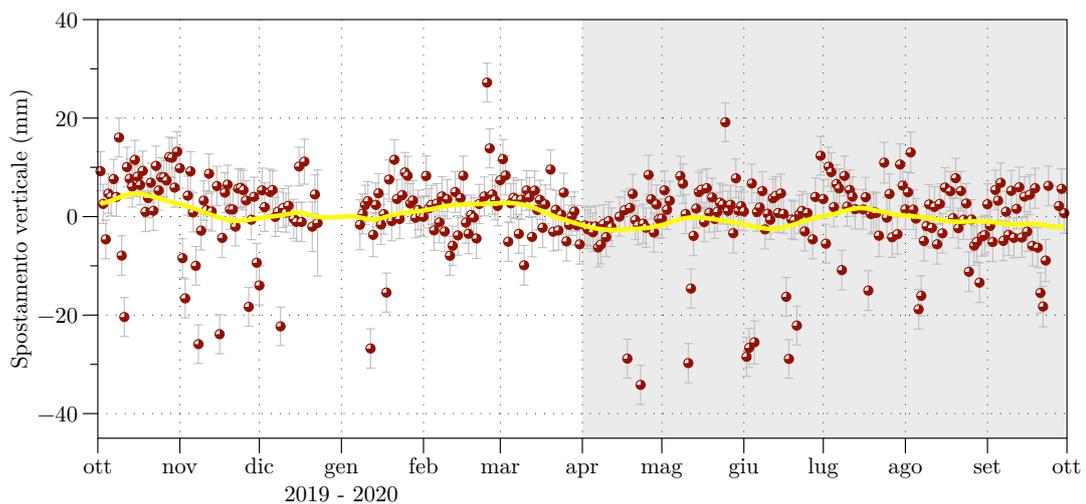


Figura 2.16: Serie temporale dello spostamento del ricevitore GNSS SP05 corretto dal moto di SP12, nelle componente UP, tra aprile e settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

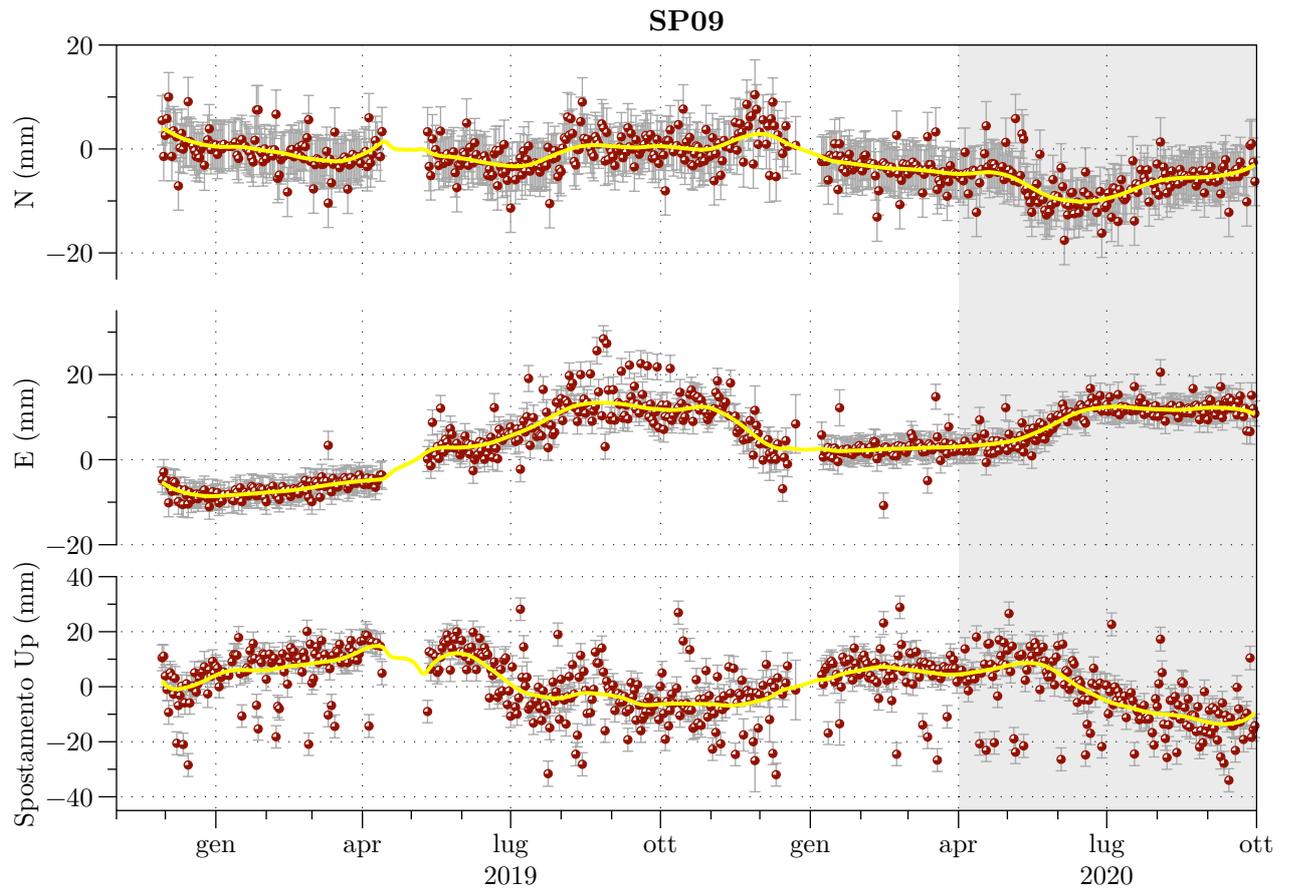


Figura 2.17: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP09 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

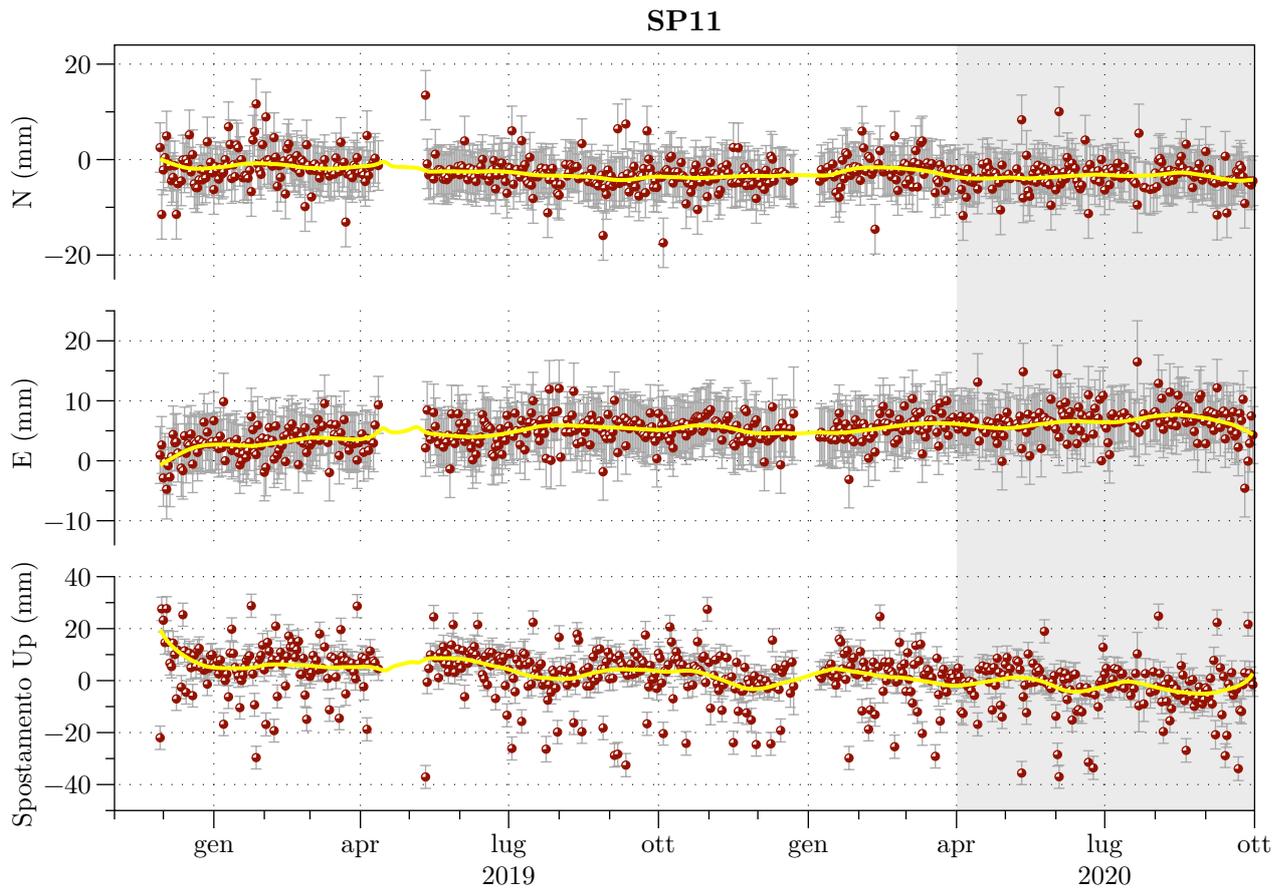


Figura 2.18: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP11 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

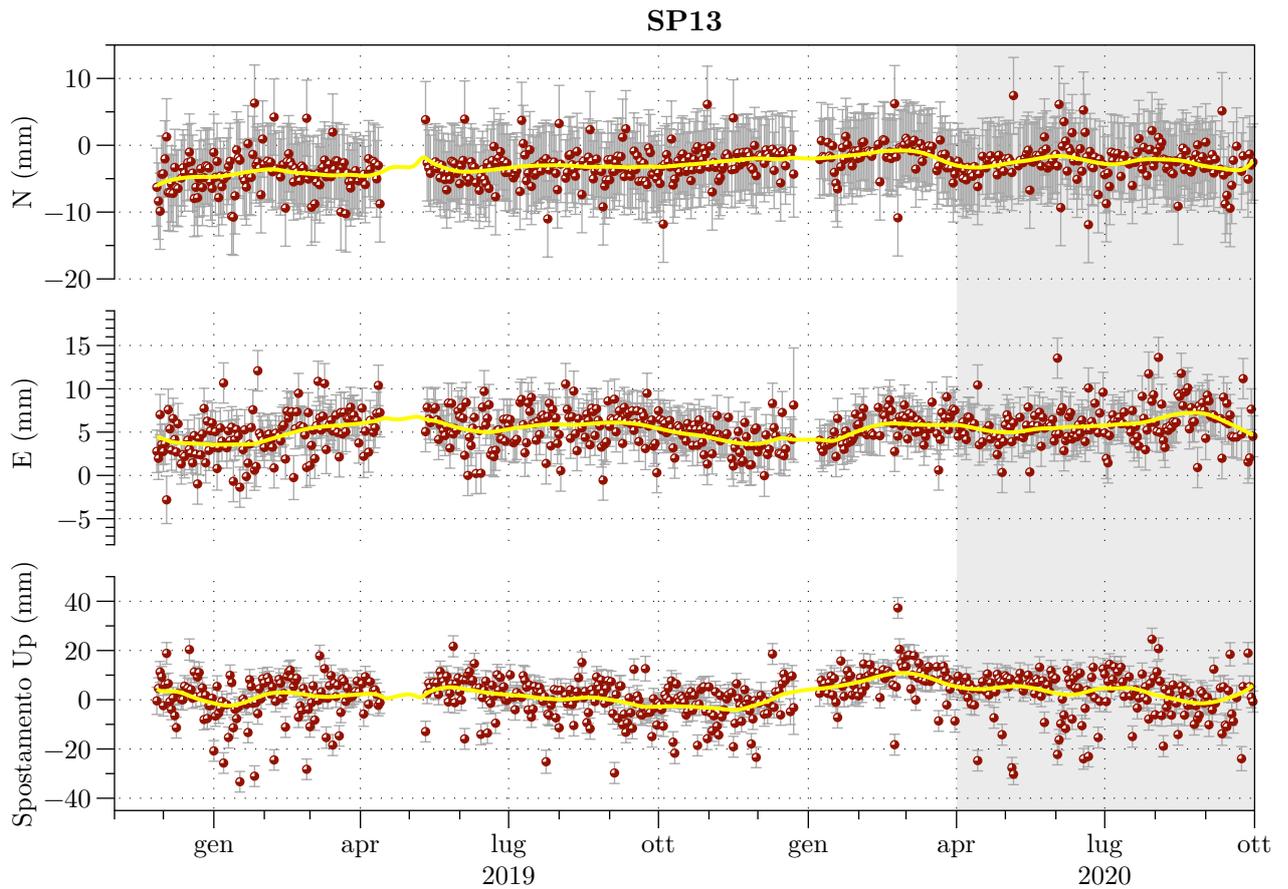


Figura 2.19: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP13 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

