

SUBSURFACE
GEOLOGY AND
GEOPHYSICS

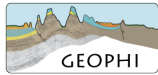


**Analisi integrata delle misure di deformazione superficiale
allo scopo di analizzare i fenomeni di subsidenza dell'area
di San Potito - Cotignola
Aggiornamento a Marzo 2019**

Redatto da A. Ponza ed F. L. Guido

verificato da Vincenzo Picotti

Bologna 6 maggio 2019



Indice

Executive Summary	3
1 Attività di stoccaggio dal 1 ottobre al 31 marzo 2019	6
2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 marzo 2019	9
2.1 Quality check	9
2.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni	11
3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità	16
3.1 Piezometri	16
3.2 Assestimetri	18
4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Coti- gnola	20
4.1 Analisi delle serie interferometriche sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas . .	20
4.2 Analisi delle serie interferometriche sul Cluster-A in relazione alla movimentazione di gas	26
5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas	31
6 Conclusioni	35
Bibliografia	37

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, stazione GPS 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 dodicesimo rapporto relativo all'analisi, all'interpretazione e all'integrazione tra le differenti tipologie di dati monitorati fino alla fine di marzo 2019. 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 marzo 2019, la strumentazione installata presso l'impianto del Cluster-C continua ad essere funzionante. Da valutare attraverso un intervento di manutenzione il corretto funzionamento dei sensori installati sul piezometro profondo, che mostra un andamento delle misure affetto da qualche anomalia.

Complessivamente, nel semestre ottobre 2018 – marzo 2019 sono stati erogati 332.7 Msmc.

Dal Cluster A sono stati erogati \approx 86.4 Msmc.

Dal Cluster B sono stati erogati ≈ 32.1 Msmc.

Dal Cluster C sono stati erogati ≈ 214.2 Msmc.

La strumentazione superficiale e intermedia (piezometro superficiale a - 11 m da p.c.; piezometro intermedio a - 67 m da p.c.; assestimetro 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.

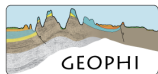
La strumentazione profonda (piezometro profondo installato a - 301 m da p.c. e assestimetro profondo installato a - 351 m da p.c.) evidenzia trend legati a compattazione della colonna stratigrafica. L'andamento dell'assestimetro profondo continua a registrare una compattazione a ritmo di $\approx - 3.5$ 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 mostra un andamento lineare, che si discosta nettamente dai cicli osservati in precedenza. La mancanza di oscillazioni tipiche dell'andamento stagionale esclude tuttavia una influenza dell'attività di stoccaggio.

Le misurazioni dello spostamento del suolo, condotte tramite l'antenna GPS sul Cluster-C e tramite l'interferometria satellitare su tutta l'area della concessione, mostrano nel semestre di erogazione in esame, un trend di abbassamento nell'area del Cluster-C e del Cluster-B. Lungo 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 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 (5.5 anni). Gli spostamenti nella componente verticale (- 15 mm in media) mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra ottobre 2018 e marzo 2019, anche se i valori delle oscillazioni non si discostano da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni stagionali legati alle dinamiche del carico idrologico superficiale. Le componenti orizzontali della serie si correlano anch'esse con l'attività di stoccaggio, registrando uno spostamento orizzontale (≈ 9.5 mm NE) che "avvicina" la stazione GPS al centro del Pool CC1.

Dal 22 novembre 2018 è attiva la nuova stazione a doppia frequenza SP12 installata da Edison in una zona considerata stabile, a nord del reservoir di di San Potito: essa è stata processata assieme a CLS2 ed alle stazioni della rete geodetica utilizzata allo scopo del presente monitoraggio; ne vengono riportate la serie temporale delle posizioni e l'analisi di qualità del dato fino al 30 marzo 2019. 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.

I dati di interferometria, sul Cluster-C, ben si correlano con i trend delle misurazioni dell'antenna 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 subsidenza 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 "avvicinamento" dei PS al centro del Cluster-C ($\approx 8 - 10$ mm).

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 subsidenza, localizzata nella parte sud-orientale del reservoir (- 6 - - 8 mm). Le oscillazioni dei PS precedono temporalmente l'andamento del gas nel Cluster-B; pertanto si esclude una 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 non correlabili con la fase di erogazione in esame, né in termini di tempo, né di distribuzione nello spazio.

1 Attività di stoccaggio dal 1 ottobre al 31 marzo 2019

Nella concessione di stoccaggio San Potito-Cotignola, nel semestre in esame (ottobre 2018 - marzo 2019) sono stati erogati complessivamente ≈ 332.7 MSmc, così suddivisi nei differenti cluster:

Cluster A

Erogazione di 86373657 Smc (≈ 86.4 MSmc) con media giornaliera di 0.47 Msmc/gg, tra il 7/11/18 e il 31/03/19

Cluster B

Erogazione di 32111335 Smc (≈ 32.1 MSmc) con media giornaliera di 0.176 Msmc/gg, tra il 31/10/18 e il 27/02/19

Cluster C

Erogazione di 214230133 Smc (≈ 214.2 MSmc) con media giornaliera di 1.18 Msmc/gg, tra il 31/10/18 e il 29/03/19.

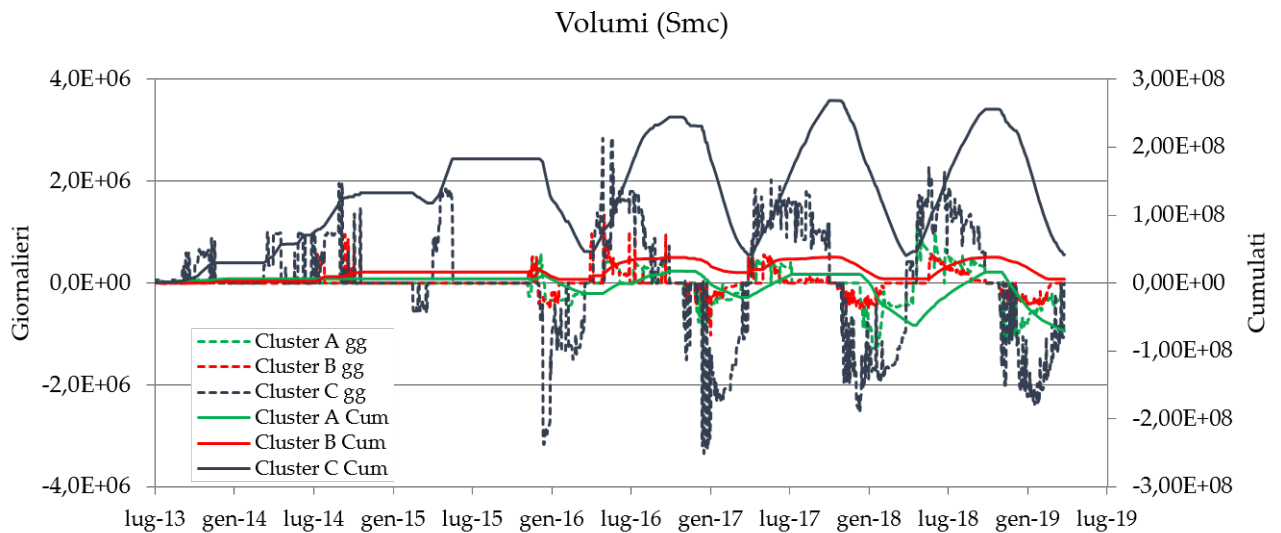


Figura 1.1: Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra.

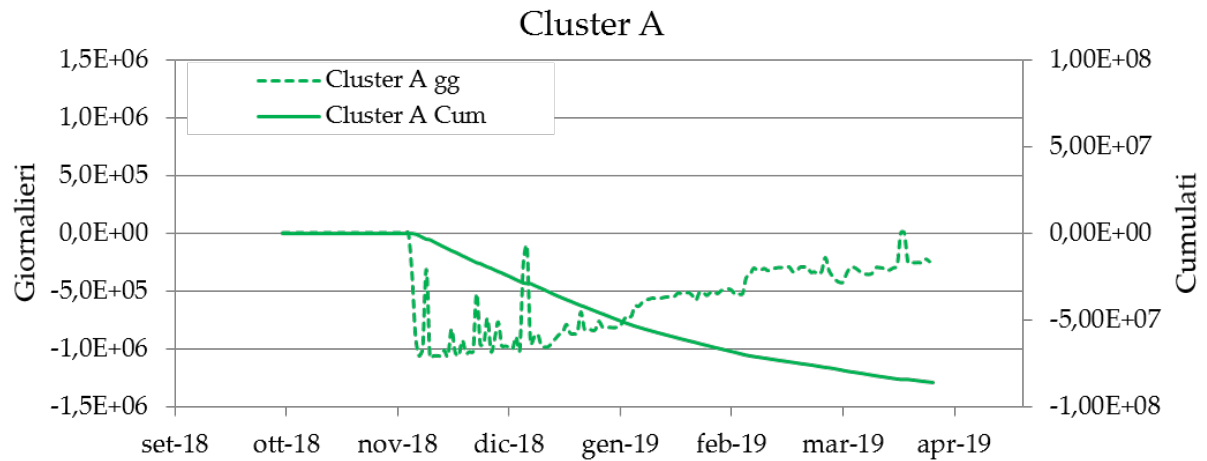


Figura 1.2: Cluster A. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Erogazione di 86373657 Smc (≈ 86.4 MSmc) con media giornaliera di 0.47 Msmc/gg.

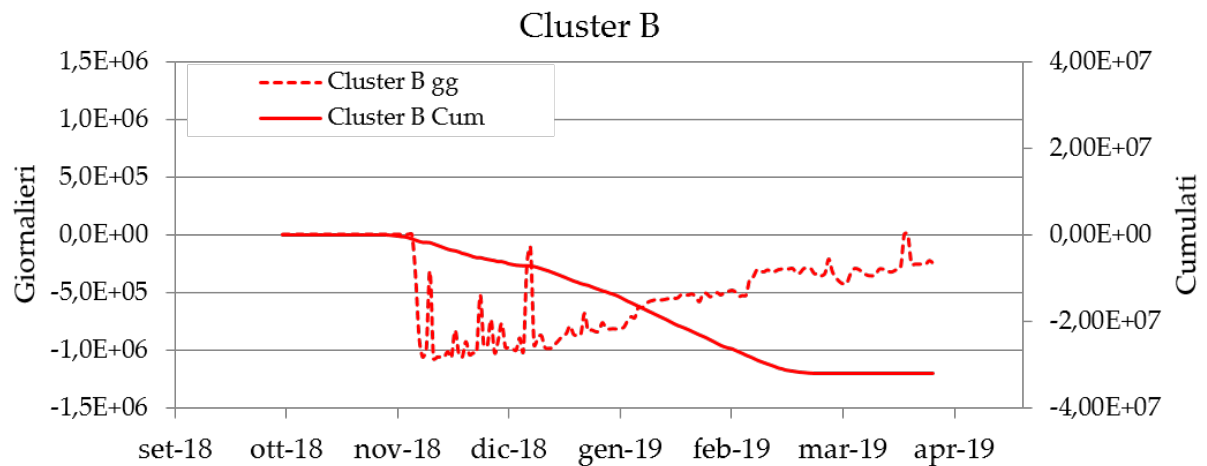


Figura 1.3: Cluster B. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Erogazione di 32111335 Smc (≈ 32.1 MSmc) con media giornaliera di 0.176 Msmc/gg.

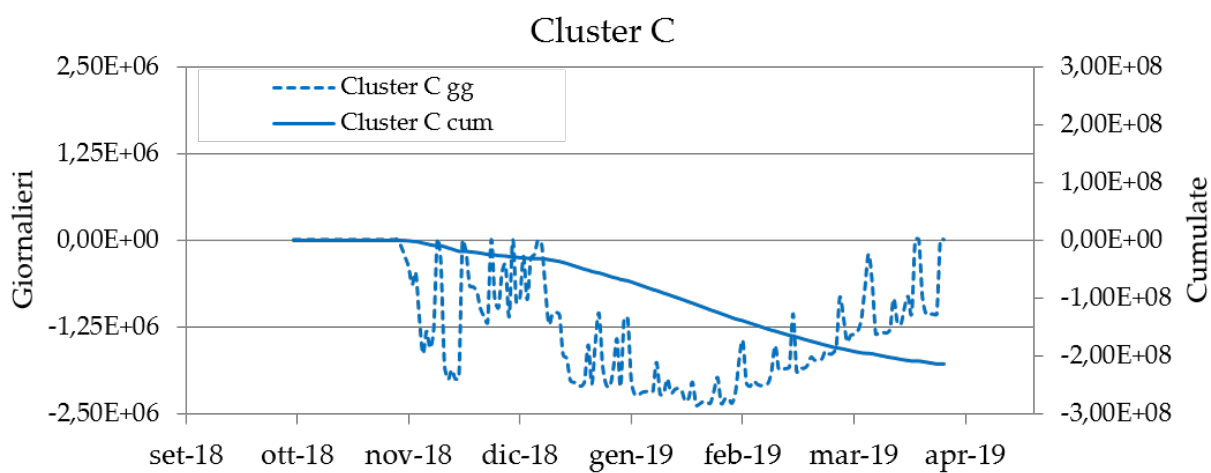


Figura 1.4: Cluster C. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Erogazione di 214230133 Smc (≈ 214.2 MSmc) con media giornaliera di 1.18 Msmc/gg.

2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 marzo 2019

La serie temporale delle posizioni della stazione CLS2 è stata aggiornata attraverso l'analisi dei dati giornalieri fino alla data del 30 marzo 2019 (Day of Year 2019/89), ovvero un giorno dopo la data di interruzione dell'erogazione.

Nella stessa rete è stata processata la nuova stazione a doppia frequenza SP12 installata a fine 2018 da Edison, in una zona considerata stabile, a nord del reservoir di San Potito (figura 2.3): di essa viene riportata la serie temporale delle posizioni che vanno dal 22 novembre 2018 (Day of Year 2018/326), giorno di entrata in funzione del ricevitore, al 30 marzo 2019.

