

SUBSURFACE  
GEOLOGY AND  
GEOPHYSICS

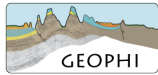


**Analisi integrata delle misure di deformazione superficiale  
allo scopo di analizzare i fenomeni di subsidenza dell'area  
di San Potito - Cotignola  
Aggiornamento a Settembre 2018**

Redatto da A. Ponza ed F. L. Guido

verificato da Vincenzo Picotti

Bologna 21 febbraio 2019



## Indice

<b>Executive Summary</b>	<b>3</b>
<b>1 Attività di stoccaggio dal 1 aprile al 30 settembre 2018</b>	<b>6</b>
<b>2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2018</b>	<b>9</b>
2.1 Quality check . . . . .	9
2.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni . . . . .	10
<b>3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità</b>	<b>14</b>
3.1 Piezometri . . . . .	14
3.2 Assestimetri . . . . .	16
<b>4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Coti- gnola</b>	<b>18</b>
4.1 Analisi delle serie interferometriche sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas . .	18
4.2 Analisi delle serie interferometriche sul Cluster-A in relazione alla movimentazione di gas . . . .	24
<b>5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas</b>	<b>27</b>
<b>6 Conclusioni</b>	<b>31</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>32</b>

## 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 l'undicesimo rapporto relativo all'analisi, all'interpretazione e all'integrazione tra le differenti tipologie di dati monitorati fino alla fine di settembre 2018. 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 2018, la strumentazione installata presso l'impianto del Cluster-C continua ad essere funzionante.

Dal Cluster A sono stati erogati  $\approx 6.1$  MSmc nel periodo 1-15/4/2018; successivamente sono stati iniettati circa 77.9 MSmc tra il 24-4 ed il 30-9 2018.

Nel Cluster B sono stati iniettati  $\approx 31.7$  Msmc tra il 21-5 ed il 30/9/2018.

Nell Cluster C sono stati iniettati complessivamente  $\approx 215.5$  Msmc nei periodi 1-15/4/2018 (5.9 MSmc) e 24/4 – 30/9/2018 (209.5 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 a compattazione della colonna stratigrafica. 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, ma non in termini quantitativi: le deformazioni registrate hanno infatti ampiezze non proporzionali al quantitativo di gas in posto nel reservoir. L'andamento delle quote nel piezometro profondo conferma il trend di risalita finora osservato, con dinamiche di oscillazione delle quote legate a fattori meteorologici stagionali.

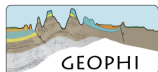
Le misurazioni dello spostamento del suolo, condotte tramite l'antenna GPS sul Cluster-C e tramite l'interferometria satellitare su tutta l'area della concessione, mostrano nel semestre di iniezione in esame, un trend di sollevamento nell'area del Cluster-C e del Cluster-B. Lungo il Cluster-A si registrano 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 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 anni). Gli spostamenti nella componente verticale (+ 12 mm in media) mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2018, anche se i valori delle oscillazioni non si discostano da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni legati alle dinamiche meteorologiche stagionali. Le componenti orizzontali della serie si correlano anch'esse con l'attività di stoccaggio, registrando uno spostamento orizzontale ( $\approx 9 - 10$  mm) che "allontana" la stazione GPS dal centro del Pool CC1.

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 sollevamento all'interno del Cluster-C, con valori fino a + 17.5 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 ( $\approx 11 - 12$  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 una area in sollevamento 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 aprile al 30 settembre 2018

Nella concessione di stoccaggio San Potito-Cotignola, nel semestre in esame (apr-sett 2018) sono stati erogati  $\approx 6,1$  MSmc durante le prime due settimane di aprile 2018 dal cluster A; sono stati invece iniettati complessivamente 324992794 ( $\approx 325$  MSmc), così suddivisi nei differenti cluster:

### Cluster A

Erogazione di 6105777 Smc ( $\approx 6.1$  MSmc) tra il 1/4 ed il 15/4; Iniezione di 77913122 Smc ( $\approx 77.9$  MSmc) tra il 24/4 ed il 30/9/2018.

### Cluster B

Iniezione di 31693437 Smc ( $\approx 31.7$  MSmc) (media giornaliera 238296.5) tra il 21/5 ed il 30/9/2018.

### Cluster C

Iniezione di 5904422 Smc ( $\approx 5.9$  MSmc) (36906 media giornaliera) tra il 1/4 ed il 15/4; Iniezione di 209481813 Smc ( $\approx 209.5$  Smc) (1309261 media giornaliera) tra il 24/4 ed il 30/9/2018; Iniezione totale di 215386235 Smc ( $\approx 215.5$  MSmc).