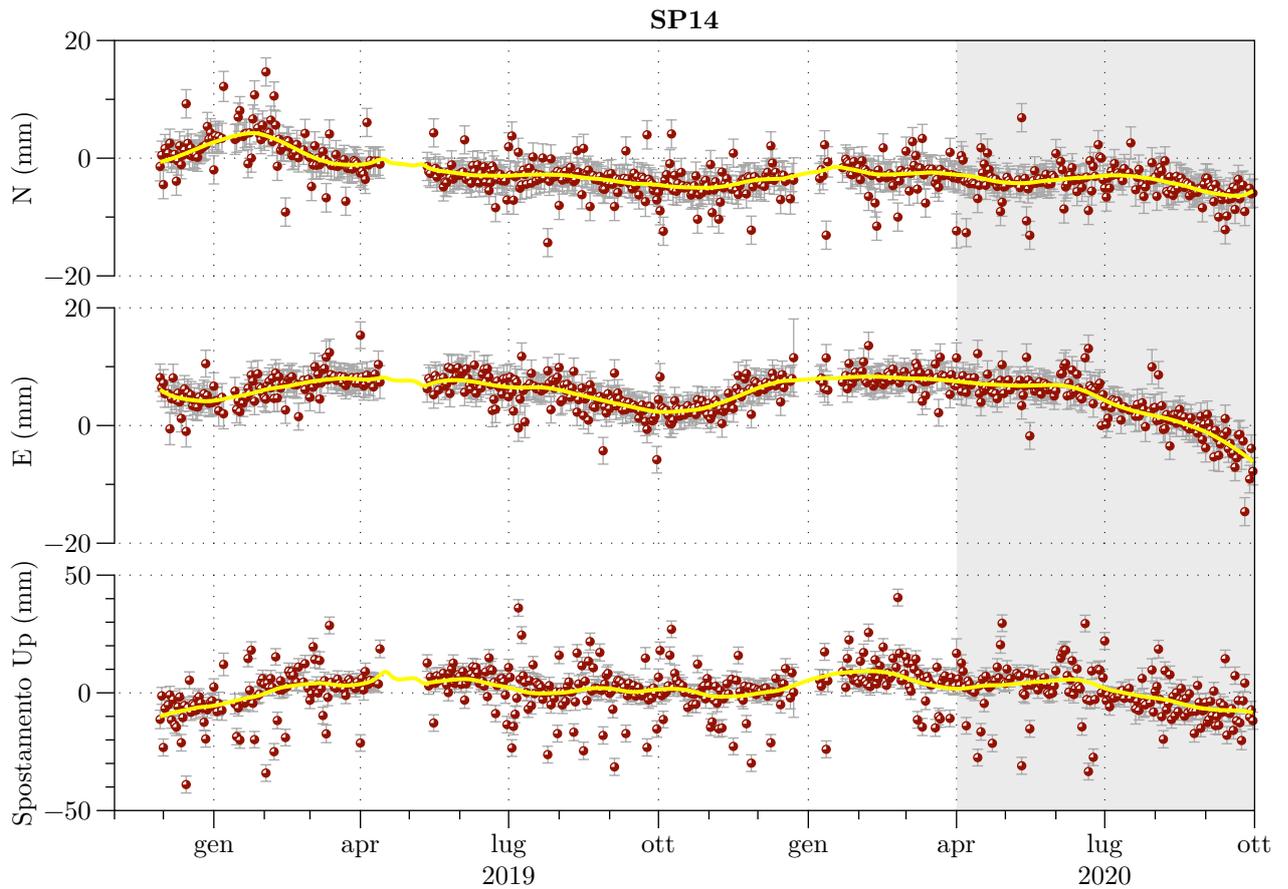


Figura 2.20: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP14 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

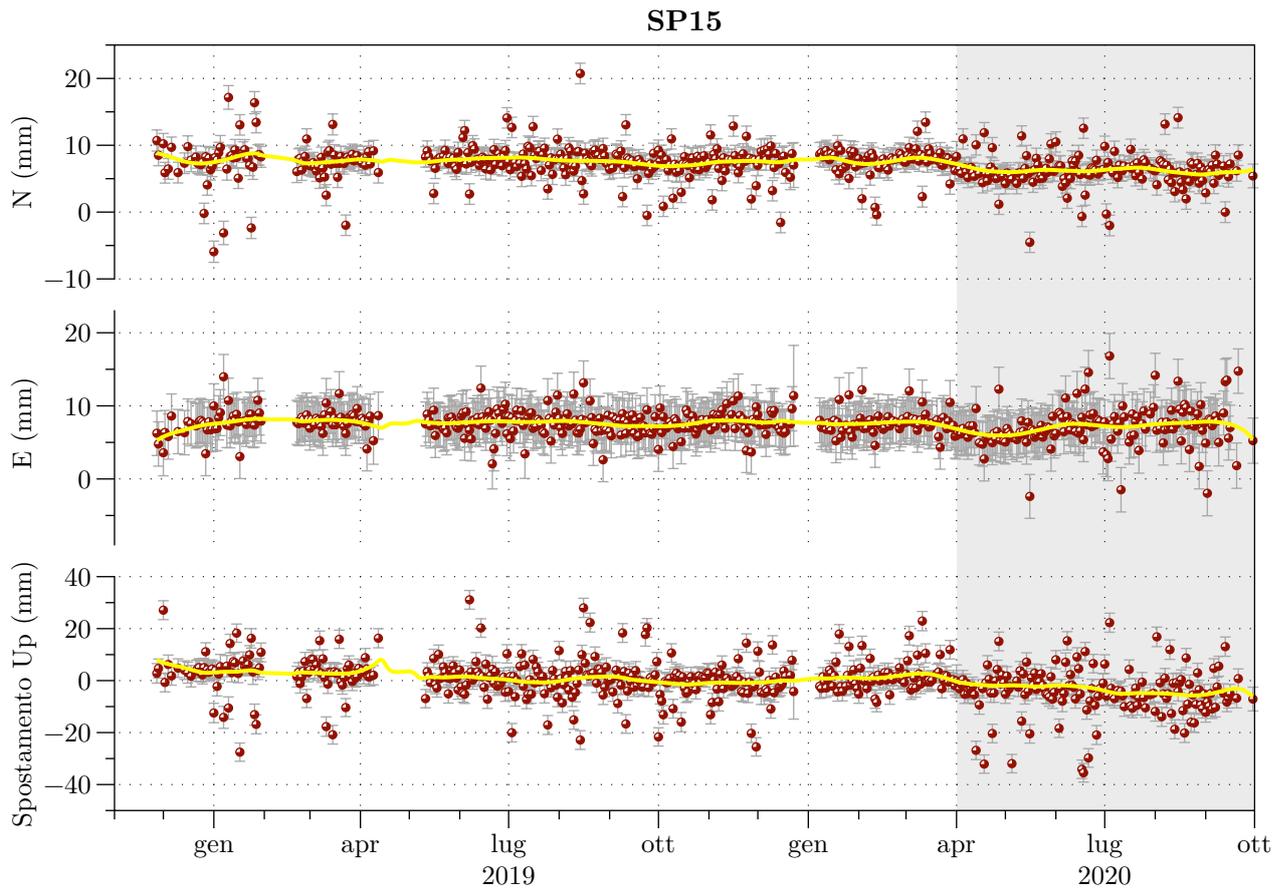


Figura 2.21: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP15 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2020. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità

3.1 Piezometri

Il comportamento dei piezometri superficiali nel periodo aprile - settembre 2020 ha andamento confrontabile con quanto avvenuto nei medesimi periodi degli anni precedenti, ovvero un trend di abbassamento delle quote dal piano campagna. In particolare, gli andamenti delle falde superficiali mimano quanto già verificatosi nel periodo aprile - ottobre 2017; nel caso dell'anno 2020 tuttavia, l'abbassamento appare più continuo, a rimarcare le scarse precipitazioni nel periodo invernale; inoltre l'andamento delle quote piezometriche non viene in questo caso influenzato particolarmente dalle precipitazioni di maggio-luglio 2020.

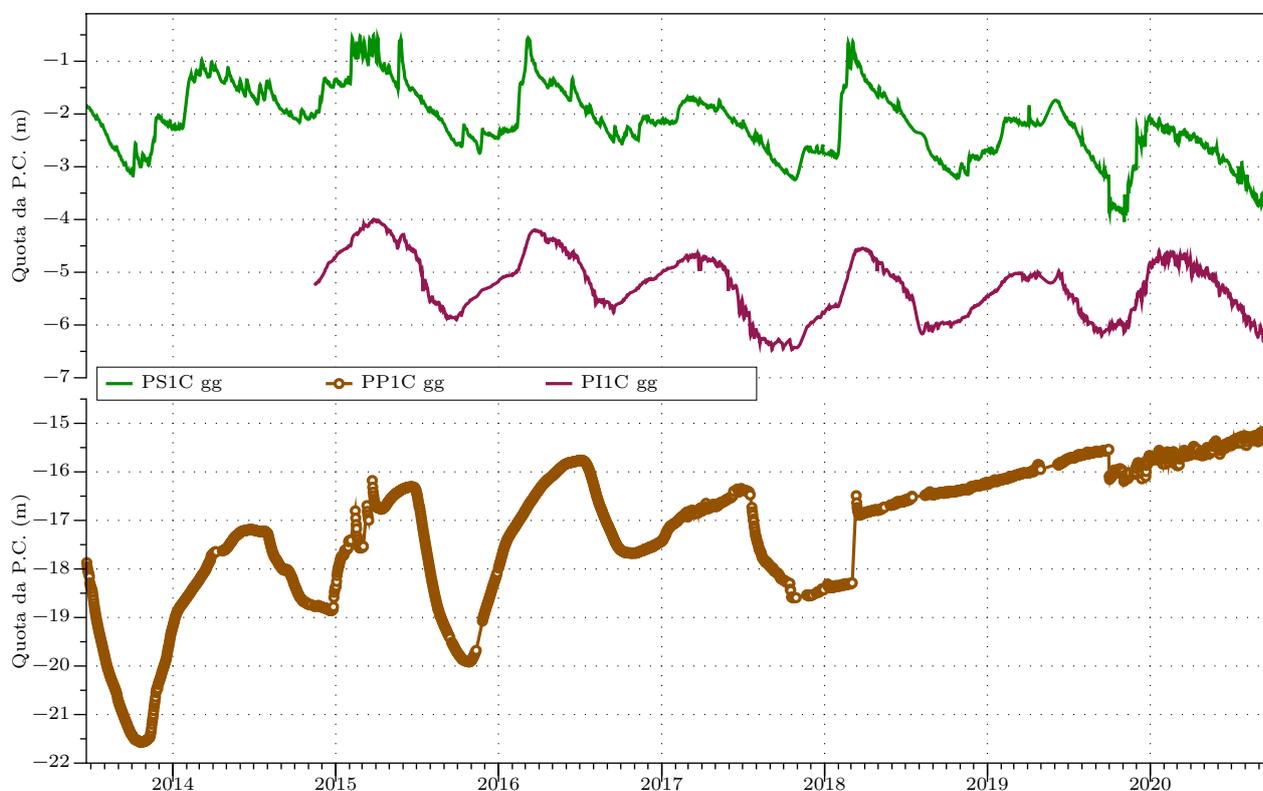


Figura 3.1: Variazioni giornaliere medie della quota dal piano campagna registrate rispettivamente nei piezometri superficiale, intermedio e profondo, compensate per la pressione atmosferica. Dal grafico sono escluse le medie con valori di deviazione standard ≥ 0.05 .

Nel semestre in esame la quota del piezometro PS1C scende di ≈ 1.5 m, con un abbassamento complessivo di 1.8 m a partire da gennaio 2020 (ultimo massimo relativo). A fine rilevamento, la quota piezometrica si attesta a -3.81 m da p.c.

La quota del piezometro intermedio scende di ≈ 1.6 m tra aprile e settembre 2020, anche qui con un abbassa-

mento complessivo di 1.8 m a partire da gennaio 2020. A fine rilevamento la quota piezometrica si attesta a circa - 6.2 m da p.c..

In questo trend di abbassamento, le falde investigate appaiono scarsamente influenzate dalle precipitazioni estive: si verificano infatti solo impulsi minimi di risalita delle quote (es. luglio 2020), che interessano solo le falde superficiali, in risposta alle precipitazioni (Fig. 3.2) e senza inversioni nel trend di abbassamento delle quote.

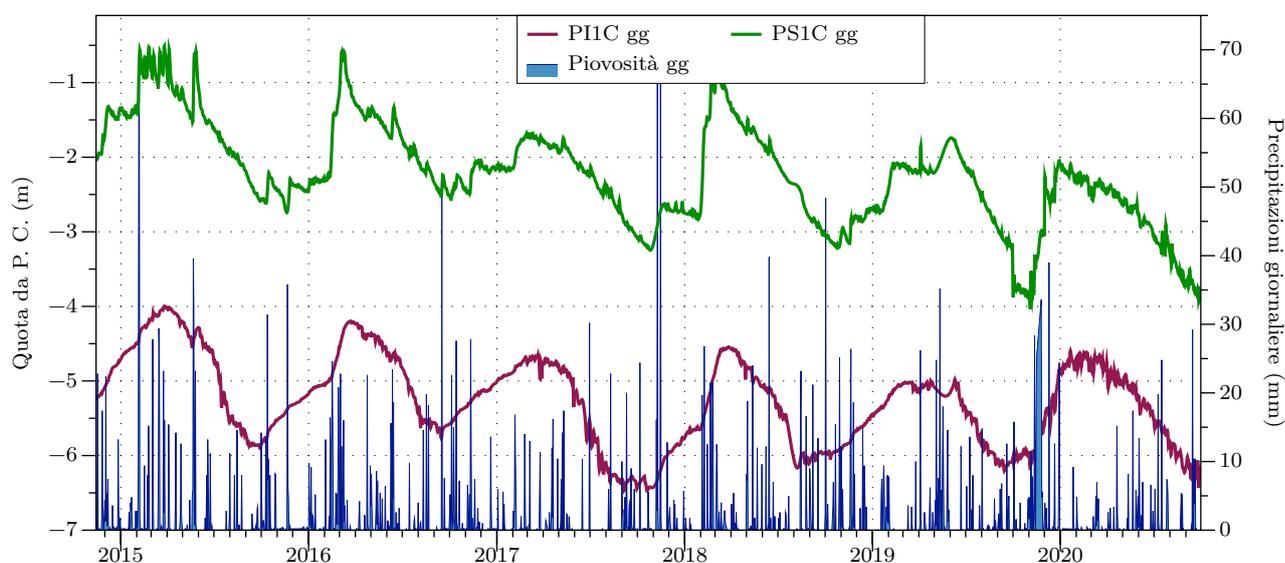


Figura 3.2: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nei piezometri superficiale e intermedio, in relazione alla piovosità giornaliera.

Il piezometro profondo PP1C mostra un trend di innalzamento della quota da p.c., analogo agli innalzamenti registrati nei precedenti semestri di iniezione. In questo semestre, non si registra l'inversione del trend di innalzamento della quota (generalmente registrata intorno ai mesi di luglio) a fronte di precipitazioni estive simili a quelle degli anni precedenti (Fig. 3.3).