E' stata inoltre aggiornata la serie temporale degli indici di qualità (MP1, MP2) sia di CLS2, che di SP12, fino a tale data. La serie temporali delle stazioni analizzate sono state determinate nel sistema di riferimento IGB08 (<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>). Nei grafici del presente report si può notare un'assenza del dato di CLS2 tra il 1/11/2018 ed il 16/12/2018, così come era già accaduto in precedenza, ad inizio 2017. I dati che risultano mancanti sono in realtà stati acquisiti dalla stazione, ma sono risultati non processabili assieme agli altri, poiché affetti da spostamenti di entità metrica della posizione. A causa di tale anomalia, la ditta Topcon produttrice del ricevitore riporta a voce quanto segue: "i dati sono comunque consistenti, ma mancano al loro interno alcuni degli osservabili, ovvero viene registrato solo il segnale doppler. Tale raro fenomeno è già stato osservato in precedenza per un'altra stazione. Nel caso di CLS2, poiché in seguito la stazione ha ripreso ad acquisire correttamente, il fenomeno può essere spiegato con un qualche disturbo di natura elettromagnetica che ha insistito nell'area della stazione durante il periodo sopra indicato.

2.1 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.

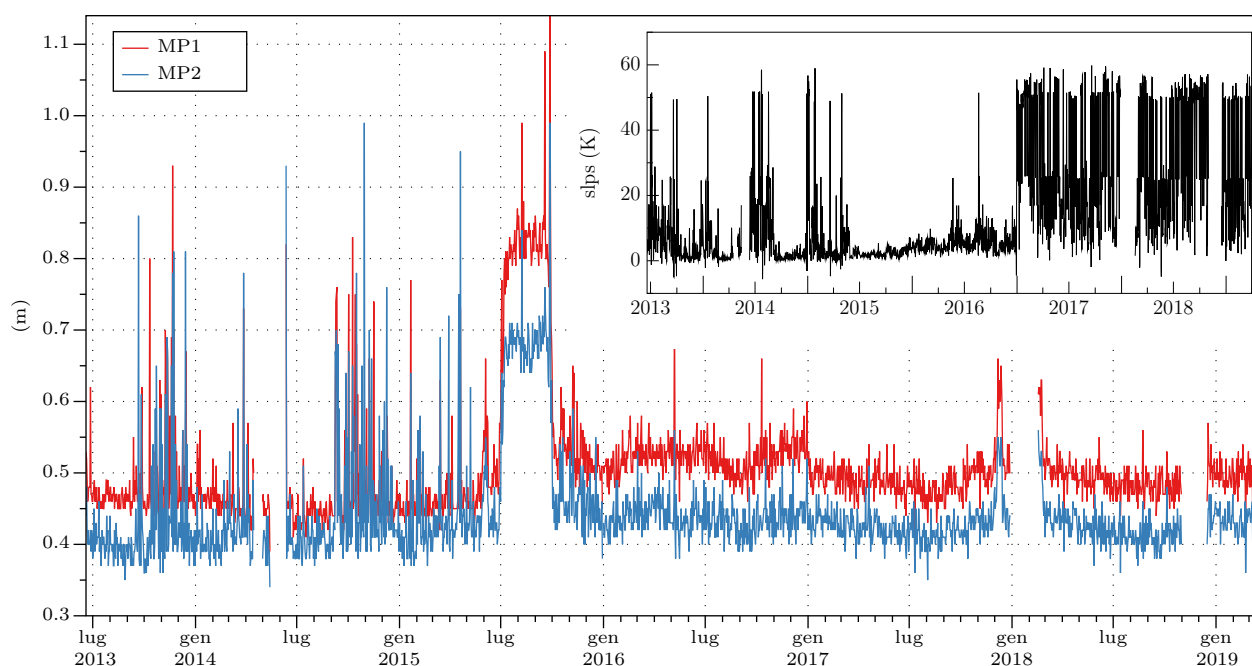


Figura 2.1: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione CLS2 fino al 31 marzo 2019.

In Figura 2.1 è mostrato l'andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e CS della stazione CLS2 fino al 30 marzo 2019, data che succede di un giorno l'interruzione dell'attività di erogazione. La serie temporale di oltre cinque 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 in primavera - estate (seppur in presenza di qualche picco) in linea con i valori indicati dall'IGS per una stazione di buona qualità. Nel semestre autunnale - invernale in esame i valori di MP1 e MP2 restano sempre al di sotto degli 0.55 m e 0.45 m, rispettivamente.

In Figura 2.2 è mostrato l'andamento dei valori di MP1, MP2 e CS della stazione SP12 durante il suoi primi

4 mesi di acquisizione. I valori di multipath, compresi tra 0.45 e 0.75 m sono in linea con quelli dei 2/3 delle stazioni, mentre ottimi sono i valori di cycle slips, sempre al di sotto di 250.

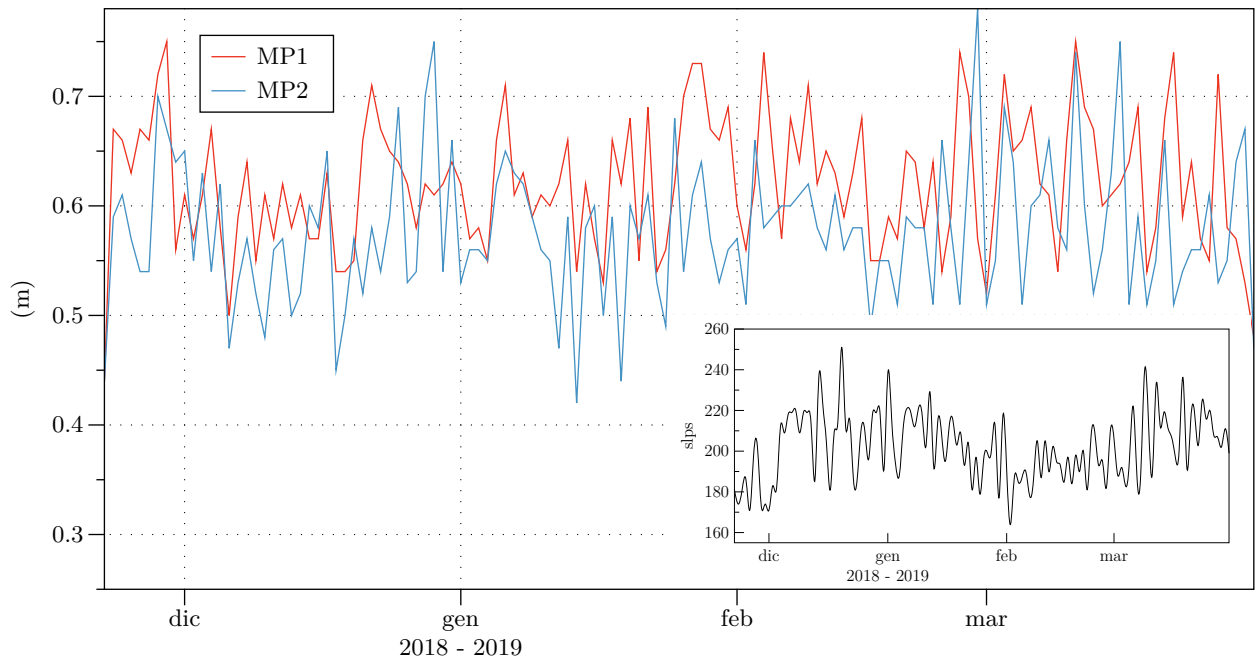


Figura 2.2: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione SP12 fino al 31 marzo 2019.

2.2 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 Edison SP12, e con essa altre nuove stazioni regionali ed internazionali per un numero complessivo che si allarga a 32. 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 10.7 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 inquadrate nel sistema di riferimento internazionale IGb08 attraverso il software GLOBK, utilizzando le stazioni

di riferimento IGS08 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)

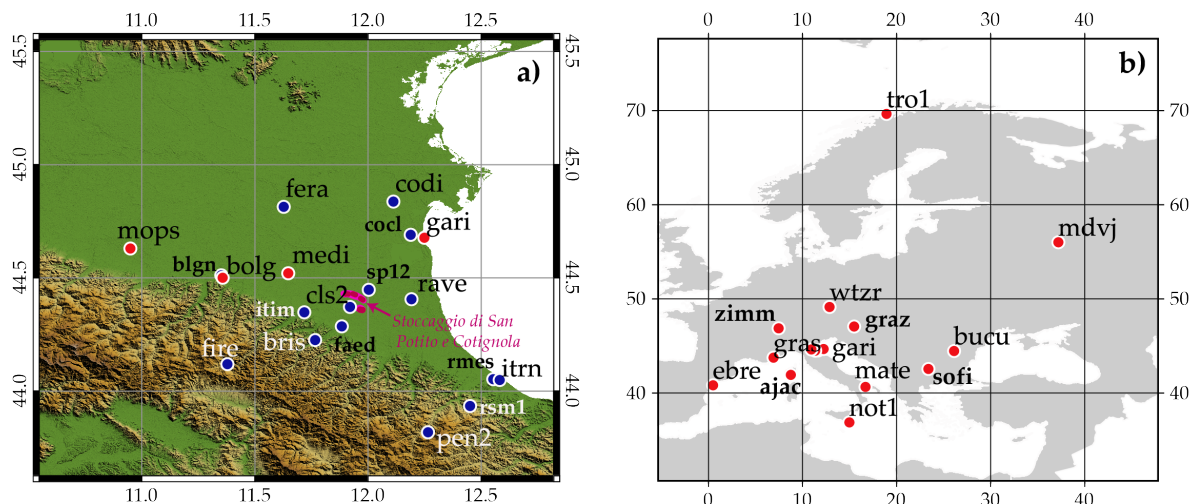


Figura 2.3: Mappa della rete geodetica utilizzata per il processing dei dati e per l'inquadramento nel sistema IGS08 di CLS2 e SP12. Fig. a): rete regionale di stazioni situate attorno al reservoir di San Potito e Cotignola: in rosso le stazioni di riferimento EUREF, in blu le stazioni delle reti RING, Italpos e Netgeo Emilia-Romagna. Fig b): stazioni di riferimento europee delle reti EUREF.

- COCL (Comacchio), FAED (Faenza), FERA (Ferrara), FIRE (Firenzuola), PEN2 (Pennabilli), RMES (Rimini), RSM1 (Rep San Marino) della rete Leica-Italpos;
- 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)

- 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 (Mendeleevo, Russia; CS), BUCU (Bucarest, Romania), SOFI (Sofia, Bulgaria).

La nuova stima delle coordinate della stazione CLS2 nel sistema di riferimento IGb08, riportate al 30/03/2019 (decimal year 2019.2425), restituisce:

X: 4468303.03660 (m) Y: 943210.62164 (m) Z: 4437714.13951 (m)

Latitudine: N 44° 22' 16.456503" Longitudine: E 11° 55' 10.336849" Quota: 60.76995 (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 IGb08 (2.4) e in un sistema di riferimento locale Adria-fixed (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

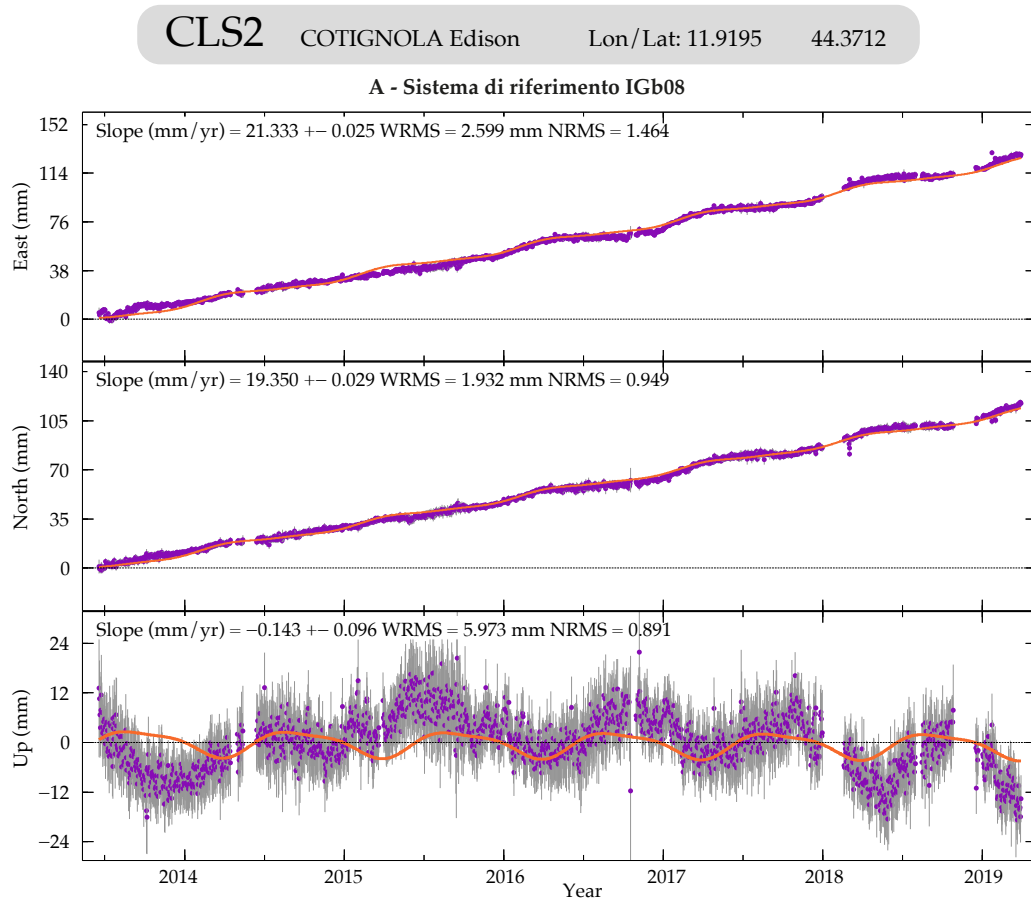


Figura 2.4: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 30 marzo 2019, nel sistema di riferimento IGb08. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

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 associate incertezze) delle componenti