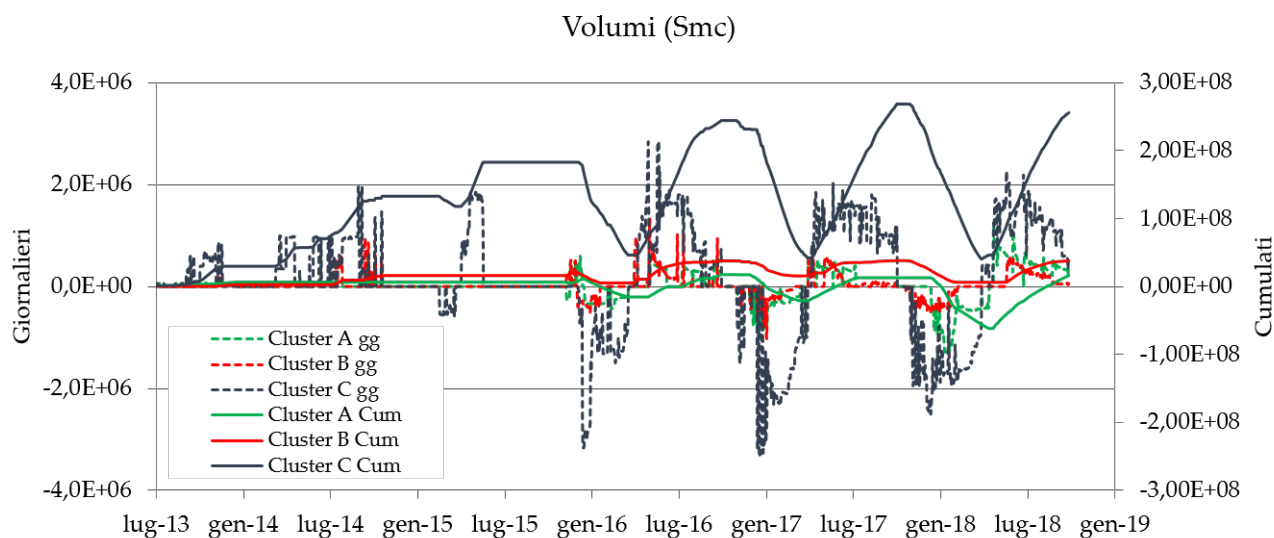


Figura 1.1: Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra

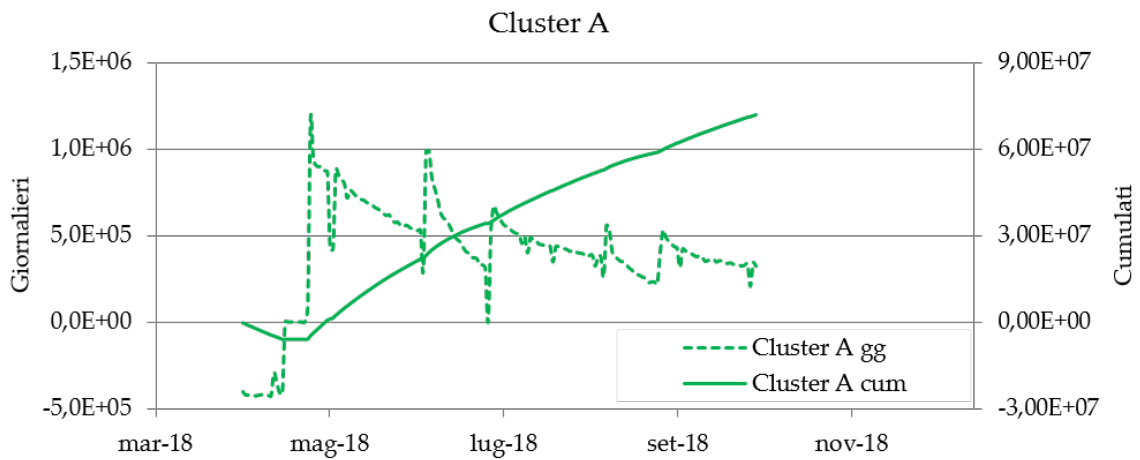


Figura 1.2: Cluster A. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Erogazione di 6105777 Smc ( $\approx 6.1$  MSmc) tra il 1/4 ed il 15/4; iniezione di 77913122 Smc (circa 77.9 MSmc) tra il 24/4 ed il 30/9/2018.