Nel giorno 24 settembre 2020 sono stati effettuati dei lavori di spurgo e manutenzione sul piezometro profondo che presentava evidenti problemi nella lettura delle quote piezometriche. Al 23 settembre la quota piezometrica si attestava a - 15.3 m da p.c.; dopo un rapido spurgo la quota è risalita fino a - 9.7 m e ridiscesa rapidamente attorno a - 10.85 m nel giro di 5 giorni (il 30 settembre, a fine monitoraggio). Questa particolarità verrà ulteriormente discussa in seguito e nei successivi report di monitoraggio.

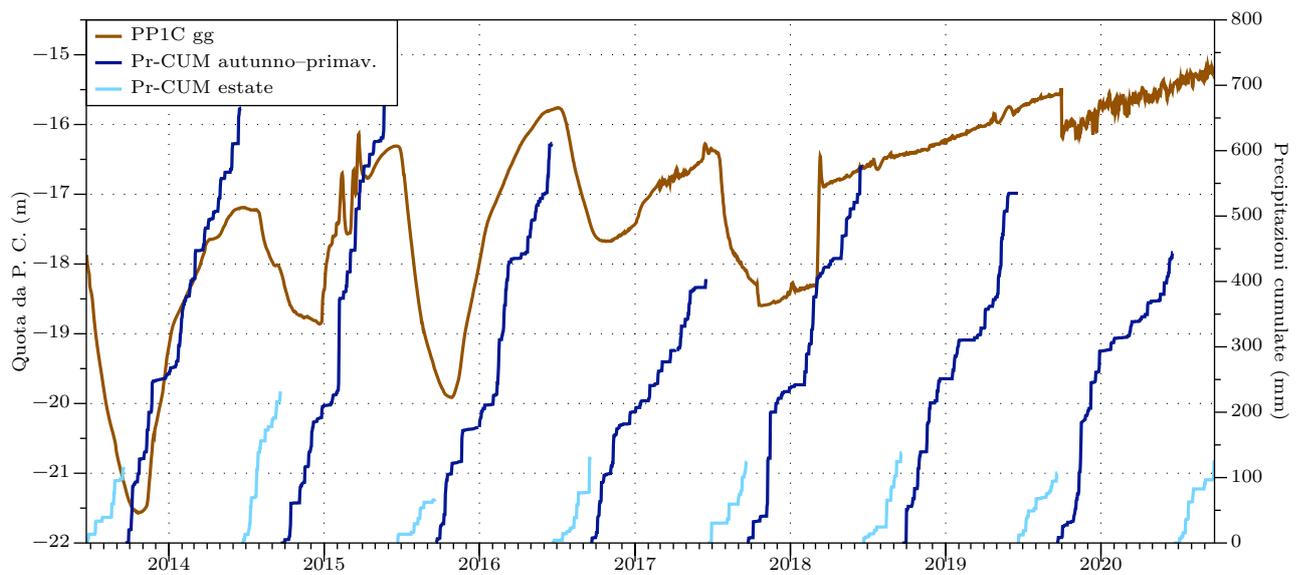


Figura 3.3: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nel piezometro profondo in relazione con le precipitazioni cumulate ogni anno. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale dello strumento, le cumulate della piovosità vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno di ciascun anno e riportate a zero all'inizio di ogni estate (stagione secca).

3.2 Assestimetri

Nel semestre in esame, l'andamento di entrambi gli assestimetri mostra un trend di compattazione delle colonne di sedimenti investigati dagli strumenti (curve rossa e viola in figura 3.4: risalita della curva = dilatazione, discesa della curva = compattazione). Le deformazioni registrate nel semestre non si discostano significativamente da quelle registrate in altri analoghi periodi di monitoraggio. Questi andamenti si inseriscono in un ulteriore quadro di compattazione generale osservabile con entrambi gli strumenti.

Il giorno 24 settembre 2020 sono stati effettuati dei lavori sul piezometro profondo; inevitabilmente tali lavori hanno influenzato le letture strumentali dell'assestimetro profondo, che condivide il case nel quale sono stati alloggiati gli strumenti profondi di monitoraggio. Pertanto le letture e le misure rilevate nei giorni seguenti al 24 Settembre 2020 sono state escluse dalla discussione e dalle stime di deformazione media di seguito presentati e discussi.

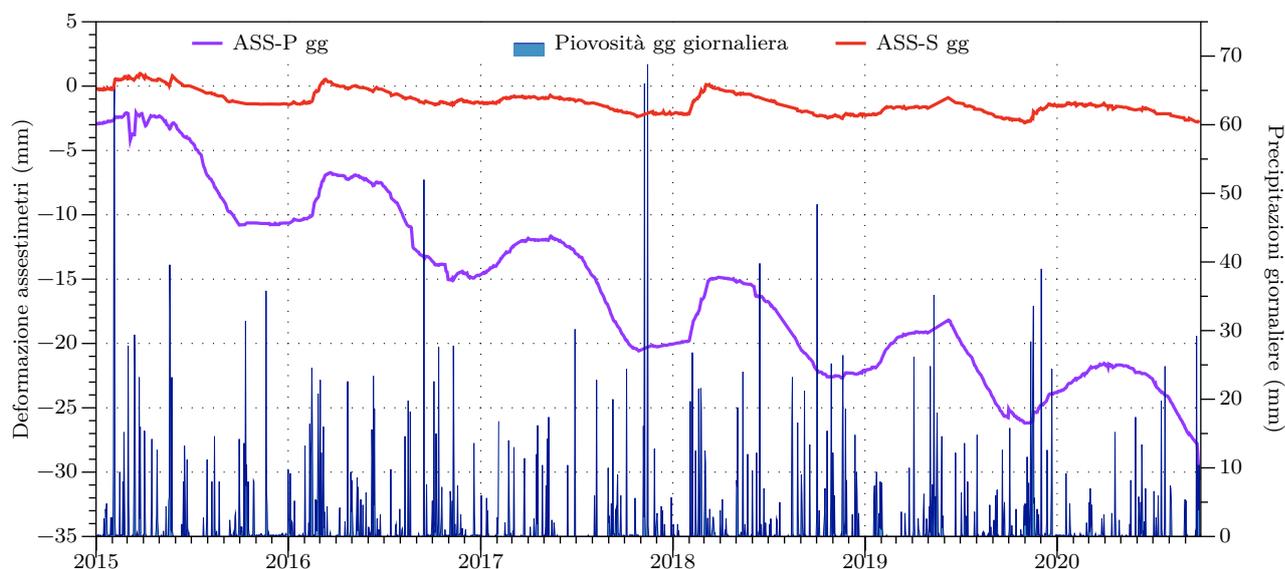


Figura 3.4: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo le aste degli assestimetri superficiale (ASS-S) e profondo (ASS-P) in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015 fino al 30 settembre 2020.

- Nel semestre in esame, i primi 11 metri di sedimento (linea rossa in figura 3.4) si sono compattati di ≈ 1.5 mm. Questa dinamica si inserisce in un trend di lievissima compattazione da inizio monitoraggio (-0.26 mm/anno); a fine settembre 2020 lo strumento indica 2.8 mm di compattazione accumulata.
- I 350 metri di colonna sedimentaria, monitorata tramite l'assestimetro profondo (linea viola in figura 3.4) si sono compattati di ≈ 6.5 mm nel semestre in esame. Questa dinamica si inserisce in un trend di



compattazione costante da inizio monitoraggio ($\approx - 3.8$ mm/anno); a fine settembre 2020 lo strumento indica una compattazione complessiva di ≈ 28 mm (al 23 settembre 2020).

4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Cotignola

4.1 Analisi delle serie interferometriche sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas

L'analisi interferometrica prodotta da TRE, aggiornata al 28/10/20, evidenzia nell'area del giacimento di Cotignola la permanenza di un trend ciclico nelle serie storiche osservato sia nel Pool B che nel Pool C. I dati

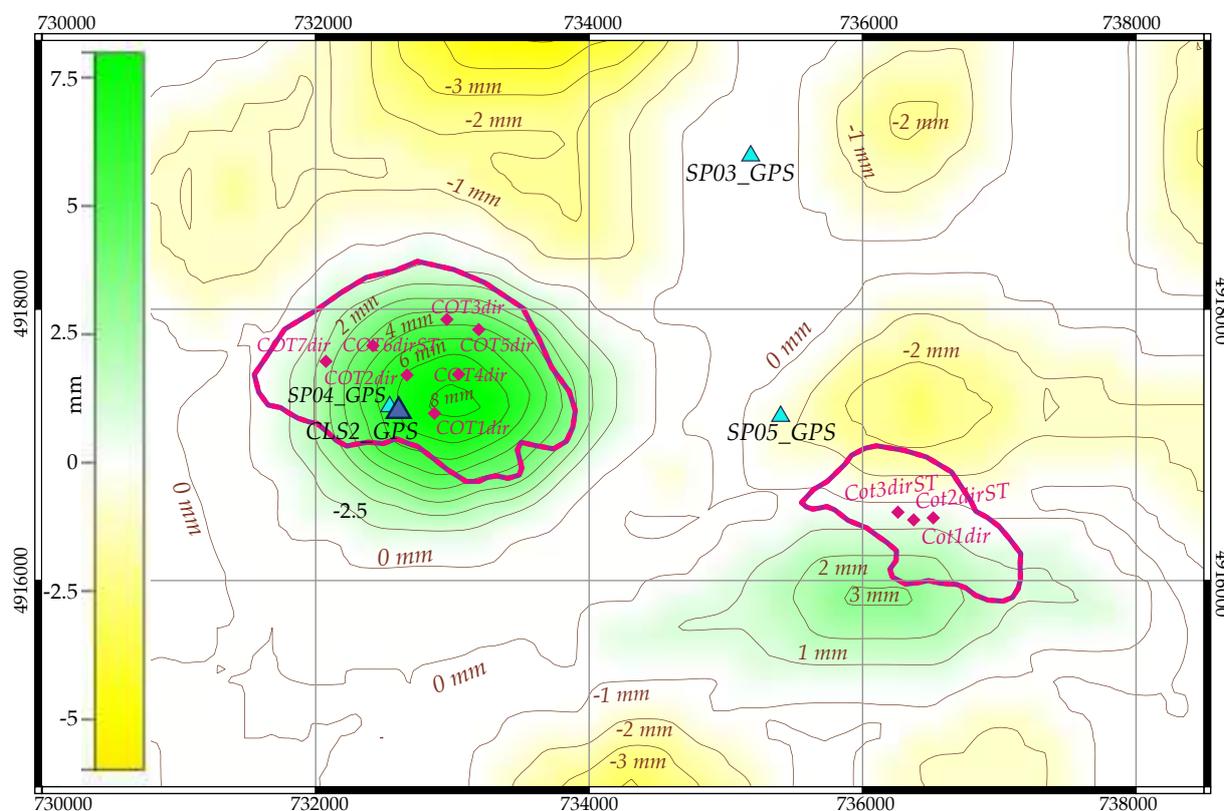


Figura 4.1: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di iniezione tra aprile e settembre 2020 (esagerazione verticale 1000x).

dell'aggiornamento ad ottobre 2020 mostrano sul giacimento una inversione del trend di subsidenza della serie storica a partire già da metà maggio 2020, con l'inizio di un nuovo fenomeno di sollevamento. L'inversione si osserva sia nel Cluster B che nel Cluster C, anche se è più marcato nella zona centro-meridionale di quest'ultimo. La superficie che interpola gli spostamenti verticali subiti dai bersagli radar durante i 6 mesi della fase di iniezione 2020, nei cluster B e C (≈ 220.5 MSmc dal Cluster C, ≈ 27.5 MSmc dal Cluster B, fig. 4.1), mostra le due zone di sollevamento localizzate a ridosso dei cluster. La stima della variabile Z (spostamento

verticale nel semestre di iniezione) è stata effettuata in corrispondenza dei nodi di una griglia rettangolare di dimensioni pari a 51 x 32, con nodi distanti 200 m. Dal momento che la variabile non presenta trend, tale stima è stata effettuata ricorrendo alla tecnica del Kriging stazionario, ed utilizzando un modello di semivariogramma gaussiano. Il risultato dell'interpolazione elimina i massimi di deformazione raggiunti da singoli PS (si vedano figs 4.2 - 4.6), descrivendo una deformazione mediata del terreno, ma sicuramente più omogenea e realistica.

Al di sopra del Cluster-B si evidenzia un sollevamento areale mediamente compreso tra i + 2 e + 6 mm concentrata tra i pozzi Cot1DirST, Cot2DirST e Cot3DirST. Si osservano inoltre dei massimi relativi di sollevamento (fino a + 8 mm) in una zona al di fuori dell'area di stoccaggio, nella porzione più meridionale del campo.

Al di sopra del Cluster-C si evidenzia un cono di sollevamento areale mediamente compreso tra + 4 e + 8 mm, con un massimo fino a $\approx +15$ mm nelle porzioni centrali del giacimento, tra i pozzi Cot1Dir, Cot2Dir e Cot4Dir. In questo semestre si osserva inoltre un notevole sollevamento (fino a +16 mm mediamente) in una porzione orientale del campo, dovuta però ad un solo PS (A4DRVFW).

Le serie temporali fornite da TRE ALTAMIRA sono state ulteriormente elaborate per meglio definire e visualizzare tali trend di deformazione nell'intorno dei reservoir adibiti a stoccaggio.

Per analizzare gli effetti della movimentazione di gas nel reservoir della concessione si parte dall'ipotesi che:

- i quantitativi di gas in erogazione/iniezione inducano subsidenza/sollevamento della superficie topografica;
- l'analisi interferometrica sia in grado di evidenziare i suddetti movimenti.

E' stata svolta una analisi lungo il profilo longitudinale CB (figure 4.2 e 4.3) che interseca la culminazione strutturale dei corpi di reservoir dei Pool C e B (Fig 4.2).

Le serie in figura 4.3 rappresentano i valori di spostamento di ogni bersaglio radar proiettato sul profilo CB, alla fine di ognuna delle fasi di iniezione ed erogazione degli ultimi 7 anni. Le serie sono calcolate riportando a zero il valore di spostamento di ogni punto all'inizio di ogni fase. La figura evidenzia l'evoluzione dei movimenti del suolo al di sopra dei reservoir di Cotignola; gli spostamenti massimi (sia positivi che negativi) sono distribuiti in prossimità del centro del Cluster-C (tra 3000 e 5000 m in ascissa) e ben descrivono i coni di sollevamento e subsidenza creati dalle attività di stoccaggio. Anche al di sopra del Cluster-B si notano (tra 7000 e 8000 m in ascissa) spostamenti positivi durante le fasi di iniezione e negativi durante quelle di erogazione, anche se di minore entità.