CLS2 COTIGNOLA Edison Lon/Lat: 11.9195 44.3712

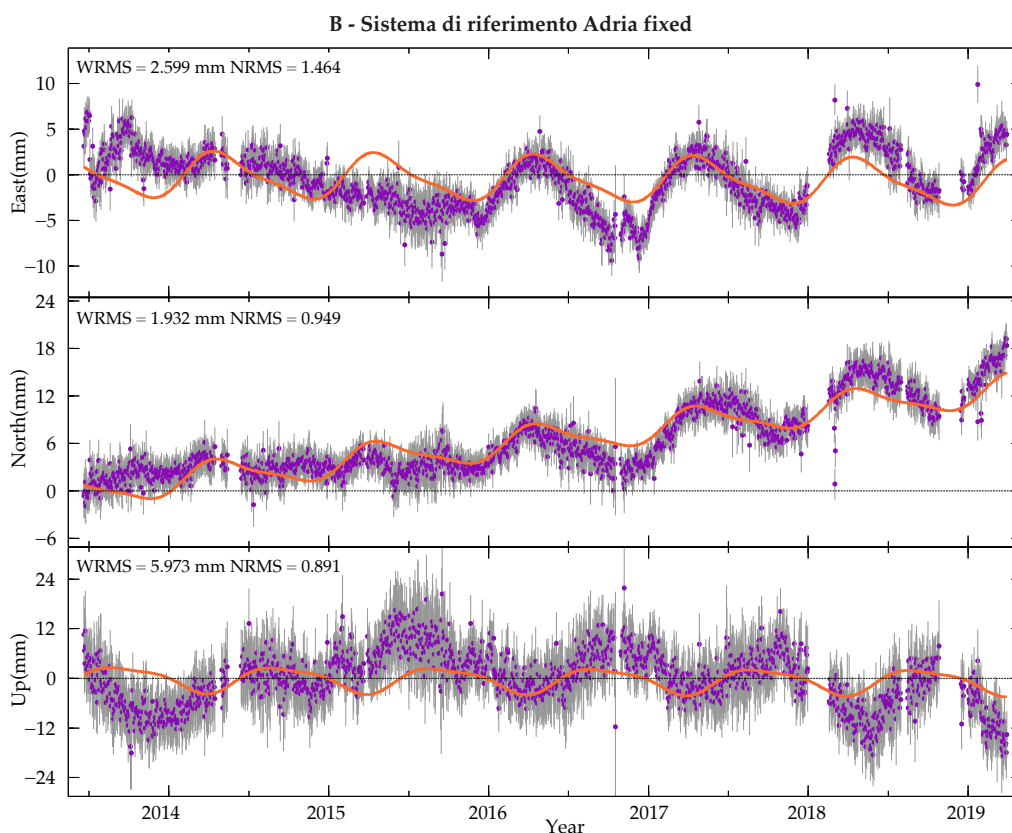


Figura 2.5: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 30 marzo 2019, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016).

annuali e semi annuali (in mm) ottenute analizzando la serie temporale aggiornata al 30 marzo 2019:

- Ampiezza Annuale Est: 2.279 ± 0.058 mm; Nord: 1.816 ± 0.068 mm
- Ampiezza Annuale Up: 2.863 ± 0.219 mm
- Ampiezza Semi-Annuale Est: 0.587 ± 0.057 mm; Nord: 0.48 ± 0.065 mm
- Ampiezza Semi-Annuale Up: 0.672 ± 0.216 mm

Le velocità stimate per le tre componenti, E, N e Up nel sistema di riferimento Igb08 analizzando la serie temporale aggiornata al 30 marzo 2019 sono (in mm/anno):

- Velocità Est: 21.350 ± 0.025 (mm/anno)
- Velocità Nord: 19.375 ± 0.029 (mm/anno)

- Velocità Verticale: -0.195 ± 0.108 (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 IGb08, riportate al 30/03/2019 (decimal year 2019.2425), restituisce:

X: 4461144.66778 (m) Y: 948495.33947 (m) Z: 4443722.01781 (m)

Latitudine: N 44° 26' 49.429617" Longitudine: E 12° 0' 11.048901" Quota: 44.72958 (m)

La serie temporale di SP12 è mostrata in figura 2.6. Le velocità nelle 3 componenti est, nord e verticale risultano

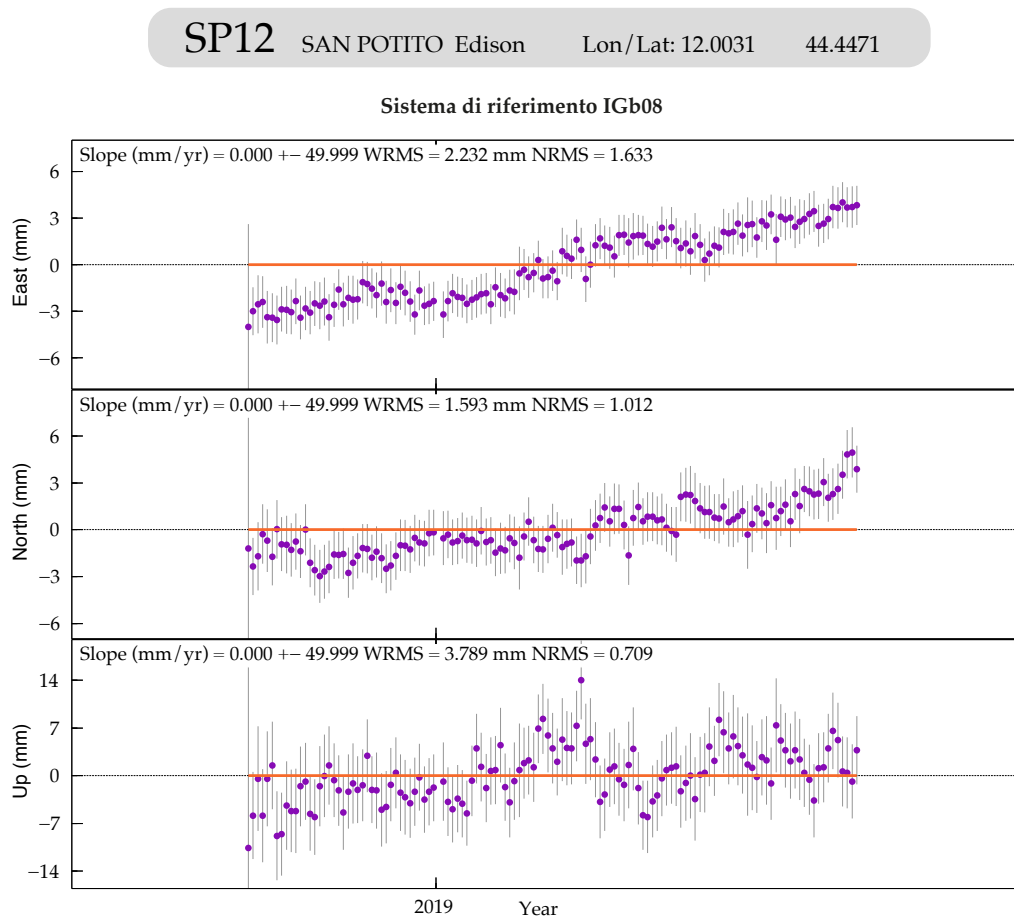


Figura 2.6: Serie temporale delle posizioni della stazione SP12, aggiornata al 30 marzo 2019, nel sistema di riferimento IGb08. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

uguali a 0, ovvero non vengono stimate dal software. 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).

3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità

3.1 Piezometri

Il comportamento dei piezometri superficiali nel periodo ottobre 2018 – marzo 2019 ha andamento confrontabile con quanto avvenuto nei medesimi periodi degli anni precedenti (in particolare nel semestre ottobre 2016 – marzo 2017), ovvero un trend di innalzamento delle quote da p.c., iniziato nell'estate precedente con differenti tempistiche, a suggerire differenti tempi di risposta di ciascuna delle falde investigate, rispetto alle dinamiche pluviometriche.

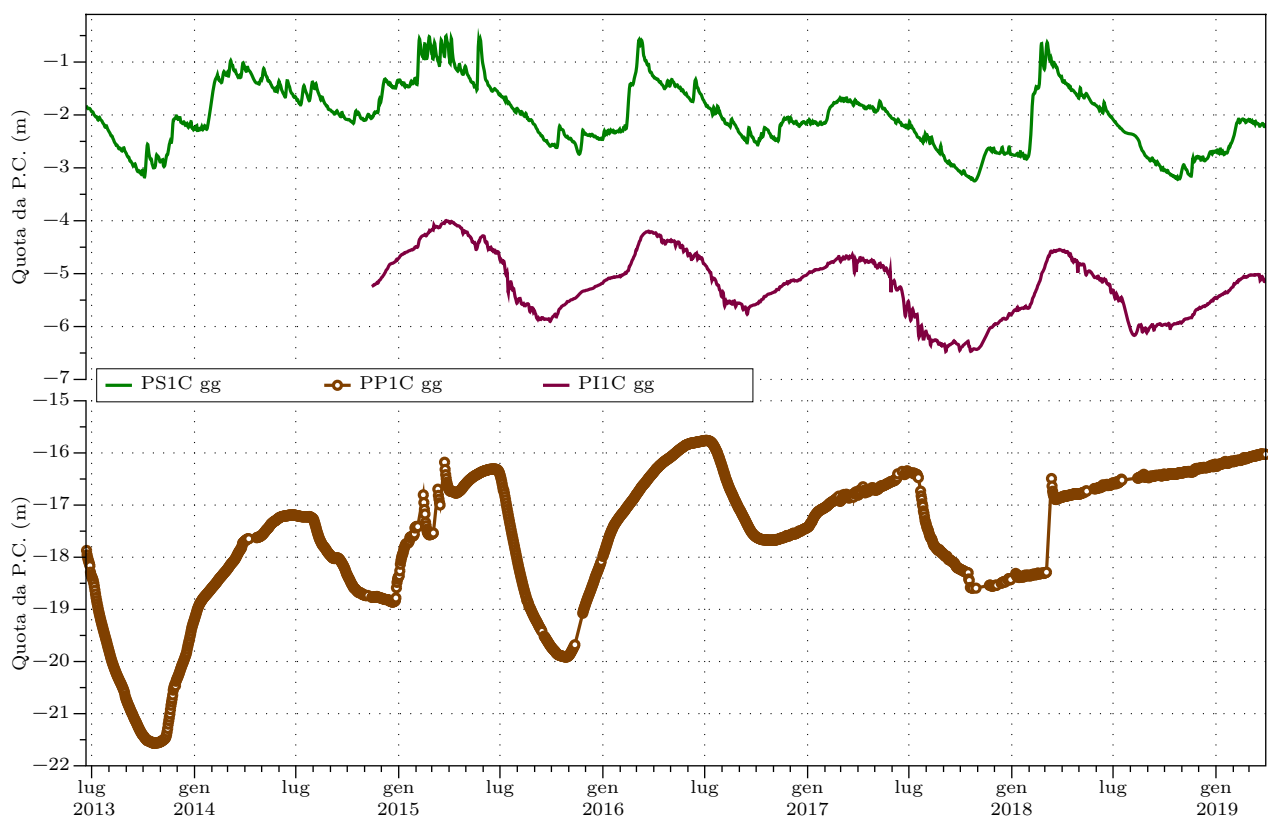


Figura 3.1: Variazioni giornaliere medie della quota dal piano campagna registrate rispettivamente nei piezometri superficiale, intermedio e profondo, compensate per la pressione atmosferica. Dal grafico sono escluse le medie con valori di deviazione standard ≥ 0.05 .

La quota del piezometro PS1C risale complessivamente di quasi 1 m, a partire da ottobre 2018 (- 3.3 m da p.c.), con un trend lineare fino a fine gennaio 2019, ed un successivo leggero abbassamento in febbraio e marzo 2019; la quota di PS1C a fine monitoraggio è - 2.2 m da p.c. .

La quota del piezometro intermedio risale della stessa quantità di PSC1 (≈ 1 m), attestandosi a circa - 5 m da p.c.. In questo trend di innalzamento, le falde investigate appaiono in parte influenzate dalle precipitazioni

invernali: si verificano infatti solo piccoli impulsi di risalita delle quote, in risposta alle precipitazioni (figura 3.2).

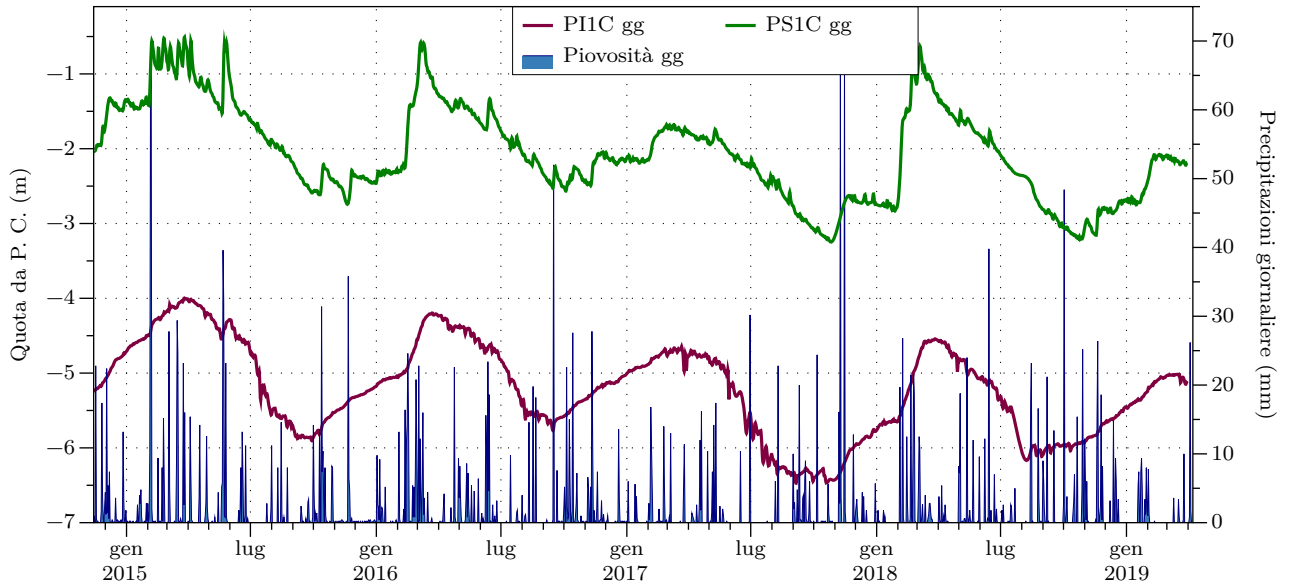


Figura 3.2: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nei piezometri superficiale e intermedio, in relazione alla piovosità giornaliera.