Relativamente all'ultima fase di iniezione tra aprile e settembre 2020 (curva nera con punti bianchi) si possono notare:



Figura 4.2: Mappa dei limiti di reservoir dei Cluster C e B; localizzazione del profilo CB (in blu) lungo il quale sono stati proiettati i bersagli radar (in bianco) che si distribuiscono attorno ad esso; il cerchio arancio al centro del Cluster-C evidenzia i bersagli radar di cui sono state analizzate le serie temporali mostrate in figura 4.5; i quadrati giallo, azzurro e viola evidenziano i bersagli radar le cui serie temporali orizzontali sono analizzate in figura 4.6.

- un sollevamento fino ad un massimo di +8 mm (a fronte di 27.5 Msmc iniettati) localizzato intorno al centro del Cluster-B;
- un sollevamento massimo di $\approx +16$ mm per un solo PS (a fronte di ≈ 220.5 MSmc iniettati) nella porzione orientale del cluster-C ed un sollevamento al centro del cluster tra + 8 e +15 mm (intorno a 4000 m in ascissa) con valori di sollevamento confrontabili, seppur leggermente ridotti a quelli dei precedenti periodi di iniezione.

Le deformazioni risultano meglio distribuite sul cluster C, in termini di forma e ampiezza; lungo il cluster B infatti si nota uno scatter dei valori che passano da negativi a positivi in maniera molto rapida. Per comprendere meglio questi aspetti, e per capire se gli spostamenti registrati siano correlati effettivamente all'andamento dei volumi nel Cluster-B, sono stati isolati i PS che mostrano maggiori deformazioni. Questi PS, localizzati nell'area sud-orientale del reservoir, sia interna che esterna ad esso (cerchio blu in fig. 4.1), si alzano fino a + 10 mm nell'ultimo semestre (un singolo PS) con un sollevamento medio dell'area compreso tra + 2 e + 6 mm. L'analisi delle loro serie temporali (Fig. 4.4) evidenzia come:

- l'ampiezza di tali oscillazioni rimanga abbastanza costante nel tempo;

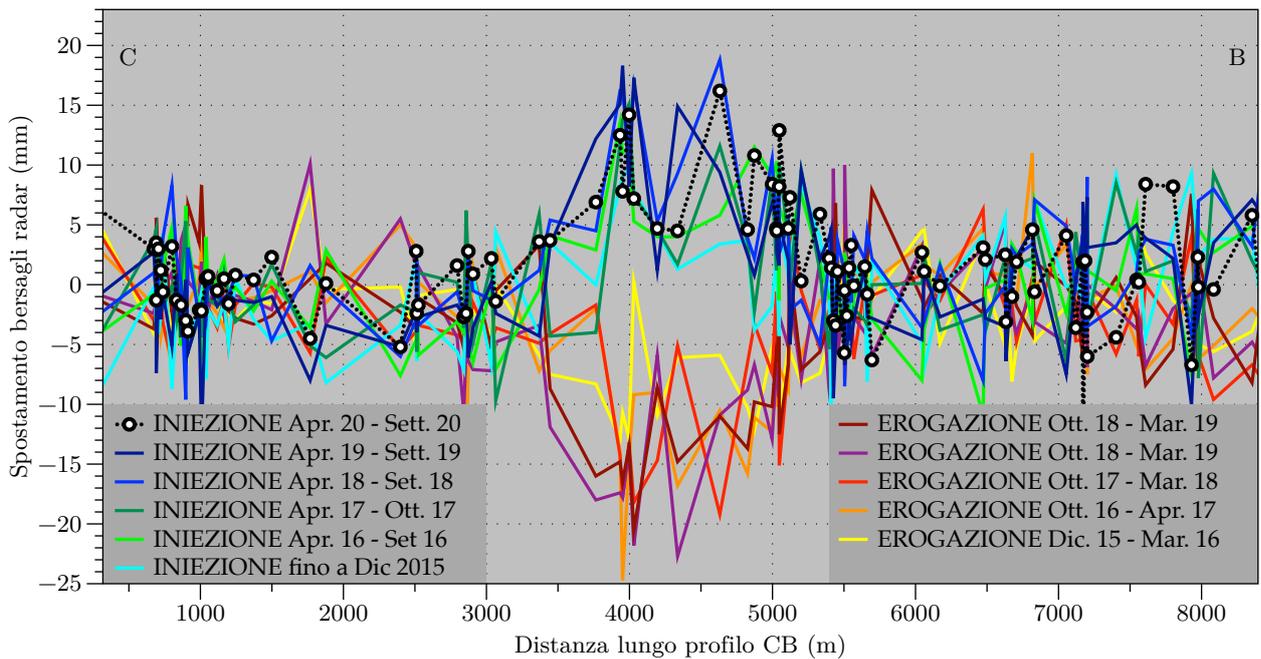


Figura 4.3: Profilo longitudinale di spostamento verticale ottenuto dai dati delle serie temporali Sentinel-1. Le curve del grafico sono costruite proiettando lungo il profilo CB, in blu nella mappa di figura 4.3, i valori di spostamento verticale dei bersagli radar (punti bianchi in mappa), che si distribuiscono nell'intorno del profilo stesso, rispetto al valore di spostamento di ogni punto all'inizio di ogni fase di movimentazione del gas; i valori in ascissa esprimono la distanza progressiva misurata lungo il profilo con origine a nord-ovest.

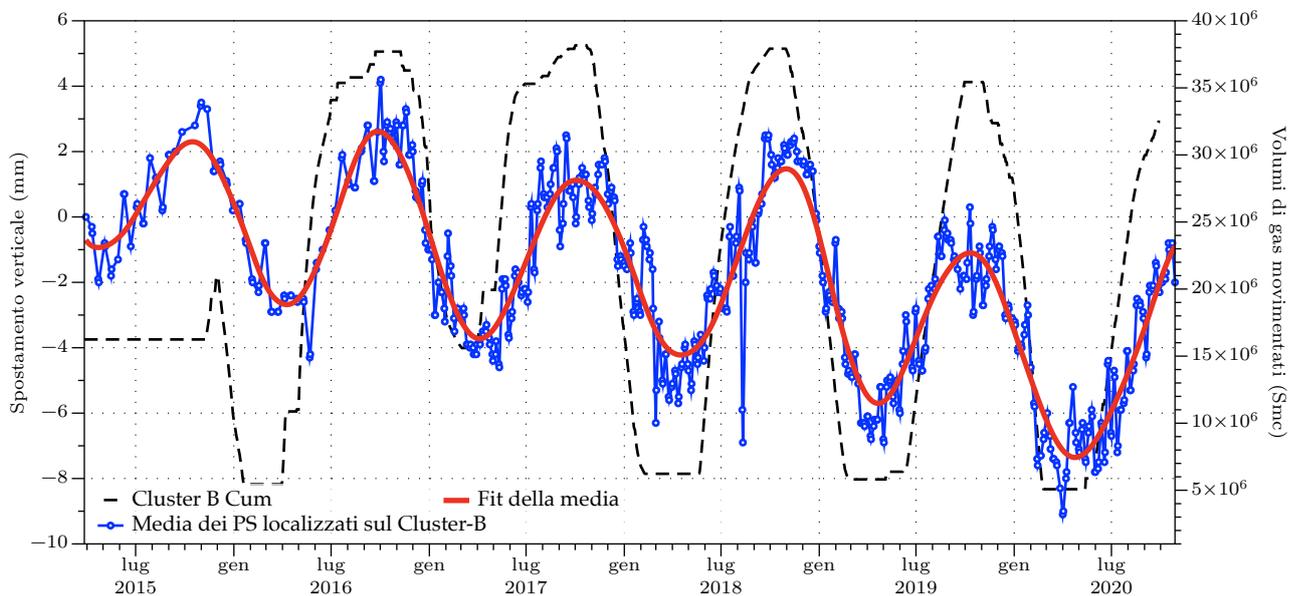


Figura 4.4: Serie temporali di spostamento verticale dei bersagli radar Sentinel-1 che hanno mostrato massimo abbassamento nel semestre ottobre - marzo 2020, nella zona sud-est del Cluster B; in blu la media degli spostamenti dei PS A3YW1DE, A3VWVC4, A41V7DW, A3WIAY1, A3VWVC3, A3WIAXV, A3YALRD, A43NI7D, A3X3QJS, A42GMZW, A40OC6U, A3YALR3; in rosso il fit della media.

- vi siano oscillazioni significative anche in periodi senza movimentazione di gas nel cluster B (ad es. tra marzo 2015 e gennaio 2016);
- l'ultima inversione di trend degli spostamenti precede di più di un mese il cambio di operatività dello stoccaggio (i PS iniziano a risalire prima della iniezione) suggerendo una non evidente influenza delle attività di sottosuolo.

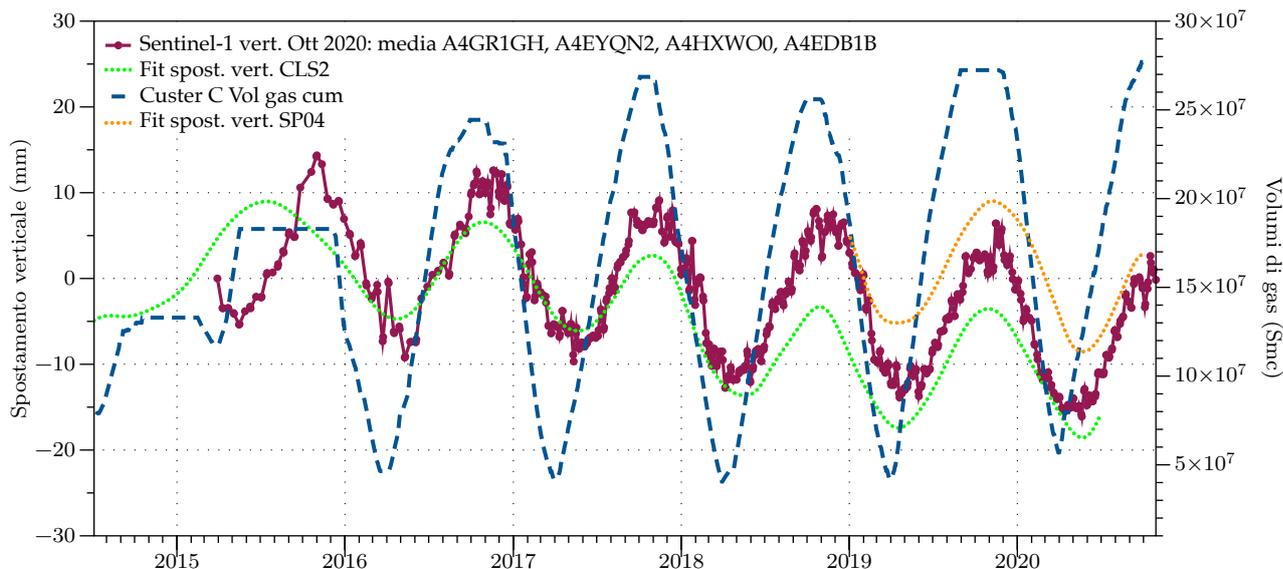


Figura 4.5: Confronto tra medie degli spostamenti verticali dei bersagli radar (mm) individuati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2), fit della serie GPS verticale CLS2 e volumi movimentati nel pool CC1.

Analizzando in figura 4.5 la serie temporale media dei bersagli radar localizzati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2) si può notare la correlazione tra i loro spostamenti ed i volumi di gas movimentati nel pool C; anche nell'ultimo semestre (come verificatosi già nell'iniezione apr-sett. 2019) l'inversione del trend di subsidenza in favore del sollevamento avviene verso la metà di maggio, dopo quasi un mese e mezzo dall'inizio della iniezione. Mediamente il sollevamento dei 4 PS posti al centro del Cluster-C ammonta a 15 mm. Tale andamento rispecchia quello già osservato in altri periodi di iniezione.

Le serie temporali di spostamento orizzontale (Fig. 4.6: spostamenti positivi verso est, negativi verso ovest) dei bersagli radar localizzati nel centro ed ai margini orientale ed occidentale del reservoir mostrano come:

- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona orientale (quadrato azzurro in Fig. 4.2) abbia valore positivo fino a $\approx +10$ mm, e descriva dunque un allontanamento dal centro del reservoir;

- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona occidentale (quadrato viola in Fig. 4.2) abbia valore negativo fino a ≈ -3 mm, e descriva dunque un allontanamento dal centro del reservoir;
- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona centrale a ridosso delle stazioni GPS CLS2 e SP04 (quadrato giallo in Fig. 4.2), poste leggermente a sud-ovest del centro del Cluster-C, abbia valori negativi fino a ≈ -5 mm, e descriva dunque un allontanamento dal centro del reservoir. Il trend inizia a invertirsi già nell'ultimo mese (dati Sentinel fino a 28/10/2020).

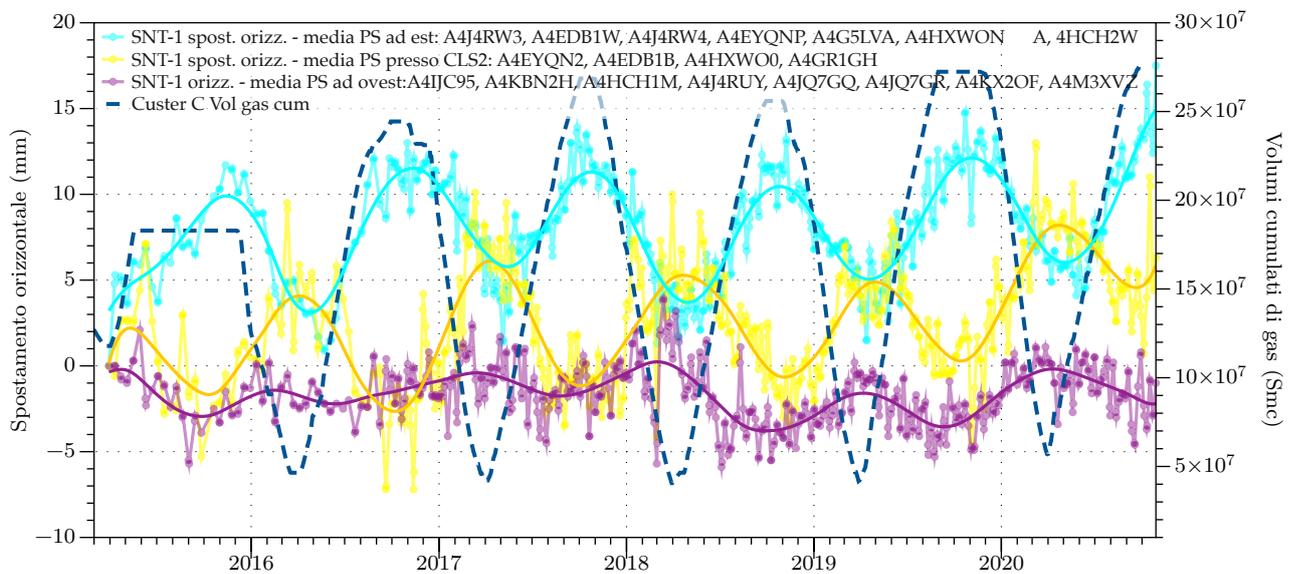


Figura 4.6: Confronto degli spostamenti orizzontali medi di gruppi di PS localizzati in zone ad est e ad ovest del centro del reservoir (box azzurro, giallo e viola in Fig. 4.2); in azzurro media degli spostamenti di PS situati ad est del centro; in giallo di PS a ridosso di CLS2; in viola di PS situati ad ovest del centro.

4.2 Analisi delle serie interferometriche sul Cluster A in relazione alla movimentazione di gas

Le serie temporali analizzate da TRE ALTAMIRA ed aggiornate al 28/10/20 evidenziano nell'area del giacimento di San Potito la presenza di movimenti differenziali di entità molto limitata, con velocità medie contenute entro pochi mm/anno. Esse sono state ulteriormente elaborate per meglio definire e visualizzare i trend di deformazione nell'intorno dell'impianto di stoccaggio di San Potito, Cluster-A.

La superficie che interpola gli spostamenti verticali subiti dai bersagli radar durante i 6 mesi della fase di iniezione 2020 nel Cluster-A (≈ 65.5 MSmc, Fig. 4.7), mostra le deformazioni del terreno nell'area del reservoir. La stima della variabile Z (spostamento verticale nel semestre di iniezione) è stata effettuata in corrispondenza dei nodi di una griglia rettangolare di dimensioni pari a 53×23 , con nodi distanti 200 m. Dal momento che la variabile non presenta trend, tale stima è stata effettuata ricorrendo alla tecnica del Kriging stazionario, ed utilizzando un modello di variogramma lineare. Il risultato dell'interpolazione elimina i massimi di deformazione raggiunti da singoli PS (si vedano figs 4.10 - 4.11), descrivendo una deformazione mediata del terreno, ma sicuramente più omogenea e realistica.

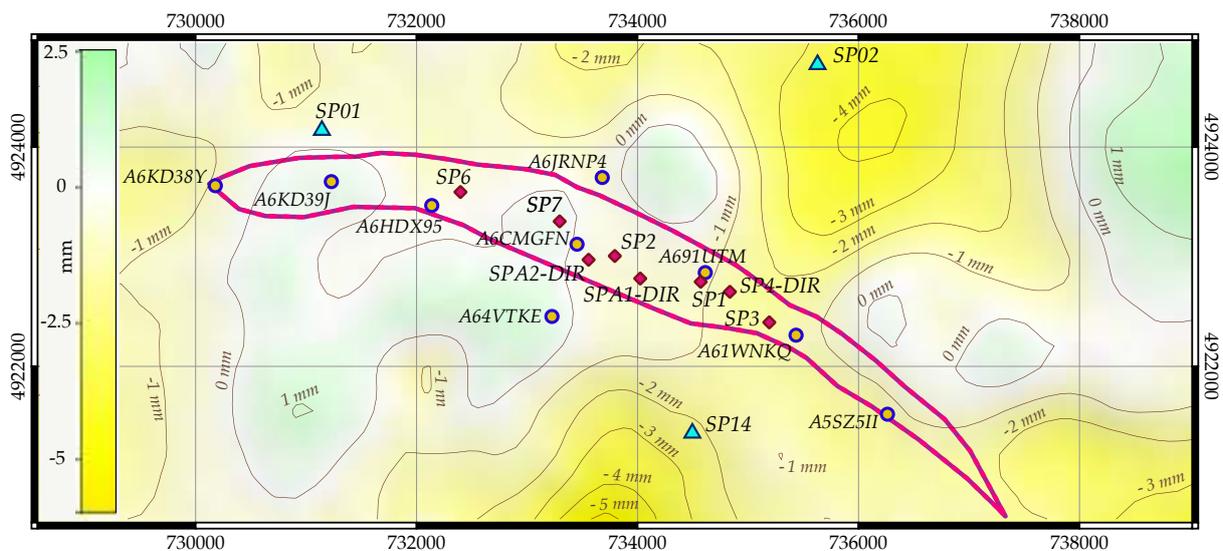


Figura 4.7: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di iniezione tra maggio e settembre 2020 (esagerazione verticale 1000x).

Così come operato per i Cluster B e C a Cotignola, vengono qui di seguito proposte due tipologie di analisi del dato interferometrico:

- 1) la proiezione dei valori di spostamento (avvenuti tra l'inizio e la fine di ciascuna delle fasi di iniezione ed erogazione dello stoccaggio) dei 9 bersagli radar scelti come punti di controllo per la modellazione

geomeccanica, proiettati lungo 2 sezioni (CC' e DD' in figura 4.8), che permettono di visualizzare e controllare l'entità delle deformazioni in tutte le aree del reservoir.

- 2) l'analisi della serie temporali dei PS A6CMGFN, A6DTBN9 e A67UZLK individuati a ridosso del pozzo direzionato San Potito A2-DIR (cerchio arancio nella mappa di Fig. 4.8), perforato sulla culminazione strutturale del reservoir di San Potito.

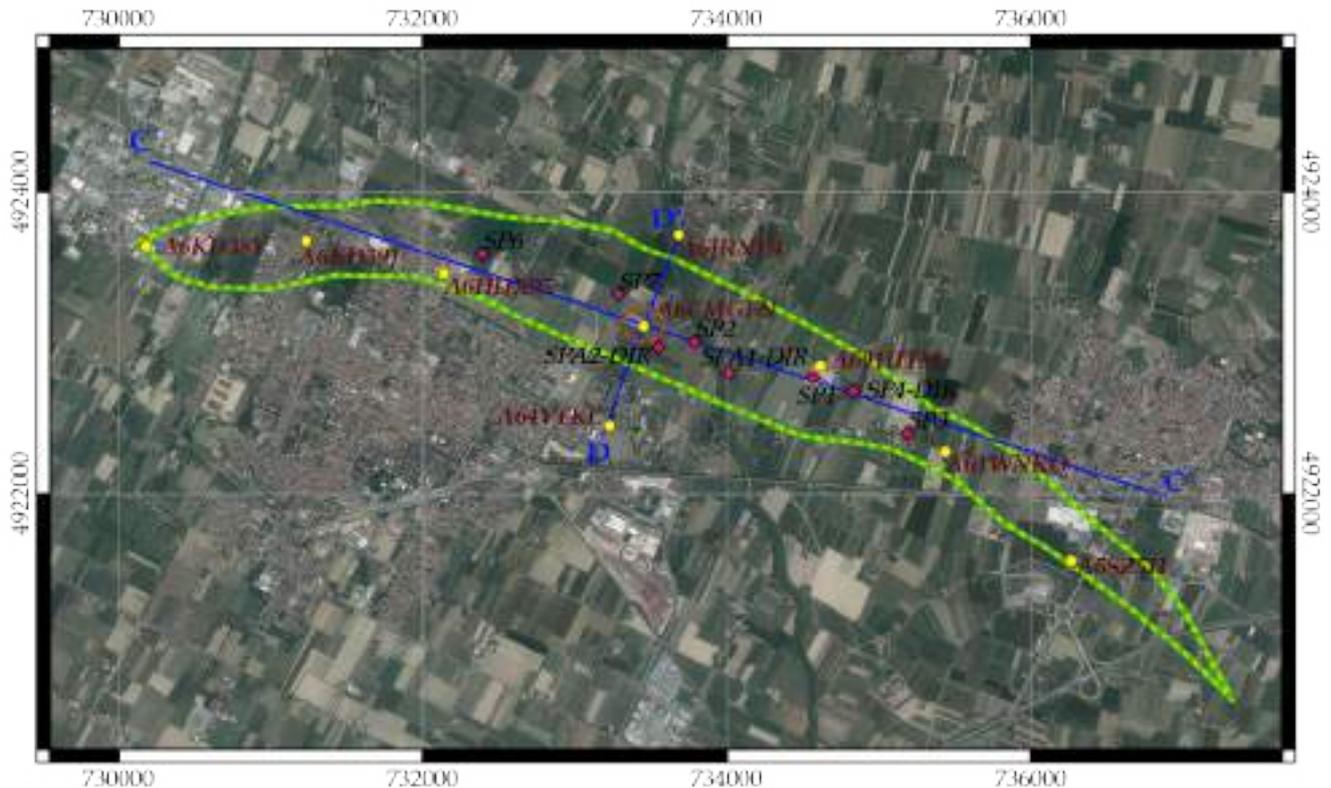


Figura 4.8: Mappa della proiezione in superficie del top del giacimento di San Potito, con la posizione dei fondo pozzo, in fucsia; in giallo i bersagli radar della serie Sentinel-1 aggiornata al 28/10/20, i cui spostamenti sono stati proiettati lungo i profili CC' e DD' per creare le figure 4.9 e 4.10: essi sono 9 dei 12 bersagli utilizzati come punti di controllo nella modellizzazione geomeccanica dell'area di San Potito; il cerchio arancio delimita i bersagli radar analizzati in figura 4.11.

Le figure 4.9 e 4.10 analizzano il comportamento dei 9 bersagli radar scelti come riferimento per la modellazione geomeccanica. Dalle figure 4.9 e 4.10 si può osservare come, durante le fasi di iniezione ed erogazione analizzate, gli spostamenti dei 9 bersagli radar della serie Sentinel-1 proiettati lungo i profili CC' e DD', abbiano mediamente valori contenuti entro i 5 - 6 mm tra una fase e l'altra (sia in positivo, che in negativo).

Il PS A6HDX95, posizionato a ≈ 2070 m lungo il profilo CC', continua ad essere (vedi precedente documento "Report14004COT01-GEOPH-EDIS0-DV16-REV01") quello più stabile con variazioni di quota topografica contenute tra + 1 e - 2 mm avvenute durante ciascuna fase di stoccaggio (Fig. 4.9).

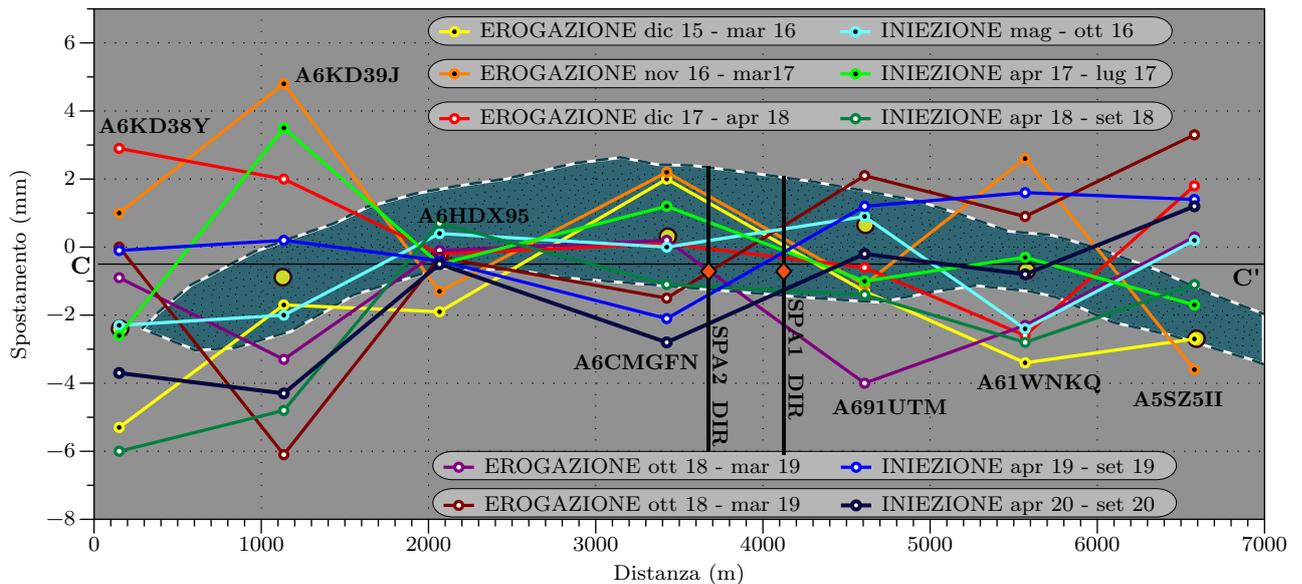


Figura 4.9: Spostamenti di 7 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione CC' (mappa di Fig. 4.8); in azzurro verde e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in giallo - bordeaux quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee nere localizzano i pozzi San Potito A1-DIR e A2-DIR. In color ottanio l'area del reservoir messa in pianta per visualizzare la posizione dei 9 bersagli rispetto ad essa: la mappa e la posizione dei bersagli di riferimento (punti giallo/bordeaux) sono ruotate di pochi gradi verso NW per sovrapporre la sezione CC' all'asse delle ascisse della figura.