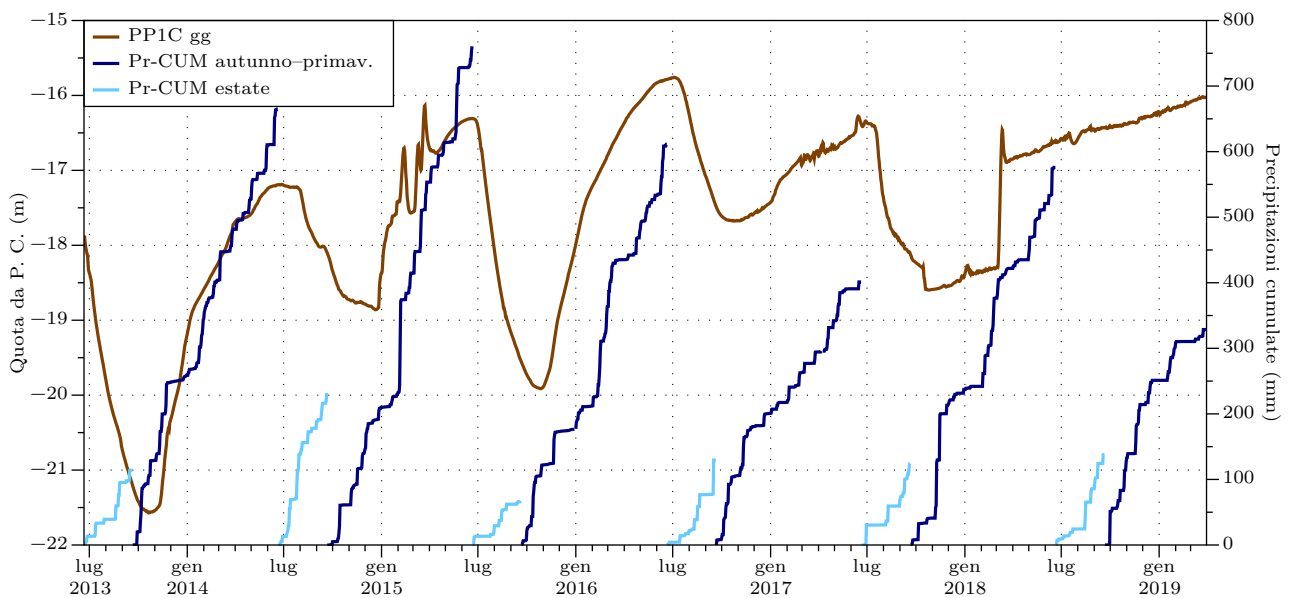


Figura 3.3: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nel piezometro profondo in relazione con le precipitazioni cumulate ogni anno. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale dello strumento, le cumulate della piovosità vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno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

Il piezometro profondo PP1C mostra un trend di innalzamento della quota da p.c. di circa 0.5 m, leggermente

più contenuto rispetto agli innalzamenti registrati nei precedenti semestri di erogazione. La dinamica di tale innalzamento sembra distaccarsi da quelle finora registrate: si osserva un trend di risalita costante, osservato già a partire dal precedente semestre (figura 3.3). Questa particolarità verrà ulteriormente discussa in seguito e nei successivi report di monitoraggio. A fine monitoraggio la quota di PP1C si attesta a - 16 m dal piano campagna.

3.2 Assestimetri

Nel semestre in esame, l'andamento di entrambi gli assestimetri mostra un trend di dilatazione delle colonne di sedimenti investigati dagli strumenti. 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.

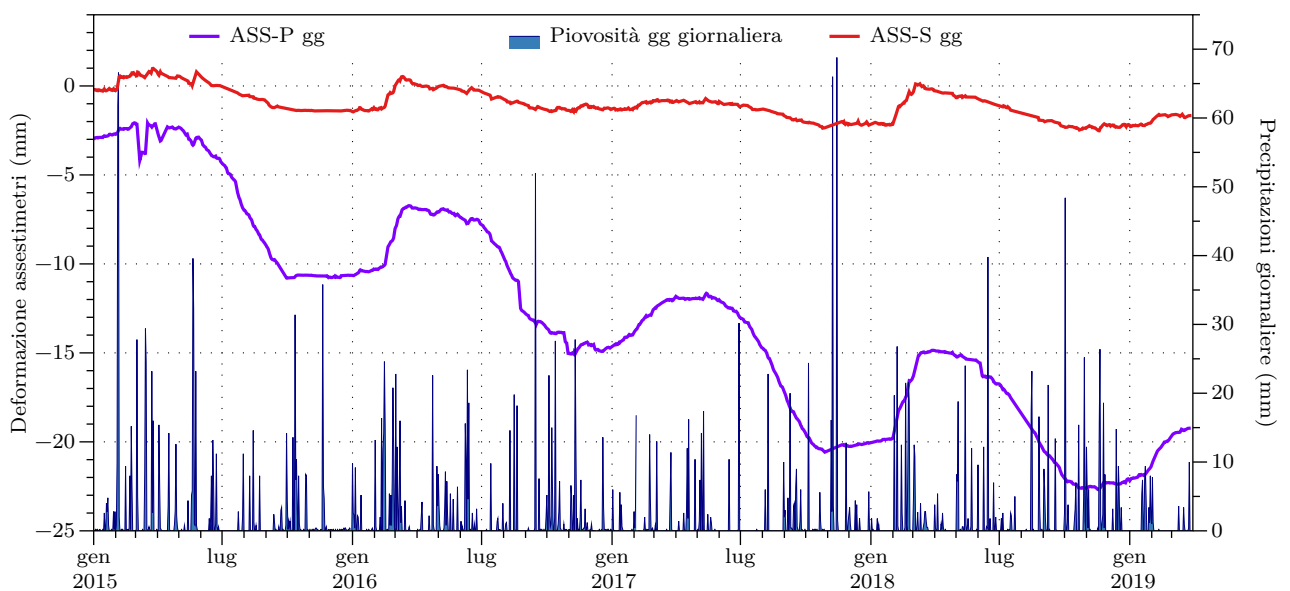
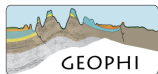


Figura 3.4: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo le aste degli assestimetri superficiale (ASS-S) e profondo (ASS-P) in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015 fino al 31 marzo 2019.

- Nel semestre in esame, i primi 11 metri di sedimento (linea rossa in figura 3.4) si sono dilatati di ≈ 1 mm. Questa dinamica si inserisce in un trend di lievissima compattazione da inizio monitoraggio (- 0.25 mm annui); a fine marzo 2019 lo strumento indica 1.6 mm di deformazione accumulata.
- I 350 metri di colonna sedimentaria, monitorata tramite l'assestimetro profondo (linea viola in figura 3.4) si sono dilatati di ≈ 3.5 mm nel semestre in esame. Questa dinamica si inserisce in un trend di



compattazione costante da inizio monitoraggio ($\approx - 3.5$ mm/anno); a fine marzo 2019 lo strumento indica una compattazione complessiva di ≈ 19 mm.

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 a fine marzo 2019 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.

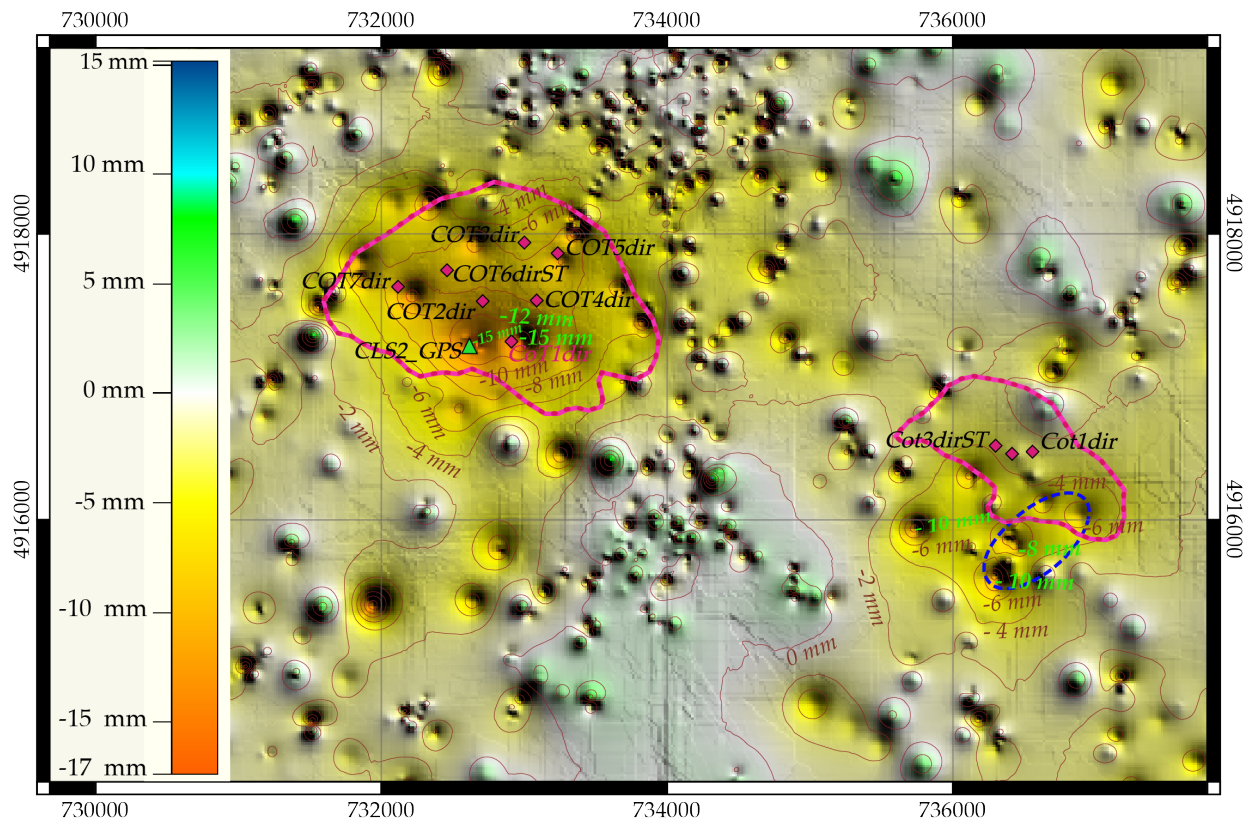


Figura 4.1: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di erogazione tra ottobre e marzo 2019 (esagerazione verticale 1000x).

I dati dell'aggiornamento a marzo 2019 mostrano sul giacimento una inversione del trend di sollevamento della serie storica a partire già da metà novembre 2018, con l'inizio di un nuovo fenomeno di subsidenza, più regolare a partire da dicembre. L'inversione si osserva sia nel Cluster B che nel Cluster C, anche se è più marcato nella zona centrale di quest'ultimo. La superficie che interpola gli spostamenti verticali subiti dai bersagli radar durante i 6 mesi della fase di erogazione 2018 - 2019, nei cluster B e C (≈ 214.2 MSmc dal Cluster C, ≈ 32.1 MSmc dal Cluster B, fig. 4.1), mostra le due zone di subsidenza localizzate a ridosso dei cluster.

Al di sopra del Cluster-B si evidenzia una subsidenza areale mediamente compresa tra i - 4 e - 6 mm (con massimi fino a -10 mm), che mima l'estensione del giacimento, seppur traslato verso sudest rispetto alla proiezione in superficie dei limiti del reservoir. Al di sopra del Cluster-C si evidenzia un cono di subsidenza areale mediamente compreso tra - 6 e - 10 mm, con massimi fino a - 16 mm nel centro del giacimento, che si distribuiscono tra i pozzi Cot1Dir, Cot2Dir e Cot4Dir.

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).

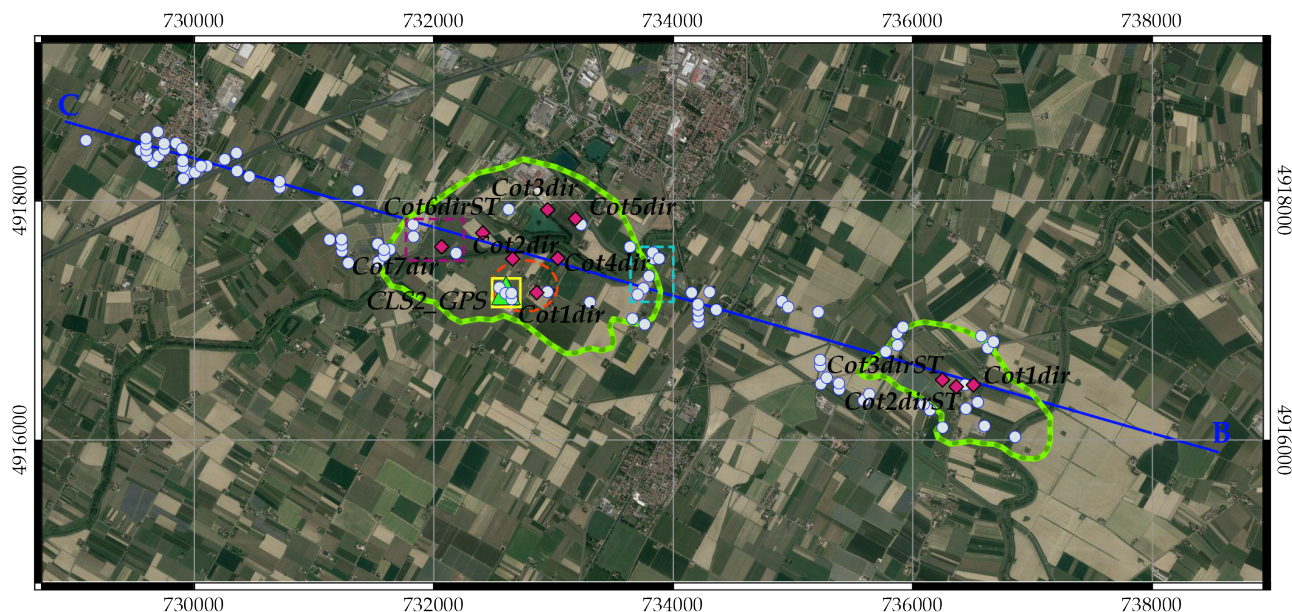


Figura 4.2: Mappa dei limiti di reservoir dei Cluster C e B; localizzazione del profilo CB (in blu) lungo il quale sono stati proiettati i bersagli radar (in bianco) che si distribuiscono attorno ad esso; il cerchio arancio al centro del Cluster-C evidenzia i bersagli radar di cui sono state analizzate 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.