Il PS A6CMGFN, posto nella porzione più centrale del campo (Figs. 4.9 e 4.10), mostra spostamenti massimi tra + 2 e - 3 mm, avvenuti durante fasi di iniezione e di erogazione. Tali spostamenti non appaiono però influenzati dall'attività di stoccaggio in maniera univoca, non coincidendo sempre la risposta attesa rispetto al tipo di fase di movimentazione di gas: in alcuni periodi A6CMGFN va infatti in subsidenza durante la fase di iniezione (vedi l'ultimo semestre analizzato) ed in uplift in fase erogazione.

Anche tutti gli altri 7 PS non mostrano una evidente corrispondenza tra la tipologia di fase di stoccaggio ed il tipo di spostamento avvenuto, con sollevamento e subsidenza che avvengono entrambi sia durante l'erogazione che durante l'iniezione, con entità comprese tra $\approx + 4$ e - 6 mm.

Osservando l'andamento della serie temporale media dei bersagli radar A6CMGFN, A6DTBN9 e A67UZLK, i tre PS più adiacenti al pozzo San Potito A2 DIR, sulla culminazione strutturale del Cluster-A (Fig. 4.11), si riscontra un trend generale di lievissima subsidenza (- 1 mm/anno) nella serie degli spostamenti verticali ed oscillazioni quasi mai in accordo con la movimentazione di gas nel reservoir, sebbene siano stati movimentati dei volumi non trascurabili (ad es. $\approx - 65.5$ milioni di Smc iniettati in questo semestre). Nel semestre in esame, i bersagli radar A6CMGFN, A6DTBN9 e A67UZLK si sollevano invece di appena 1 mm. Non si evidenziano altre dinamiche degne di ulteriori approfondimenti.

Nel semestre in esame gli spostamenti verticali registrati nell'area di San Potito risultano dunque non correlabili con la movimentazione di gas operata nel giacimento, né in termini spaziali, né temporali.

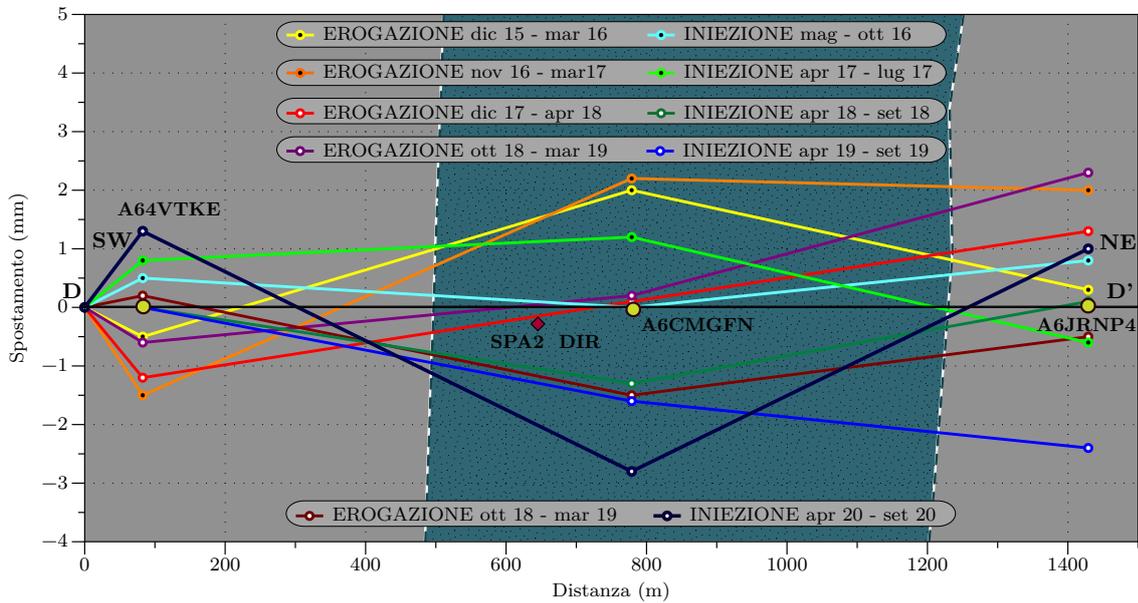


Figura 4.10: Spostamenti di 3 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione DD' (mappa di Fig. 4.8); in azzurro, verde e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in giallo - bordeaux quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. In color ottanio l'area del reservoir messa in pianta per visualizzare la posizione dei 9 bersagli rispetto ad essa: la mappa e la posizione dei bersagli di riferimento (in giallo/bordeaux) sono ruotate di ≈ 70 gradi verso E, per sovrapporre la sezione DD' all'asse delle ascisse della figura.

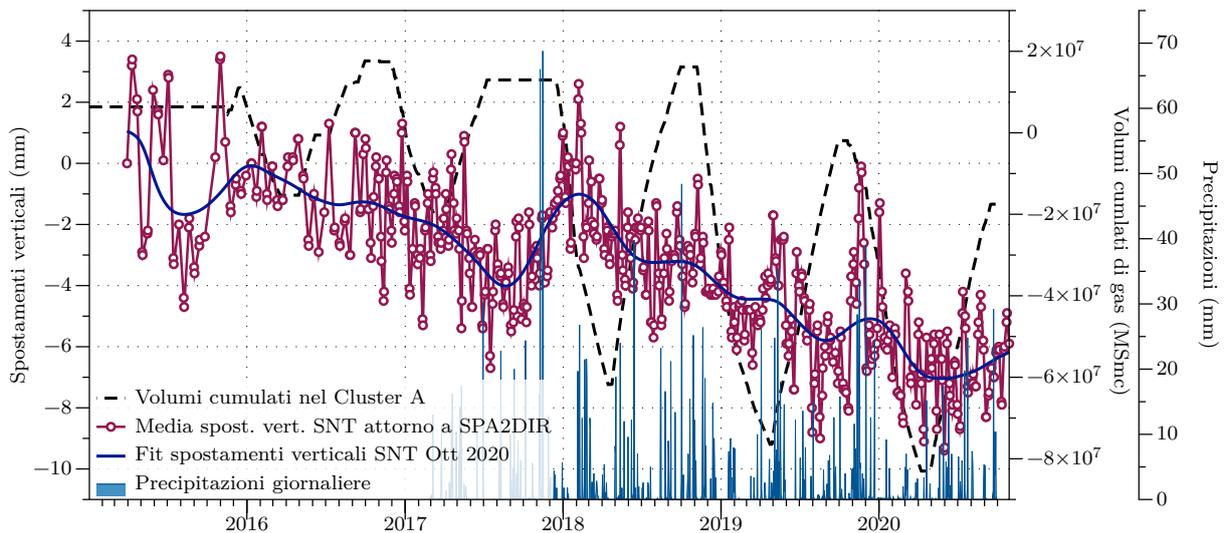


Figura 4.11: Serie temporale di spostamento medio tra i tre bersagli radar A6CMGFN, A6DTBN9 e A67UZLK adiacenti al pozzo San Potito A2 DIR (cerchio arancio in figura 4.8), al di sopra della culminazione strutturale del giacimento, in relazione alla movimentazione di gas ed alle precipitazioni.

5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas

Il comportamento degli strumenti profondi, in relazione alla movimentazione di gas nello stoccaggio durante l'ultimo semestre monitorato, viene descritto nelle figure 5.1 e 5.2.

Si evidenzia il trend di sollevamento delle quote del piezometro profondo insieme all'andamento dei volumi

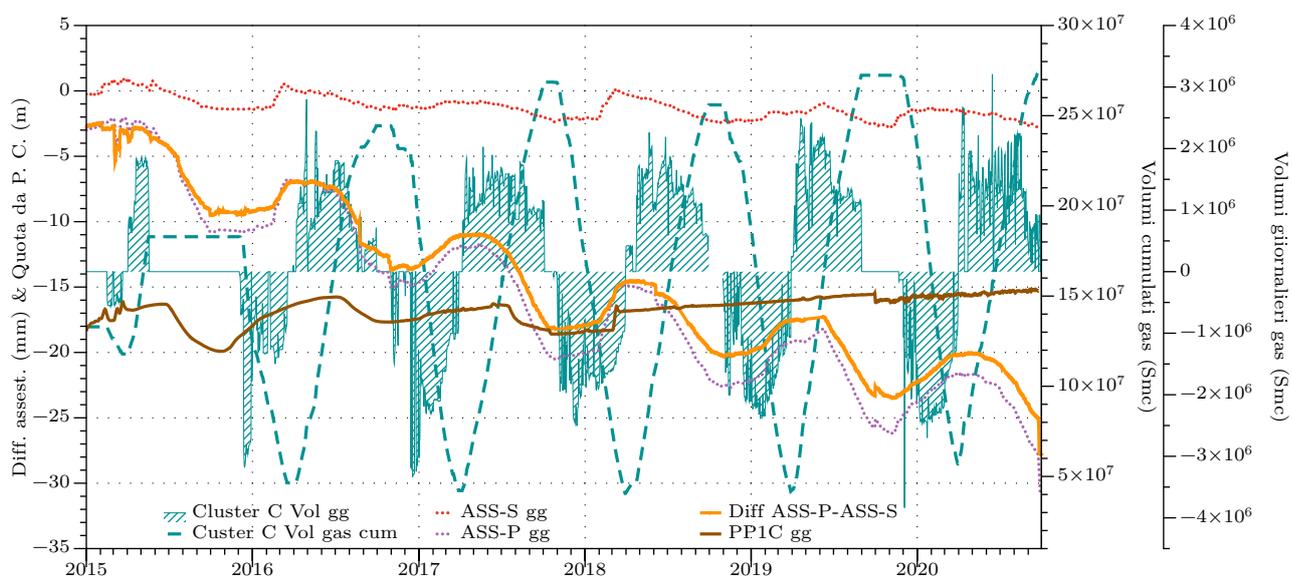


Figura 5.1: Andamento degli strumenti profondi in relazione alla movimentazione di gas nel reservoir del Cluster-C per tutto il periodo di monitoraggio. In arancio la curva che descrive la componente profonda della deformazione, ottenuta dalla differenza degli spostamenti di ASS-P meno quelli di ASS-S.

movimentati, senza però riscontrare una netta correlazione tra le due variabili investigate. Nel semestre in esame (come osservato già in precedenza) la quota del piezometro non mostra il classico andamento registrato nei semestri precedenti; la quota piezometrica risale in maniera costante. Più in generale, negli ultimi due anni e mezzo, a partire da marzo 2018, l'andamento delle quote piezometriche non compie il "consueto" abbassamento a partire da luglio e la successiva risalita nei mesi invernali. Questa variazione non appare correlata all'andamento dei volumi nel cluster (le quote dovrebbero risentire della variazione delle fasi di iniezione ed erogazione). Un intervento di spurgo e manutenzione del piezometro profondo è stato effettuato in data 24 settembre 2020, nel prosieguo del monitoraggio si potrà meglio appurare se la strumentazione tornerà a descrivere le oscillazioni di quota (variazioni di pressione nell'acquifero) descritte fino al 2018.

In questo semestre, non si evidenziano sostanziali variazioni riguardo la compattazione complessiva dei sedimenti profondi fino a 350 m, il cui tasso rimane di ≈ -3.8 mm/anno (curva arancio in Fig. 5.1: risalita della curva = dilatazione, discesa della curva = compattazione). Si osserva nel semestre un trend di compattazione inversamente correlato all'andamento dei volumi nel cluster, che mostra oscillazioni di ampiezza confrontabili

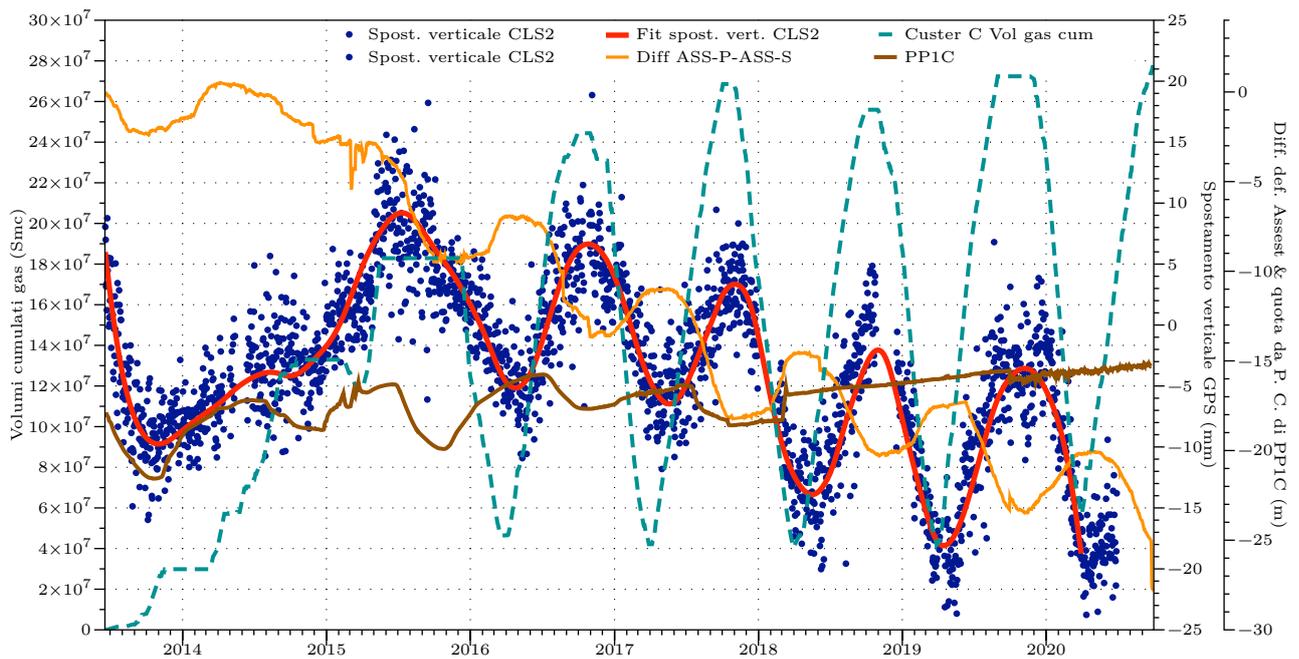


Figura 5.2: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS (componente verticale) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con l'andamento del piezometro profondo e con quello della differenza tra le misure degli assestimetri.

con gli intervalli già misurati per i precedenti semestri di monitoraggio. Le oscillazioni non mostrano una chiara proporzionalità tra la loro ampiezza ed il quantitativo di gas movimentato nello stoccaggio, ma meglio si correlano alle dinamiche idrogeologiche stagionali della colonna di sedimenti investigata. A suggerimento di questa miglior correlazione, si può notare come nel 2015 si sia avuta una compattazione estiva di entità analoga a quella degli altri anni, seppur in assenza di movimentazione di gas.

Anche nel semestre in esame, gli andamenti verticali delle serie GPS CLS2 (punti blu e linea rossa in figura 5.2,) e SP04 (tratteggio arancio in figura 5.3), seguono i cambi di attività dello stoccaggio (iniezione/erogazione). Da aprile a fine settembre 2020, la stazione SP04 registra un sollevamento medio di $\approx + 11$ mm a fronte dell'iniezione di ≈ 220.5 Msmc dal Cluster-C. Questo sollevamento risulta leggermente minore rispetto a quelli osservati in altre fasi di iniezione e conferma quindi una assenza di proporzionalità tra quantitativi di gas movimentati ed ampiezza dei sollevamenti/abbassamenti registrati dalla componente verticale dei GPS sul Cluster-C.

Va inoltre evidenziato come, sebbene le oscillazioni di CLS2 rimangano di entità costante nel tempo, a partire dal 2016 si evidenzia un generale trend di subsidenza della stazione con velocità che arrivano a $\approx - 3.5$ mm/anno, valore confrontabile coi valori di subsidenza naturale misurati nell'area regionale in esame.

Il confronto tra l'andamento del dato GPS e le serie InSAR evidenzia un buon accordo tra gli spostamenti

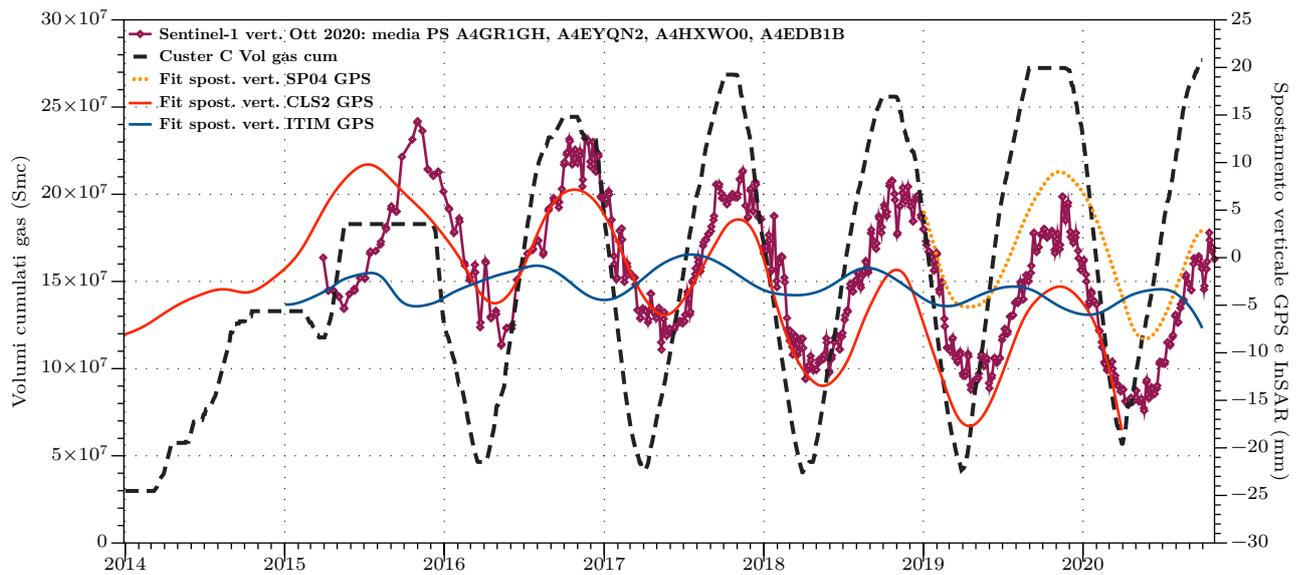


Figura 5.3: Confronto tra la serie temporale degli spostamenti della stazione GPS (componente verticale) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con la serie Sentinel-1 al 30 settembre 2020 e con la serie temporale GPS della stazione ITIM.

registrati tramite le due tecniche di monitoraggio, sempre in linea con la movimentazione di gas a partire dal 2016. L'analisi dei PS intorno alla stazione GPS CLS2 mostra valori di sostanziale accordo tra le 2 tecniche:

- l'antenna GPS registra un movimento medio di + 11 mm nel semestre;
- i valori di spostamento verticale mediati per i PS posti al centro del cluster-C descrivono un sollevamento intorno a + 14 mm.
- a partire dal 2016 (pieno regime dello stoccaggio) la serie Sentinel-1 evidenzia un complessivo andamento di subsidenza (- 2.3 mm/anno) che si discosta di poco dalla serie GPS (\approx - 3.5 mm/anno, negli ultimi 4 anni)

Solo 2 delle serie temporali delle 3 stazioni GNSS a singola frequenza posizionate sui Cluster-A, B e C. mostrano trend di spostamento in accordo con le serie interferometriche e con la stazione a doppia frequenza CLS2. La serie temporale di SP04 mostra un buon accordo con l'entità degli spostamenti della serie media dei 4 PS al individuati al centro del Cluster-C, e con i tempi dei cicli di stoccaggio (Figs 5.2 e 5.3). La serie temporale GPS di SP05, mostra un sostanziale accordo con l'andamento della serie temporale del PS A4DRVH2 (localizzato a \approx 25 metri da essa) sia per il trend che per l'entità degli spostamenti misurati. La serie InSAR misura una subsidenza con valori massimi di \approx - 4 mm nel semestre di monitoraggio, mentre la serie GPS misura \approx - 1 mm (Fig. 5.5). La serie temporale di SP01, non mostra invece accordo né con l'andamento della

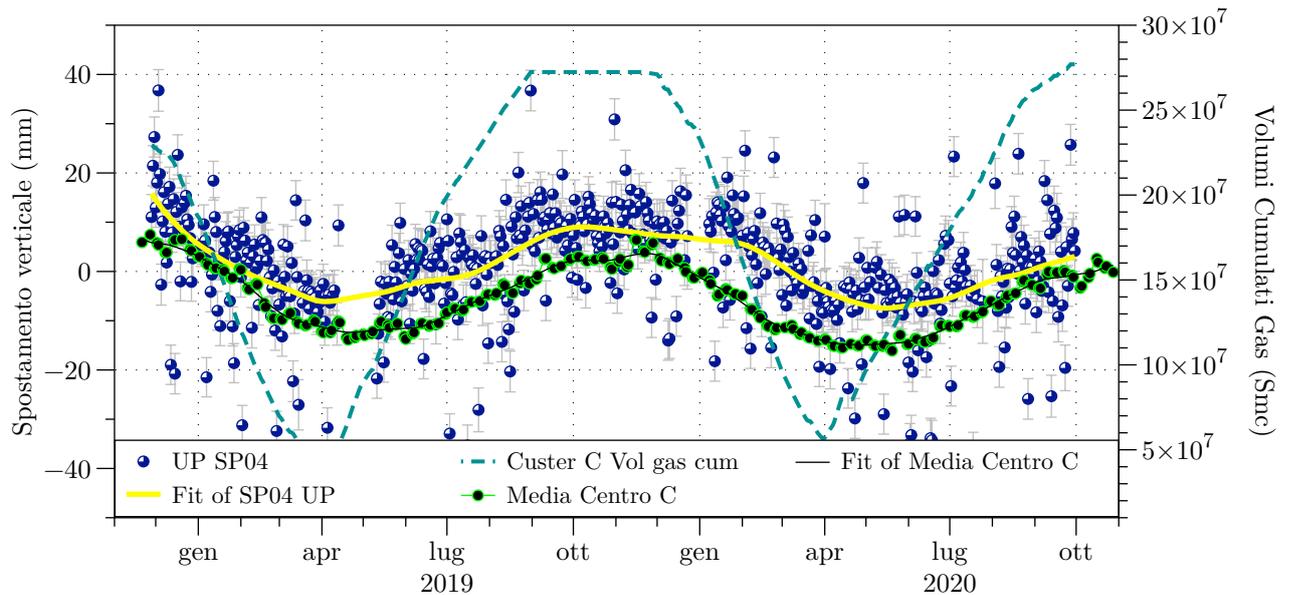


Figura 5.4: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP04 (componente verticale, da cui è stato rimosso il moto di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-C e con le serie Sentinel-1 (media dei 4 punti al centro del Cluster-C), al 30 settembre 2020.

serie temporale dei PS B7EUW5G (localizzato a ≈ 49 metri da essa) e A6QBFBE (posizionato a ≈ 220 metri da essa), né con le fasi della movimentazione di gas nello stoccaggio. In fase di iniezione SP01 si abbassa di ≈ -10 mm con trend regolare tra aprile e settembre 2020, mentre entrambi i PS hanno descritto un'oscillazione con valori contenuti tra ± 2 mm.

Nel caso delle serie interferometriche l'ampiezza del sollevamento non si discosta in maniera significativa da quelle già osservate per altri periodi di erogazione, così come per i dati GPS.

Allo stato attuale del monitoraggio, non è verificata una proporzionalità tra quantitativo di gas movimentato e abbassamenti/sollevamenti registrati tramite interferometria.

Così come nei semestri precedenti, le componenti orizzontali di spostamento GPS evidenziano una buona correlazione con la attività di iniezione/estrazione nel Cluster-C (Fig. 5.7): essi quantificano in maniera più significativa, rispetto alla componente verticale, l'effetto subito dalle stazioni CLS2 e SP04 a seguito della movimentazione di gas, poiché quasi non affetti da oscillazioni legate alla stagionalità. Nel semestre in esame, sulla base dei dati di SP04, si verifica uno spostamento negativo sia lungo la componente Est (≈ -9 mm) che lungo quella Nord (≈ -3 mm): la composizione di tale moto restituisce uno spostamento che allontana la stazione dal centro del Cluster-C di 9.5 mm in direzione ovest-sud-ovest. Tale allontanamento viene registrato anche dai bersagli radar Sentinel-1 individuati attorno alla stazione CLS2 (Fig. 4.6, paragrafo 4.1): come si

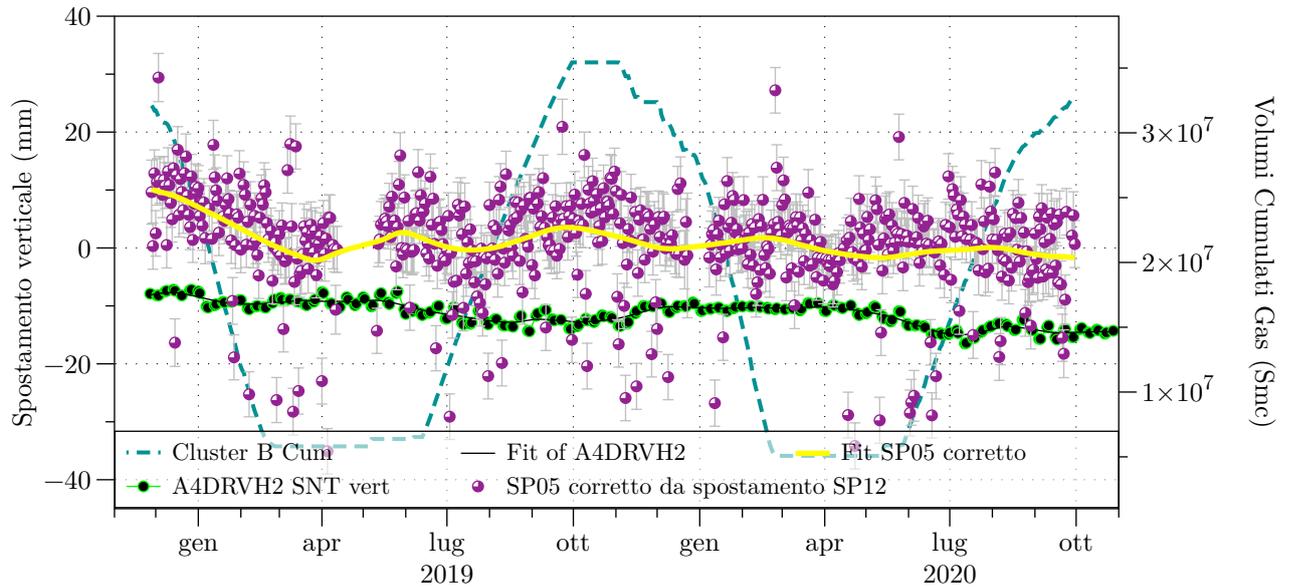


Figura 5.5: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP05 (componente verticale, corretta rispetto agli spostamenti di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-B e con la serie verticale Sentinel-1 del PS A4DRVH2 posizionato a ≈ 25 m da essa, al 30 settembre 2020.