Le serie in figura 4.3 rappresentano i valori di spostamento di ogni bersaglio radar proiettato sul profilo CB, alla fine di ognuna della fasi di iniezione ed erogazione degli ultimi 4 anni e mezzo. Le serie sono calcolate riportando a zero il valore di spostamento di ogni punto all'inizio di ogni fase. La figura evidenzia l'evoluzione

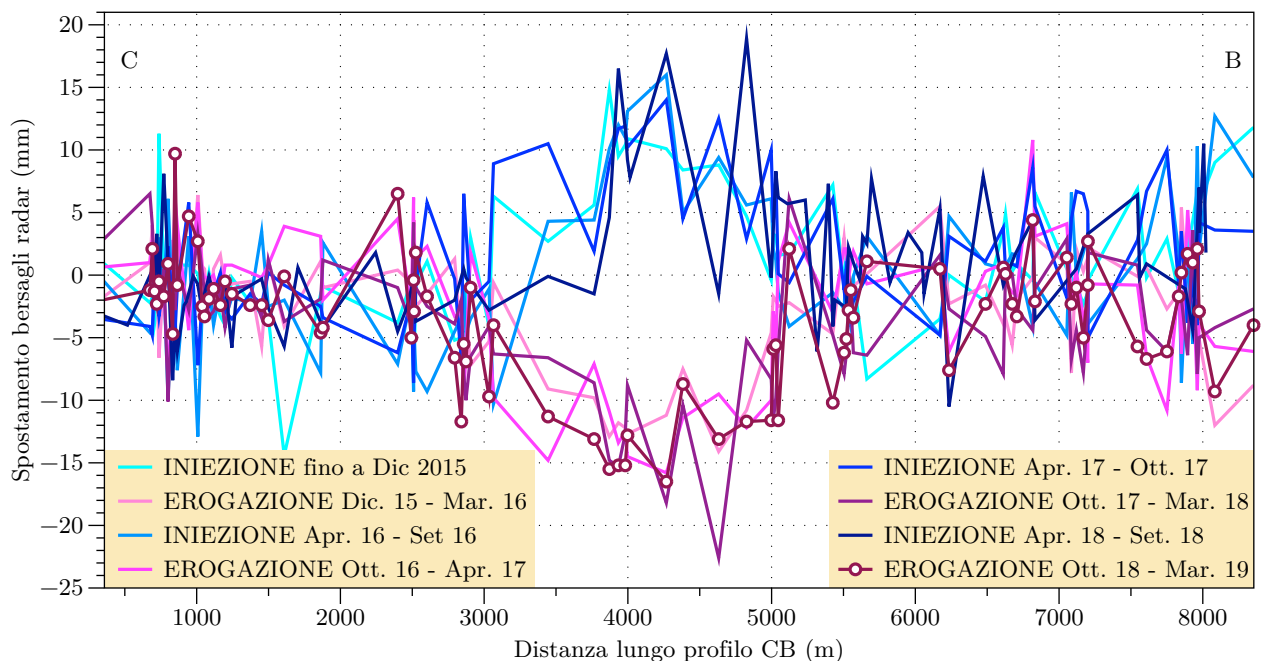


Figura 4.3: Profilo longitudinale di spostamento verticale ottenuto dai dati delle serie temporali Sentinel-1. Le curve del grafico sono costruite proiettando lungo il profilo CB, in blu nella mappa di figura 4.3, i valori di spostamento verticale dei bersagli radar (punti bianchi in mappa), che si distribuiscono nell'intorno del profilo stesso, rispetto al valore di spostamento di ogni punto ad 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.

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 erogazione ottobre 2018 - marzo 2019 (curva viola con punti bianchi) si possono notare:

- un abbassamento massimo di ≈ -10 mm (a fronte di 32.1 Msmc erogati) in prossimità del centro del Cluster-B;
- un abbassamento massimo di ≈ -16 mm (a fronte di ≈ 214.2 Msmc iniettati) al centro del Cluster-C.

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

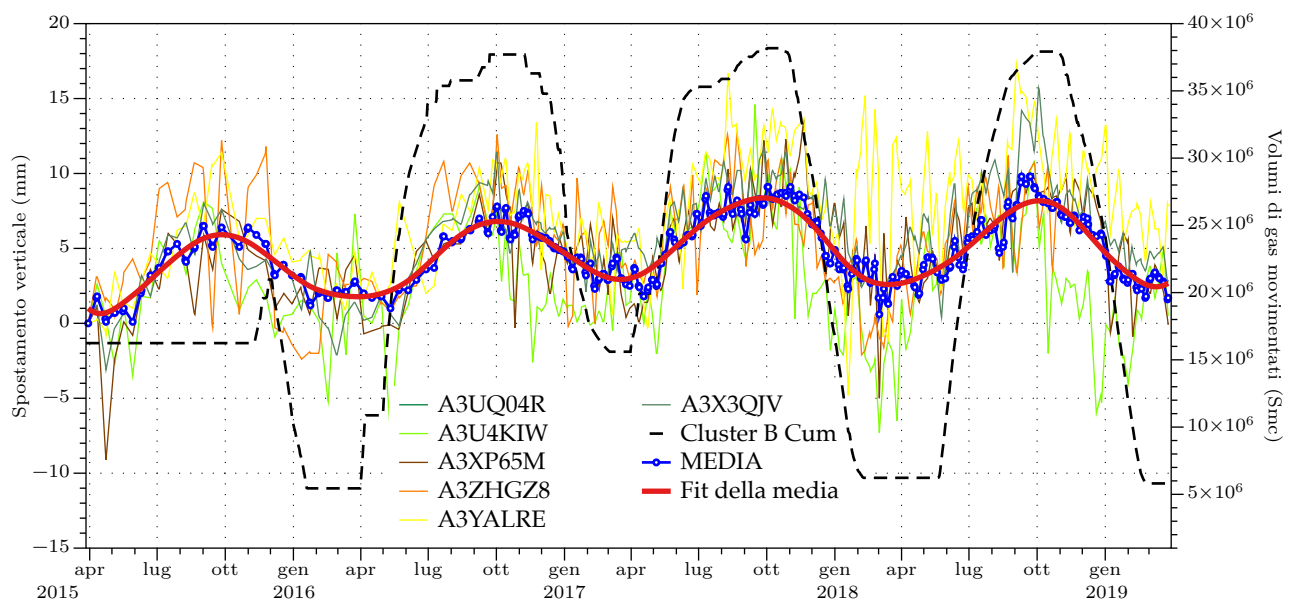


Figura 4.4: Serie temporali di spostamento verticale dei bersagli radar Sentinel-1 che hanno mostrato massimo abbassamento nel semestre ottobre 2018 - marzo 2019, nella zona sud del Cluster B; in blu la media degli spostamenti; in rosso il fit della media.

sud-orientale del reservoir, sia interna che esterna ad esso (cerchio blu in fig. 4.1), si abbassano fino a - 10 mm nell'ultimo semestre. L'analisi delle loro serie temporali (fig. 4.4) evidenzia come:

- l'ampiezza di tali oscillazioni rimanga abbastanza costante nel tempo;
- vi siano oscillazioni significative anche in periodi senza movimentazione di gas nel cluster B (ad es. tra marzo 2015 e gennaio 2016);
- le inversioni di trend degli spostamenti precedono di circa un mese i cambi di ciclo operativo nello stoccaggio, a differenza del ritardo di circa un mese mostrato fino ad ora nel corso del monitoraggio, sia dai bersagli radar nel centro del Cluster-C, sia dalla stazione GPS CLS2.

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 l'evidente correlazione tra i loro spostamenti ed i volumi di gas movimentati nel pool C; nell'ultimo semestre l'inversione del trend di sollevamento in favore della subsidenza (così come negli anni precedenti) avviene verso la metà di novembre, ovvero circa quindici giorni dopo la data di ripresa dell'erogazione (31/10/18), a differenza di quanto si verifica all'inizio delle fasi iniezione, quando il sollevamento avviene dopo quasi un mese e mezzo.

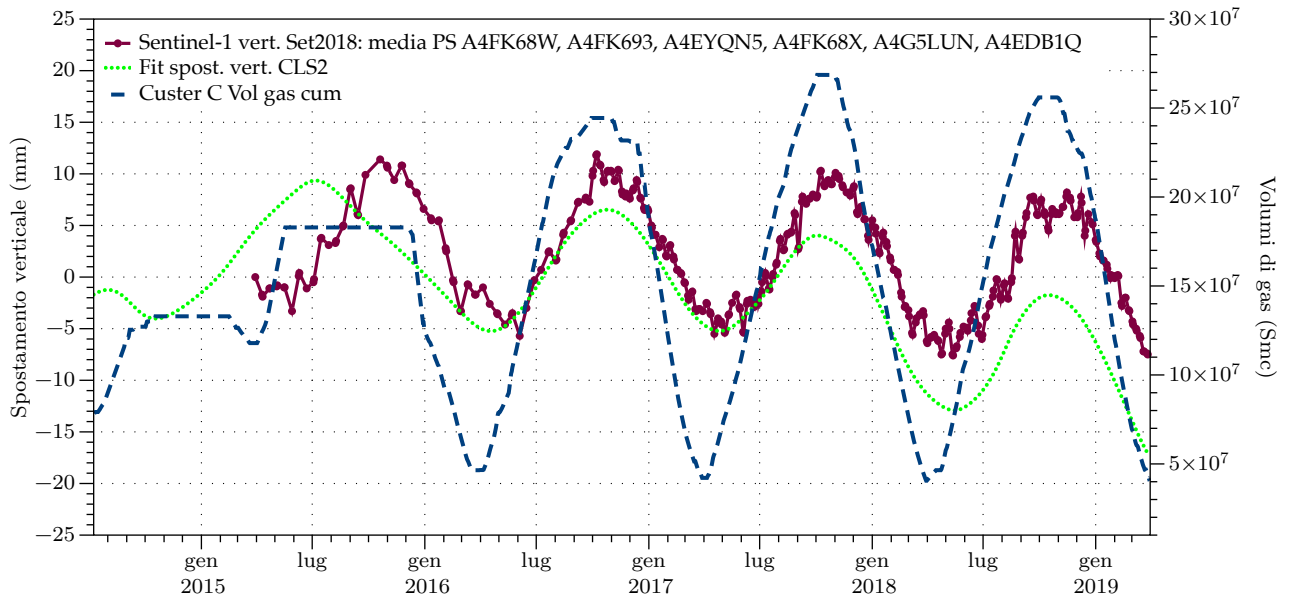


Figura 4.5: Confronto tra medie degli spostamenti verticali dei bersagli radar (mm) individuati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2), fit della serie GPS verticale CLS2 e volumi movimentati nel pool CC1.

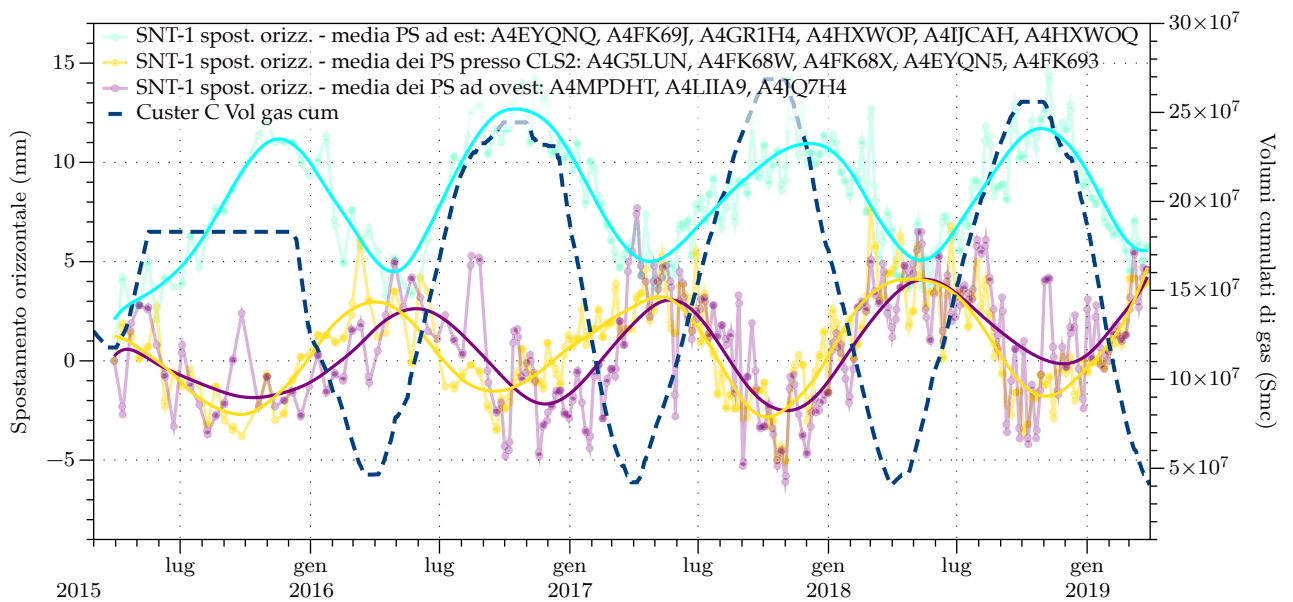


Figura 4.6: Confronto degli spostamenti orizzontali medi di gruppi di PS localizzati in zone ad est e ad ovest del centro del reservoir (box azzurro, giallo e viola in fig. 4.2); in azzurro media e degli spostamenti di PS situati ad est del centro; in giallo di PS a ridosso di CLS2; in viola di PS situati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

Le serie temporali di spostamento orizzontale (Fig. 4.6) 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 negativo fino a ≈ -10 mm, e descriva dunque un avvicinamento verso il centro del reservoir;
- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona occidentale (quadrato viola in fig. 4.2) abbia valore positivo fino a $\approx +10$ mm, e descriva dunque un avvicinamento verso il centro del reservoir;
- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona centrale a ridosso della stazione GPS (quadrato giallo in fig. 4.2), posta leggermente a sud-ovest del centro del Cluster-C, abbia valori positivi fino a $\approx +8$ mm, e descriva dunque un avvicinamento verso il centro del reservoir, di entità appena più contenuta.

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 27/03/19 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.

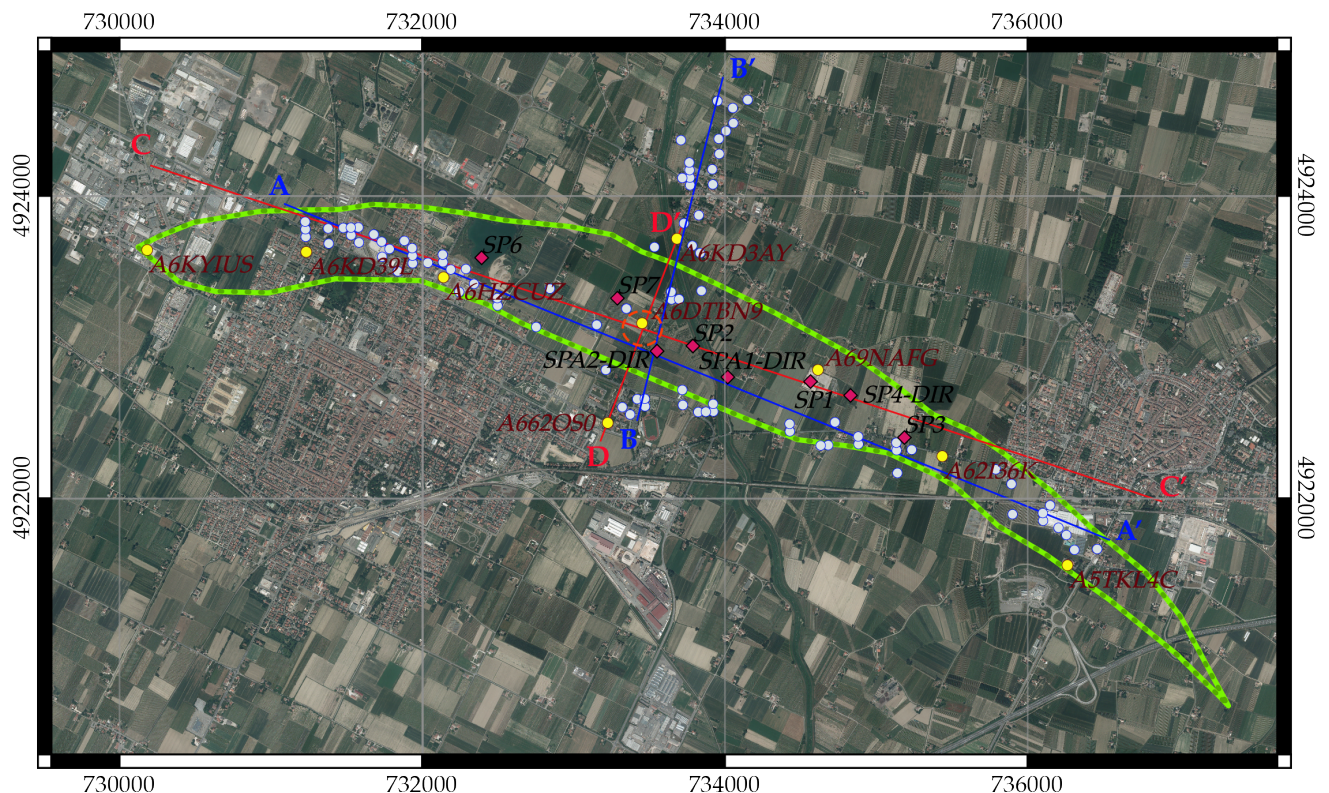


Figura 4.7: Mappa della proiezione in superficie del top del giacimento di San Potito, con la posizione dei fondo pozzo, in fucsia; in bianco i bersagli radar della serie Sentinel-1 aggiornata a settembre 2018, i cui spostamenti sono stati proiettati lungo i profili AA' e BB' per creare le figure 4.8 e 4.9; il cerchio arancio delimita i bersagli radar analizzati in figura 4.10. I PS in giallo sono i bersagli utilizzati come punti di controllo per la modellazione geomeccanica in fase di elaborazione e che verrà in seguito fornita da Edison Stoccaggio

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 dei bersagli radar, suddivisi secondo i periodi operativi dello stoccaggio, localizzati lungo 2 sezioni che tagliano longitudinalmente il giacimento nel suo punto di culminazione strutturale (massimo spessore), e dunque potenzialmente più suscettibile di deformazioni in relazione alla movimentazione di gas (sezioni AA' e BB' in blu nella mappa di figura 4.7);

- 2) l'analisi della serie temporale di A6DTBN9 unico PS individuato a ridosso del pozzo direzionato San Potito A2-DIR (cerchio arancio nella mappa di Fig. 4.7), perforato sulla culminazione strutturale del reservoir di San Potito.
- 3) 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 (tra cui lo stesso A6DTBN9) scelti come punti di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo 2 sezioni (CC' e DD' in figura 4.7), che permettono di visualizzare e controllare l'entità delle deformazioni in tutte le aree del reservoir.

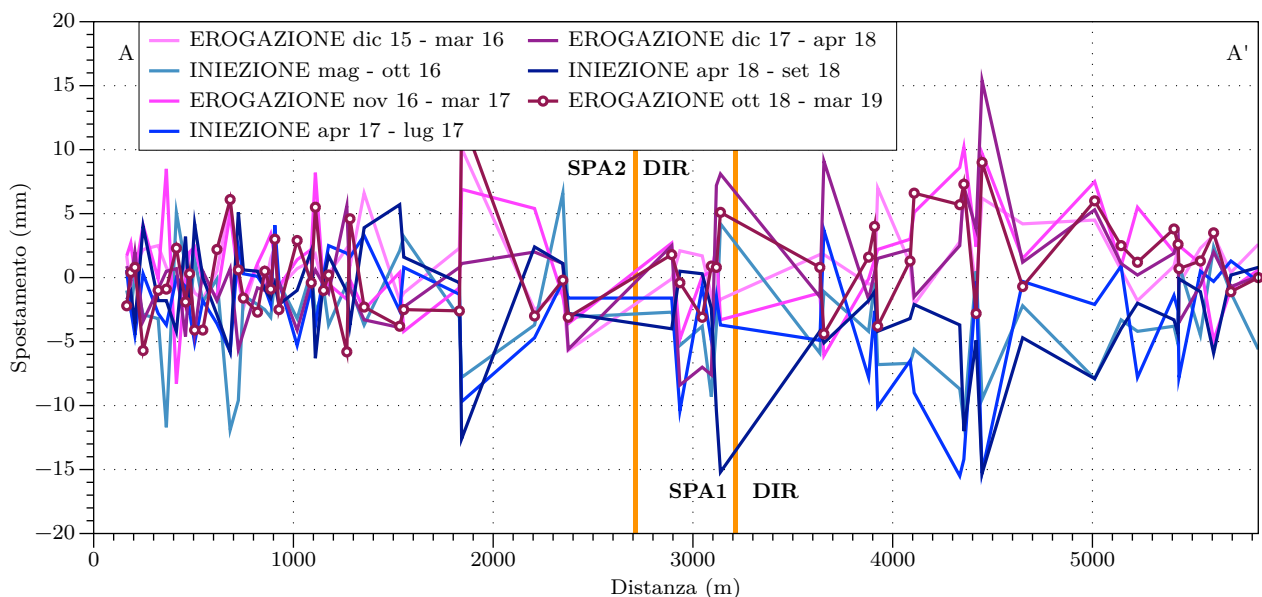


Figura 4.8: Spostamenti dei bersagli radar distribuiti lungo il profilo AA' (mappa di Fig. 4.7); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee arancio localizzano i pozzi San Potito A1-DIR e A2-DIR.

Nel semestre in esame gli spostamenti verticali registrati nell'area di San Potito non sono correlabili con la movimentazione di gas operata nel giacimento né in termini spaziali, né temporali. Dalle figure 4.8 e 4.9 si può osservare come, durante le fasi di iniezione ed erogazione analizzate, gli spostamenti della quasi totalità dei bersagli radar della serie Sentinel-1, distribuiti lungo i profili AA' e BB', abbiano valori contenuti entro i 5 - 6 mm (sia in positivo che in negativo), con oscillazioni massime tra una fase e l'altra di ≈ 10 mm. Tali oscillazioni non mostrano alcuna influenza con i volumi movimentati. Si osserva come la serie relativa alla erogazione nel semestre in esame (ottobre 18 – marzo 19, porpora con pallino, in figura 4.8 e 4.9) non presenti alcun evidente cono di subsidenza in prossimità dei pozzi. Qualora vi fosse una influenza della attività di movimentazione gas nel sottosuolo sulla superficie, risulterebbe alquanto contenuta. Tale comportamento viene confermato

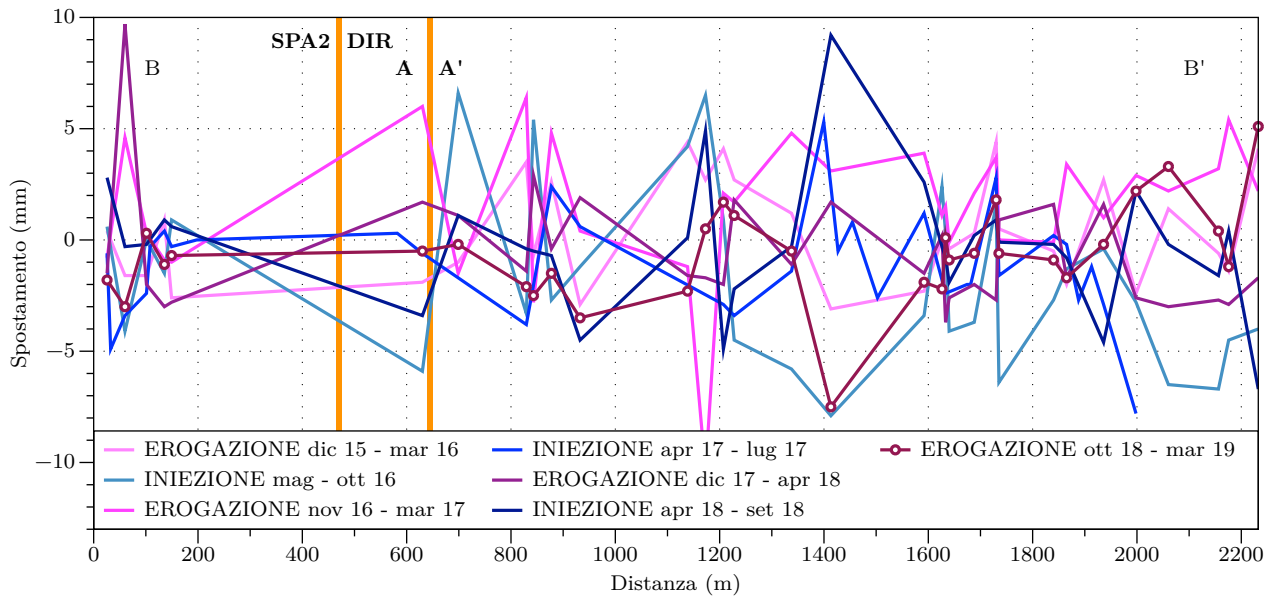


Figura 4.9: Spostamenti dei bersagli radar distribuiti lungo il profilo BB' (mappa di Fig. 4.7); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee arancio localizzano l'intersezione del profilo BB' con il profilo AA', tra i pozzi SP7 e SP2, e la proiezione del pozzo SPA2-DIR sul profilo BB' stesso.