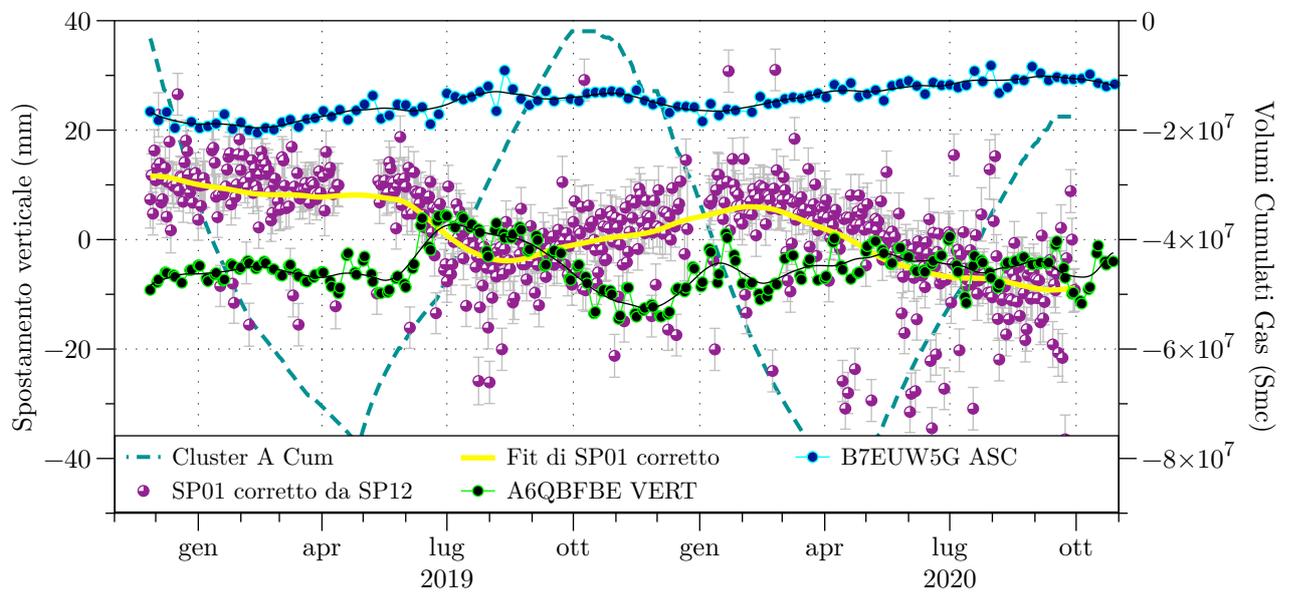


Figura 5.6: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP01 (componente verticale, corretta rispetto agli spostamenti di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-A e con le serie Sentinel-1 ascendente (PS B7EUW5G posizionato a ≈ 49 m da SP01) e verticale (PS A6QBFBE posizionato a 220 m) al 30 settembre 2020.

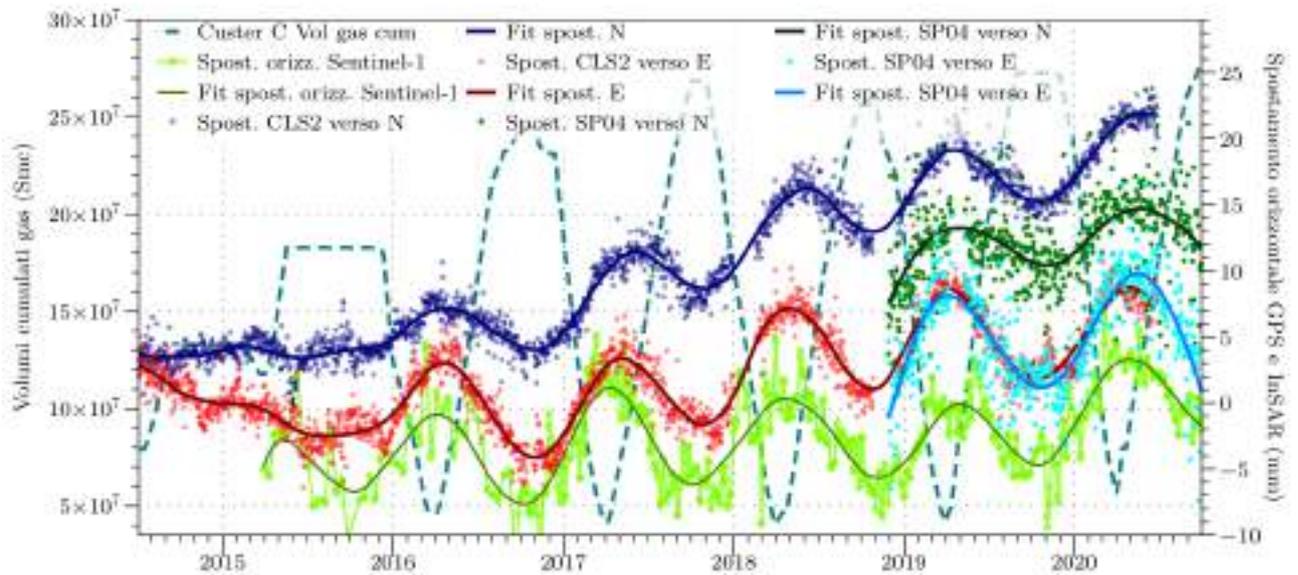


Figura 5.7: Confronto tra la serie temporali delle posizioni GPS orizzontali delle stazioni CLS2 e SP04 con la movimentazione di gas nel Cluster-C. Gli spostamenti sono riferiti alla placca Adria, allo scopo di eliminare la componente crostale del moto; in rosso la componente est e in blu la componente nord di CLS2; in azzurro la componente est di SP04, e in verde scuro la sua componente nord; in verde chiaro lo spostamento orizzontale medio dei bersagli radar Sentinel-1 limitrofi alla stazione CLS2.

vede in figura 5.7, la serie temporale di spostamento orizzontale Sentinel-1 (curva verde e fit verde) ha infatti andamento che negli ultimi 3 anni mima quasi esattamente la componente est delle serie GPS (punti rossi e curva fit rossa).

6 Conclusioni

A fine settembre 2020, la strumentazione installata presso il Cluster-C continua ad essere funzionante. Da segnalare un non corretto funzionamento del piezometro profondo: il 24 settembre 2020 è stato effettuato un lavoro di manutenzione sullo strumento.

Dal Cluster A sono stati erogati ≈ 2.45 MSmc nel periodo 1 - 9/4/2020; successivamente sono stati iniettati ≈ 65.5 MSmc tra il 29/4 ed il 17/9/2020.

Nel Cluster B sono stati iniettati ≈ 27.4 Msmc tra il 14/5 ed il 27/9/2020.

Nel Cluster C sono stati iniettati complessivamente ≈ 220.5 Msmc, tra il 1/4 ed il 28/9/2020.

La stazione GPS (CLS2) ha qualità del dato (valori di MP1 e MP2) sufficiente ad essere considerata attendibile, in linea con quanto indicato dall'IGS per una stazione di buona qualità, ed è in grado di fornire risultati da considerare significativi, data la lunghezza raggiunta dalla sua serie temporale (7 anni). La stima della componente verticale degli spostamenti della serie GPS restituisce valori con velocità media in abbassamento di ≈ -1.145 mm/anno, da inizio monitoraggio, con trend più evidente a partire dal 2015. Negli ultimi 3.5 anni si assiste infatti ad una accelerazione della subsidenza, attestata a ≈ -3.5 mm/anno. Poiché il dato di CLS2 si interrompe a fine giugno 2020, la deformazione del suolo al centro del Cluster da luglio a fine settembre viene descritta dalla stazione a singola frequenza SP04 (posizionata a ≈ 40 m da CLS2) la cui intera serie temporale di spostamento ben si accorda con quella di CLS2 (cap. 2.1, Fig. 2.14). Gli spostamenti nella componente verticale di CLS2 ed SP04 mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2020 ($\approx +11$ mm in media); tuttavia i valori delle oscillazioni osservate nel semestre non si discostano significativamente da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni annuali/stagionali legati principalmente alle dinamiche del carico idrologico superficiale (periodi antecedenti dicembre 2015). Le serie temporali delle componenti orizzontali di CLS2 ed SP04 si correlano anch'esse con l'attività di iniezione, registrando uno spostamento verso ovest-sud-ovest di ≈ 9.5 mm (-9 mm E; -3 mm N), in allontanamento dal centro del Pool CC1 (Cluster-C).

La nuova stazione GNSS SP12 funziona da 22 mesi ed anche i suoi valori di MP1 e MP2 sono in linea con gli standard IGS di una stazione di buona qualità. SP12 potrà dare risultati significativi dopo un periodo di registrazione dei dati di almeno 2.5 anni, lunghezza della serie temporale ritenuta necessaria dalla comunità scientifica per ottenere una stima realistica delle velocità medie di spostamento attese localmente.

Tuttavia, anche nel periodo in esame (aprile - settembre 2020), e precisamente nei mesi di luglio e agosto, SP12 subisce un rapido spostamento verso est di ≈ 12 mm (17 nell'intero semestre), con un contemporaneo, ma regolare abbassamento di ≈ -14 mm, in linea con quanto già avvenuto nella primavera - estate del 2019. Il rapido e marcato spostamento di SP12 nella componente est, inatteso per una stazione ritenuta stabile, influenza l'an-

damento delle serie temporali di spostamento delle stazioni a singola frequenza, calcolate relativamente ad essa. Le stazioni rover GNSS a singola frequenza, anch'esse attive da 22 mesi, hanno, tra agosto e settembre 2020, un trend speculare e inverso rispetto a SP12, che descrive un rapido innalzamento verso ovest: tale movimento è stato considerato e rimosso per meglio confrontare gli spostamenti GPS con gli altri dati di monitoraggio.

All'interno del Cluster-C, sopra il centro del giacimento, la media tra le serie temporali di interferometria (aggiornate all'intervallo temporale 30/03/2015 - 28/10/2020, satellite Sentinel-1) dei PS qui localizzati, evidenzia per il semestre in esame un sollevamento verticale fino a + 16 mm. La componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia spostamenti orizzontali che "allontanano" i PS dal centro del Cluster-C (≈ 5 mm per punti posti a ridosso della stazione GPS CLS2, 3 mm da per i punti situati nella zona occidentale, 10 mm per quelli localizzati nella zona orientale del cluster).

I dati di interferometria ben si correlano con i trend delle misurazioni delle antenne GPS installate sul Cluster-C, sia per la sincronia con cui avvengono i cambi di tendenza, sia per l'entità degli spostamenti misurati. I dati di deformazione del suolo sul Cluster-C pertanto evidenziano una correlazione temporale tra spostamenti in sollevamento/abbassamento del suolo e la movimentazione di gas nel sottosuolo; non vi è però una altrettanto chiara proporzionalità diretta tra le entità degli spostamenti del suolo che le curve descrivono ed i quantitativi di gas movimentati.

Sul Cluster-B, in concomitanza con l'attività di iniezione dell'ultimo semestre (aprile - settembre 2020) si osserva una area in sollevamento con valori medi tra i + 2 e + 6 mm (fino a + 8 esternamente ai limiti del campo), localizzata nella parte centrale e sud-orientale del reservoir. Al momento, si esclude però una evidente correlazione causa-effetto tra movimentazione del gas e deformazione, in quanto le oscillazioni della superficie topografica "anticipano" di circa un mese e mezzo le variazioni di volume di gas nel Cluster B. Le componenti orizzontali non evidenziano trend deformativi riconducibili alle attività di movimentazione gas su questo cluster.

Sul Cluster-A sono state evidenziate deformazioni geodetiche medie contenute entro i $\pm 5 - 6$ mm, non correlabili con la fase di iniezione in esame, né in termini di tempo, né di distribuzione nello spazio. Sulla culminazione strutturale del reservoir, nei pressi del pozzo SP2DIR, i bersagli radar registrano nel semestre aprile - settembre 2020 un abbassamento lieve delle quote, in controtendenza con l'iniezione di gas, ed in maggiore accordo con le variabili idrogeologiche (compattazione estiva).

Gli assestimetri ed i piezometri installati continuano a monitorare in modo efficiente le deformazioni poroelastiche nei primi 350 m di sottosuolo. Le deformazioni registrate dall'assestimetro superficiale vengono ottimamente correlate alle oscillazioni piezometriche superficiali e intermedie, suggerendo che le componenti superficiali e di media-profondità continuano ad essere influenzate principalmente dalle precipitazioni, dalle temperature e dalla circolazione idrica negli acquiferi.

I 2 strumenti installati nei primi 350 metri di sottosuolo (ASS-P e PP1C) non evidenziano una relazione chiara tra le deformazioni da essi registrate e la movimentazione di gas.

L'andamento dell'assestometro profondo continua a registrare una compattazione a ritmo di quasi 4 mm/anno. Le compattazioni/dilatazioni registrate lungo l'assestometro profondo si verificano in controtendenza rispetto agli abbassamenti/sollevamenti registrati tramite GPS/Insar: ad esempio le compattazioni estive registrate si verificano contestualmente ai sollevamenti dell'antenna GPS (che registra la somma di tutte le deformazioni del sottosuolo, anche ben oltre i 350 m investigati dall'assestometro). In questa dinamica non si deriva una correlazione tra l'entità delle deformazioni dell'assestometro ed i volumi di gas movimentati nel campo. La ciclicità delle deformazioni dello strumento si correla meglio alle dinamiche idrogeologiche stagionali della colonna di sedimenti investigata.

L'andamento generale delle quote dal piano campagna del piezometro profondo conferma il trend di risalita finora osservato. Nel periodo finale del monitoraggio (24 settembre 2020) si segnala un intervento di spurgo e manutenzione effettuato dalla ditta installatrice e gestrice dei dati. Negli ultimi due anni e mezzo di monitoraggio, il piezometro profondo ha avuto un comportamento anomalo: non si è registrato l'abbassamento di quota estivo (che nei precedenti anni si è verificato nel mese di luglio), ma si è avuto un costante innalzamento a partire da metà marzo 2018 fino al 30 settembre 2020; tale innalzamento ha andamento rettilineo e non sinusoidale come negli anni precedenti. Questo andamento risulta chiaramente non correlato alla movimentazione di gas, dal momento che nell'ultimo anno di esercizio a pieno regime dello stoccaggio non vi sono state variazioni di quota ed inversioni di trend dello strumento (come negli anni precedenti). Il segnale deformativo può essere inoltre affetto, in maniera più o meno importante e discriminabile, da altre variabili, quali l'emungimento di acqua da acquiferi intermedi a quelli monitorati e la naturale compattazione dello spessore di sedimenti alluvionali in cui sono installati i due strumenti.

Bibliografia

- Blewitt, G., and D. Lavallee (2002), Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107(B7), 2145, doi:10.1029/2001JB000570.
- Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky. "Introduction to gamit/globk." Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts (2010).
- Serpelloni, E., G. Vannucci, L. Anderlini, and R. A. Bennett (2016), Kinematics, seismotectonics and seismic potential of the eastern sector of the European Alps from GPS and seismic deformation data, *Tectonophysics*, 688(C), 157-181, doi:10.1016/j.tecto.2016.09.026.



Vaclavovic P, Dousa J (2016), G-Nut/Anubis - open-source tool for multi-GNSS data monitoring *In: IAG Symposia Series, Springer*, Vol. 143, pp. 775-782, doi:10.1007/1345_2015_157.