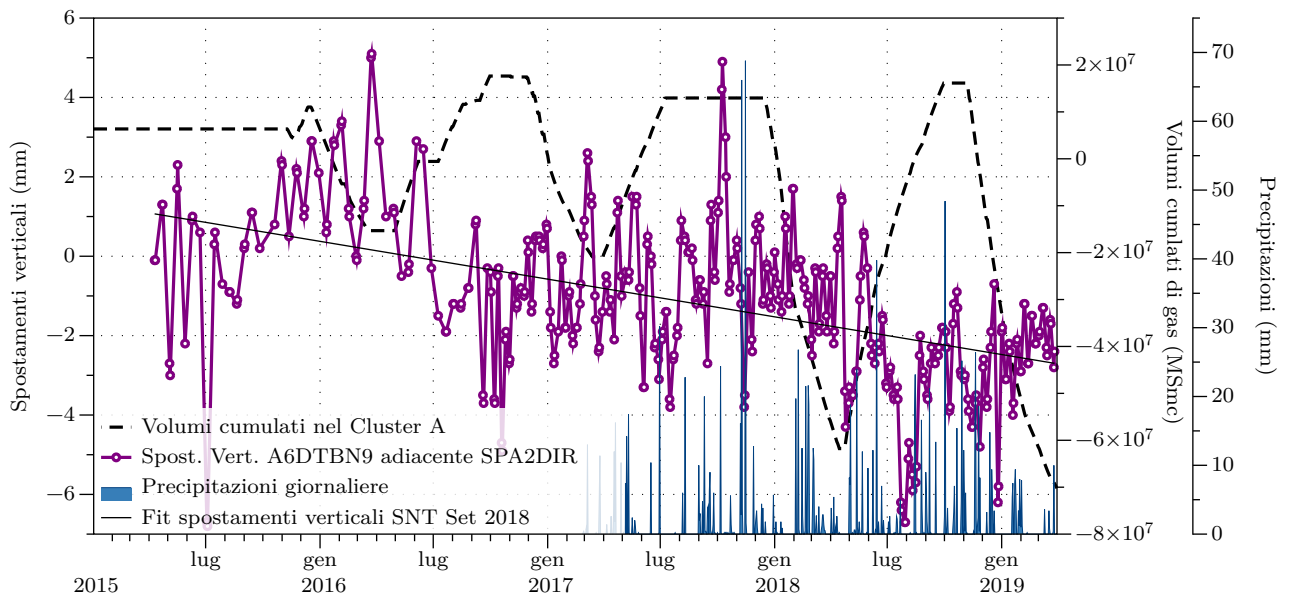


Figura 4.10: Serie temporale di spostamento del bersaglio radar A6DTBN9 adiacente al pozzo San Potito A2 DIR (cerchio arancio in figura 4.7) al di sopra della culminazione strutturale del giacimento, in relazione alla movimentazione di gas ed alle precipitazioni.

osservando l'andamento della serie temporale di A6DTBN9, il PS più adiacente al pozzo San Potito A2 DIR, sulla culminazione strutturale del Cluster-A (Fig. 4.10); non si riscontra alcun particolare trend nella serie degli spostamenti verticali intorno al pozzo, sebbene siano stati movimentati dei volumi di gas non trascurabile (≈ 86 milioni di Smc erogati); in realtà il bersaglio radar A6DTBN9 nel semestre in esame risale complessivamente (comportamento opposto a quello atteso).

Le figure 4.11 e 4.12 analizzano il comportamento dei 9 bersagli radar scelti come riferimento per la modellazione geomeccanica.

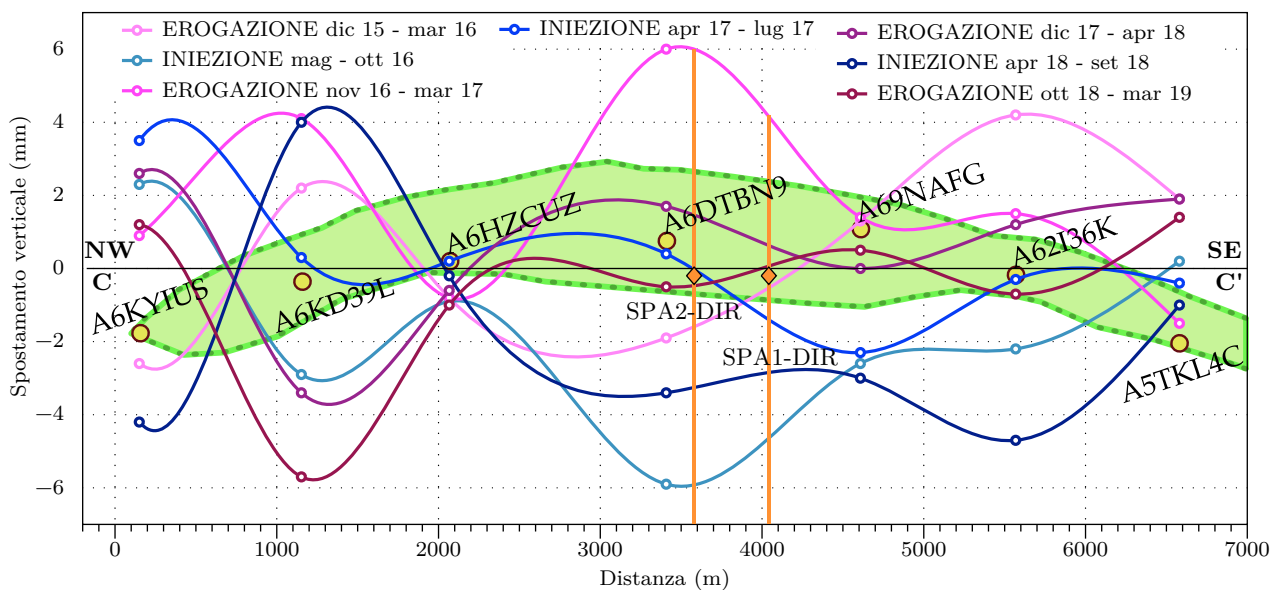


Figura 4.11: Spostamenti di 7 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione CC' (mappa di Fig. 4.7); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee arancione localizzano i pozzi San Potito A1-DIR e A2-DIR. In verde l'area del reservoir, in giallo/bordeaux la posizione dei bersagli di riferimento ruotate di pochi gradi verso NW per sovrapporre la sezione CC' all'asse delle ascisse

Il PS A6HZCUZ sembra essere quello più stabile con variazioni di quota topografica contenute tra ± 1 mm avvenute durante tra le fasi di stoccaggio (Fig. 4.11).

Il PS A6DTBN9, posto nella porzione più centrale del campo, massime oscillazioni tra ± 6 mm. L'andamento di tali oscillazioni non appare influenzato dall'attività di stoccaggio: non vi è risposta evidente alla fase di movimentazione di gas e talvolta vi è subsidenza in iniezione ed uplift in erogazione.

Il PS A6KD3AY (Fig. 4.12) che si trova a nord della zona centrale, poco al di fuori del reservoir, è l'unico bersaglio radar che evidenzia una netta corrispondenza tra la fase di stoccaggio e lo spostamento avvenuto, mostrando sollevamenti fino + 3 mm in fase di erogazione e fino a - 4 mm in fase di iniezione (il contrario di

quanto atteso): tale comportamento non può dunque essere legato all'attività di stoccaggio, ma più probabilmente si correla alle dinamiche stagionali di compattazione e dilatazione dei sedimenti. Non si evidenziano altre dinamiche degne di ulteriori approfondimenti.

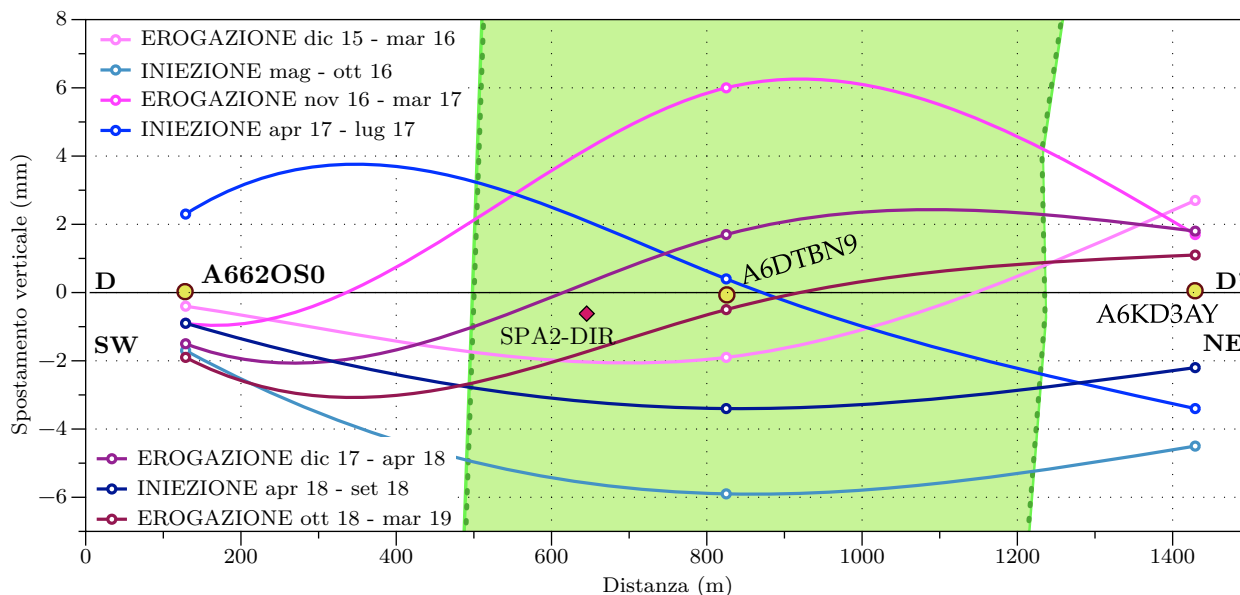


Figura 4.12: Spostamenti di 3 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione DD' (mappa di Fig. 4.7); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. In verde l'area del reservoir, in giallo/bordeaux la posizione dei 3 bersagli di riferimento ruotate di ≈ 70 gradi verso E per sovrapporre la sezione DD' all'asse delle ascisse

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

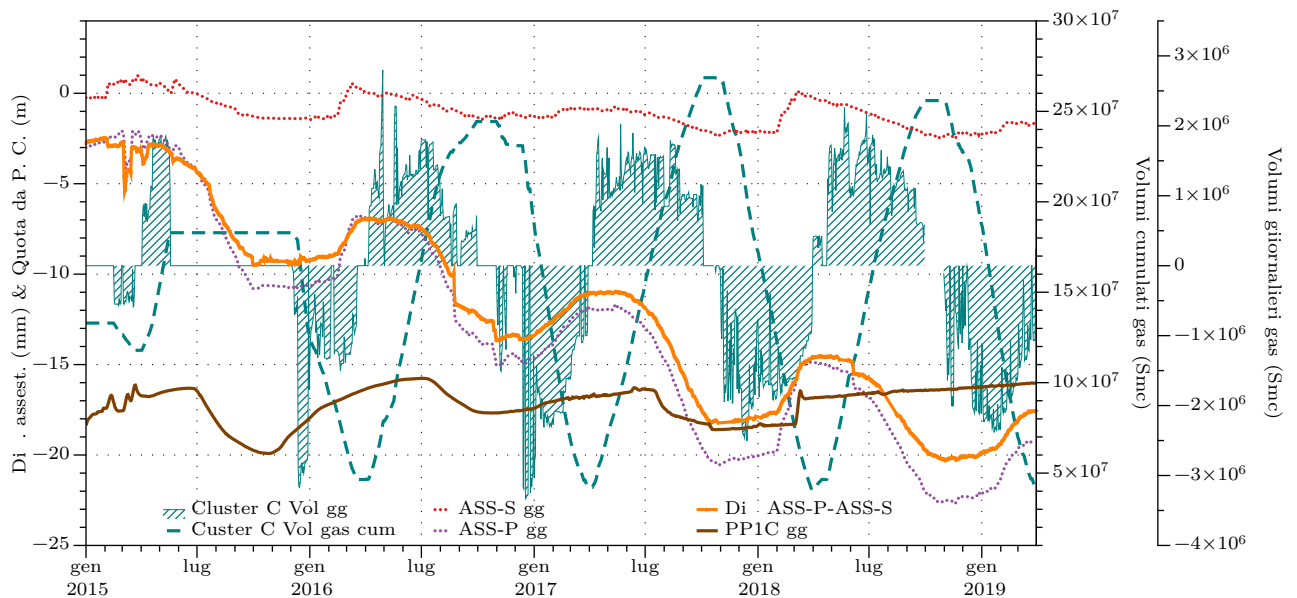


Figura 5.1: Andamento degli strumenti profondi in relazione alla movimentazione di gas nel reservoir del Cluster-C per tutto il periodo di monitoraggio. In arancio la curva che descrive la componente profonda della deformazione, ottenuta dalla differenza degli spostamenti di ASS-P meno quelli di ASS-S.

movimentati. Non evidenzia però 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, nell'ultimo anno e a partire da marzo 2018, l'andamento delle quote piezometriche non compie il "solito" abbassamento a partire da luglio e la successiva risalita nei mesi invernali. Questa variazione non appare al momento correlata all'andamento dei volumi nel cluster (le quote dovrebbero risentire della variazione delle fasi di iniezione ed erogazione). A seguito di un intervento di manutenzione già in programma ad aprile 2019 e proseguendo con il monitoraggio, si potrà meglio descrivere se si tratta di un fenomeno anomalo o meno.

In questo semestre, non si evidenziano sostanziali variazioni riguardo la compattazione dei sedimenti profondi (350 m, curva arancio in Fig. 5.1: risalita della curva = dilatazione, discesa della curva = compattazione). Si conferma un trend di compattazione inversamente correlato all'andamento dei volumi nel cluster, che mostra oscillazioni di ampiezza confrontabili con gli intervalli già misurati per i precedenti semestri di monitoraggio. Le dilatazioni e le compattazioni della colonna sedimentaria al di sopra del reservoir possono, in teoria, essere

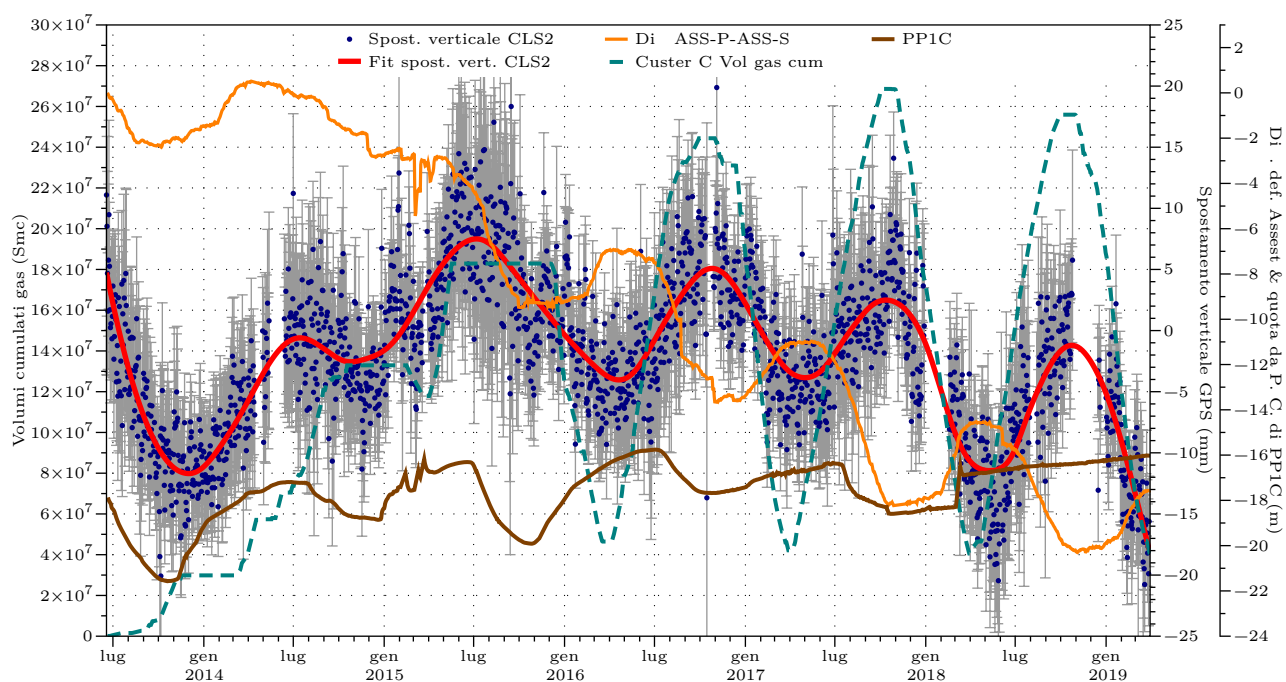


Figura 5.2: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS (componente verticale; nel sistema di riferimento Igb08) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con l'andamento del piezometro profondo e con quello della differenza tra le misure degli assestimetri.

inversamente legate all'attività di stoccaggio per perturbazione poroelastica indotta (dilatazione del reservoir e della colonna a seguito di erogazione dal reservoir e compattazione a seguito di iniezione nel reservoir). Tuttavia, le oscillazioni, qui correlate inversamente alla movimentazione dei volumi, non mostrano una proporzionalità chiara 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, l'andamento verticale della serie GPS (punti blu e linea rossa in figura 5.2) segue i cambi di attività dello stoccaggio (iniezione/erogazione): da ottobre 2018 a fine marzo 2019, l'antenna GPS registra un abbassamento massimo di 25 mm (15 mm in media, curva rossa in figura 5.2) a fronte dell'erogazione di ≈ 214.3 Msmc dal Cluster-C. Questo abbassamento risulta simile ad abbassamenti misurati in altre fasi di erogazione e non si riscontra una proporzionale correlazione tra quantitativi di gas movimentati e l'ampiezza dei sollevamenti/abbassamenti registrati dalla componente verticale del GPS sul Cluster-C. E' da sottolineare come tali oscillazioni (abbassamenti/innalzamenti della quota topografica) siano comunque confrontabili (in termini di massimi e minimi) con quelle di altre stazioni ritenute stabili e non influenzate da dinamiche antropiche, quali la stazione GPS FERA di Ferrara (Fig. 5.3).

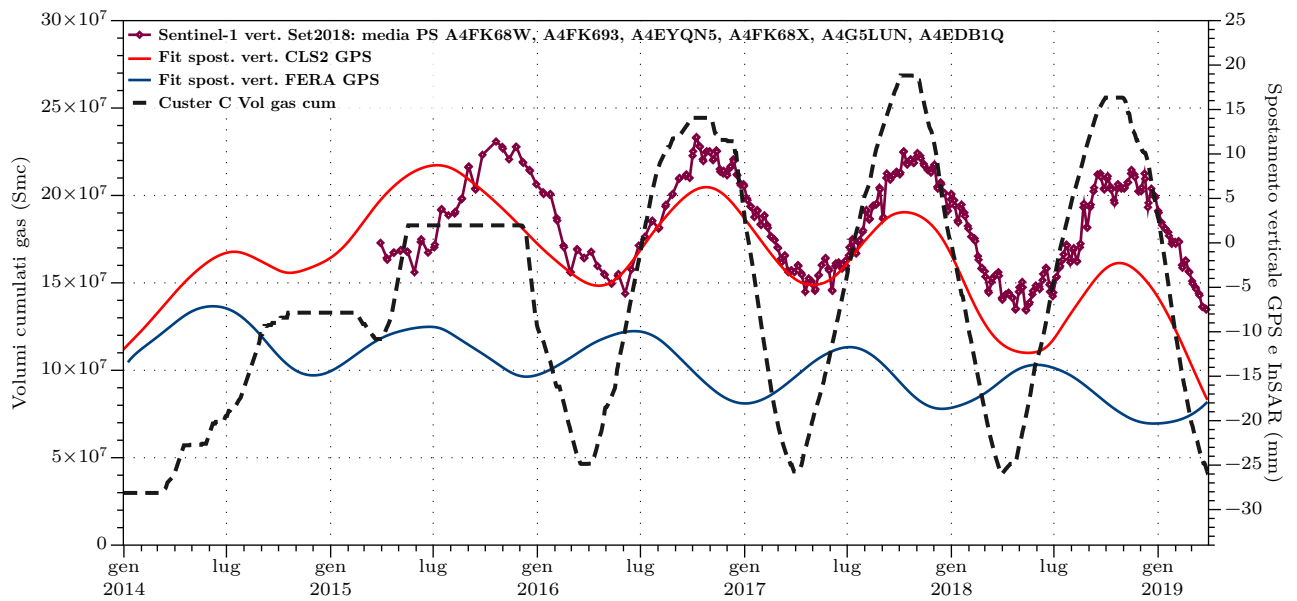


Figura 5.3: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS (componente verticale; nel sistema di riferimento IGB08) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con la serie Sentinel-1 a settembre 2018 e con la serie temporale GPS della stazione FERA.

Il confronto tra l'andamento dell'antenna GPS e le serie InSAR evidenzia un buon accordo tra gli spostamenti 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 una leggera discrepanza in termini assoluti:

- l'antenna GPS registra un massimo movimento di - 25 mm nel semestre (scarto valore massimo – valore minimo nel semestre), a fronte di una media di circa - 15 mm;
- il solo PS A4EDB1Q posizionato tra i pozzi centrali del campo registra un massimo movimento di -27 mm (scarto valore massimo – valore minimo nel semestre), a fronte di una media di circa -15 mm per tutto gruppo di 6 PS individuati tra i pozzi centrali del campo (gli altri PS hanno massimo scarto tra 15 e 18 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 correlazione proporzionale 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. 5.4): essi quantificano in maniera più significativa, rispetto alla componente verticale, l'effetto subito dalla stazione CLS2 a seguito della movimentazione di gas, poiché quasi non affetti da oscillazioni legate alla stagionalità. Nel semestre in esame si verifica uno

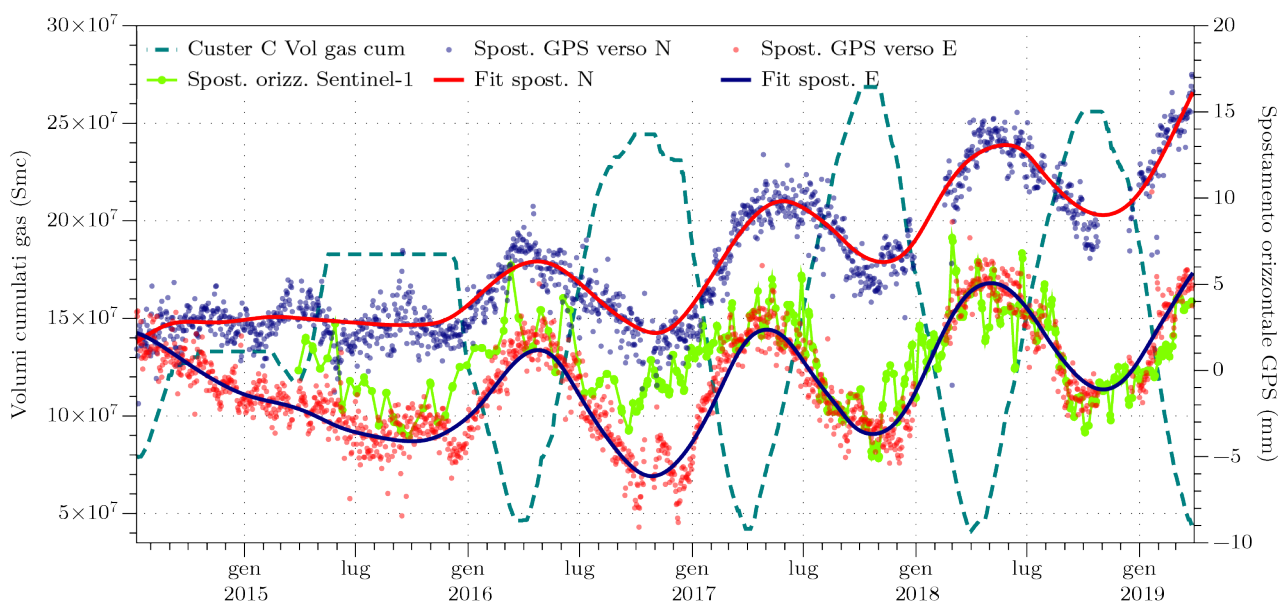


Figura 5.4: Confronto tra la serie temporale delle posizioni orizzontali della stazione GPS CLS2 con la movimentazione di gas nel Cluster-C. Gli spostamenti sono riferiti alla stazione GPS FERR di Ferrara, allo scopo di eliminare la componente crostale del moto; in rosso la componente nord e in blu la componente est; in verde lo spostamento orizzontale di bersagli radar Sentinel-1 limitrofi alla stazione CLS2.

spostamento positivo sia lungo la componente Est (6-7 mm verso est) che lungo quella Nord (7 mm verso nord): la composizione di tale moto restituisce uno spostamento che avvicina la stazione dal centro del Cluster-C di quasi 9.5 mm in direzione nord-est. Entrambe le componenti mostrano dei trend più marcati in concomitanza delle fasi di erogazione: l'antenna GPS si avvicina al centro del cluster (durante le erogazioni) più velocemente di quanto non si allontani da esso (durante le iniezioni). Tale avvicinamento viene registrato anche dai bersagli radar Sentinel-1 individuati attorno alla stazione CLS2 (Fig. 4.6, paragrafo 4.1): come si vede in figura 5.4, la serie temporale di spostamento orizzontale Sentinel-1 (curva verde) ha infatti andamento simile alla componente est della serie GPS (punti blu e curva fit rossa).

6 Conclusioni

A fine marzo 2019, la strumentazione installata presso il Cluster-C continua ad essere funzionante.

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 (5.5 anni). La stima della componente verticale degli spostamenti della serie GPS restituisce valori con velocità media in leggero abbassamento di ≈ -0.195 mm/anno, da inizio monitoraggio. Gli spostamenti nella componente verticale mostrano andamento correlabile con l'erogazione cumulata tra ottobre 2018 e marzo 2019 (≈ -15 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 componenti orizzontali della serie si correlano anch'esse con l'attività di erogazione, registrando uno spostamento verso NE di ≈ 9.5 mm (6.5 mm E; 7 mm N), in avvicinamento verso il centro del Pool CC1 (Cluster-C).

La nuova stazione GNSS SP12 funziona da 4 mesi e mezzo ed anche i suoi valori di MP1 e MP2 sono in linea con gli standard IGS di una stazione di buona qualità. La 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.

Le nuove serie temporali di interferometria, prodotte dall'elaborazione di scene acquisite nell'intervallo temporale 30/03/2015 - 27/03/2019 dal satellite Sentinel-1, evidenziano per il semestre in esame un abbassamento verticale massimo di -15 - -16 mm, all'interno del Cluster-C, sopra il centro del giacimento.

La componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia spostamenti orizzontali che "avvicinano" i PS al centro del Cluster-C (≈ 8 mm per punti posti a ridosso della stazione GPS CLS2 e fino a 10 mm verso il centro sia per i punti situati nella zona occidentale, che per quelli localizzati nella zona orientale del cluster).

I dati di interferometria ben si correlano con i trend delle misurazioni dell'antenna GPS installata 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 tra i movimenti del terreno e la movimentazione di gas nel sottosuolo; tuttavia non si trova un nesso causa-effetto in quanto sia le serie interferometriche, che quelle GPS, mostrano in questo semestre variazioni di entità simile a quelle verificatesi in periodi di non movimentazione di gas.

Sul Cluster-B, in concomitanza con l'attività di erogazione dell'ultimo semestre (ottobre 2018 - marzo 2019) si osserva una area in subsidenza con valori medi tra i -6 e -8 mm, localizzata nella parte sud-orientale del

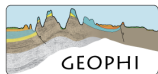
reservoir. Al momento, si esclude però una correlazione causa-effetto tra movimentazione del gas e deformazione, in quanto le oscillazioni della superficie topografica "anticipano" di circa un mese e mezzo le variazioni di volume di gas nel Cluster B. Le componenti orizzontali non evidenziano trend deformativi 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 erogazione 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 ottobre 2018 - marzo 2019 un innalzamento lieve delle quote, in controtendenza con l'erogazione di gas, ed in maggiore accordo con le variabili idrogeologiche (dilatazione invernale/primaverile).

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'assestometro 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 $\approx - 3.5$ mm/anno, con dinamiche di deformazione correlate temporalmente con le fasi di iniezione/erogazione; non si riscontra una correlazione quantitativa di tali deformazioni, poiché quelle registrate hanno ampiezze non proporzionali al quantitativo di gas in posto nel reservoir. La ciclicità delle deformazioni dello strumento si correla meglio alle dinamiche idrogeologiche stagionali della colonna di sedimenti investigata.

L'andamento general delle quote da piano campagna del piezometro profondo conferma il trend di risalita finora osservato e pertanto in accordo con l'ipotesi di una possibile compattazione indotta. Tuttavia la dinamica delle oscillazioni appare invece chiaramente influenzate dai fattori idrogeologici stagionali. Si segnala che nell'ultimo anno 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 31 marzo 2019; tale innalzamento ha andamento rettilineo e non sinusoidale come negli anni precedenti. Questo andamento risulta ancora più 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

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.

Blewitt, G., and D. Lavallee (2002), Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107(B7), 2145, doi:10.1029/2001JB000570.