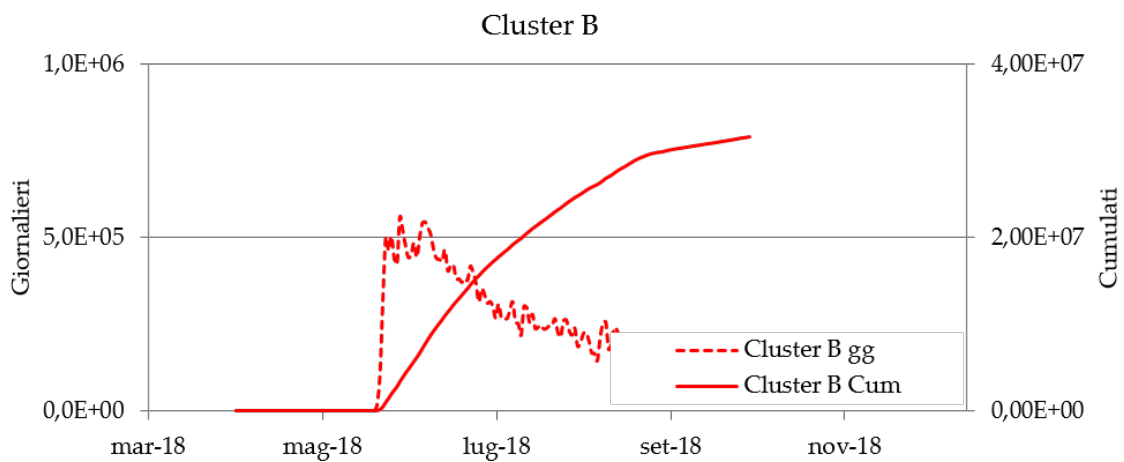


Figura 1.3: Cluster B. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Iniezione di 31693437 Smc ( $\approx 31.7$  MSmc) (media giornaliera 238296.5) tra il 21/5 ed il 30/9/2018.

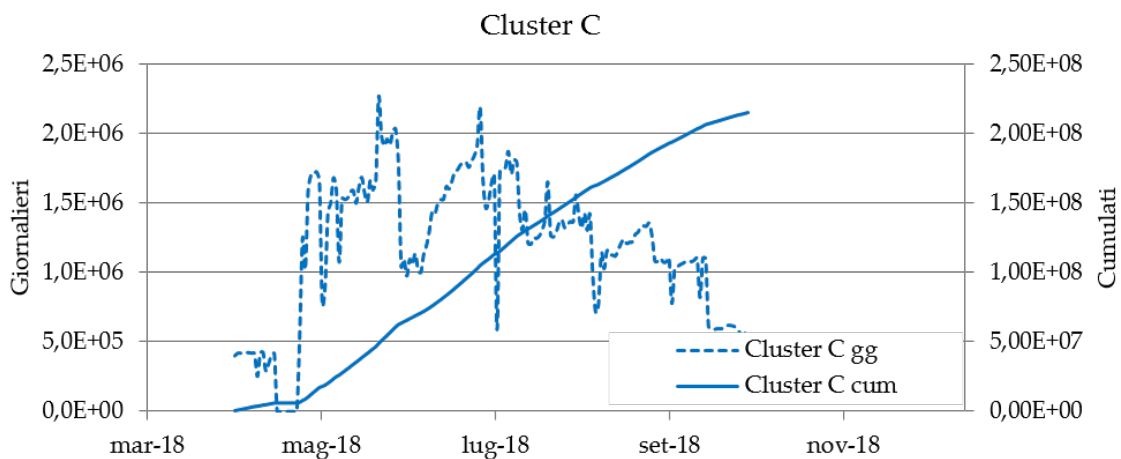


Figura 1.4: Cluster C. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Iniezione di 5904422 Smc ( $\approx 5.9$  MSmc) (media giornaliera 36906) tra il 1/4 ed il 15/4; iniezione di 209481813 Smc ( $\approx 209.5$  Smc) (media giornaliera 1309261) tra il 24/4 ed il 30/9/2018; iniezione totale di 215386235 Smc ( $\approx 215.5$  MSmc.)

## 2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2018

La serie temporale delle posizioni della stazione CLS2 è stata aggiornata attraverso l'analisi dei dati giornalieri fino alla data del 25 ottobre 2018 (Day of Year 2018/304), ovvero poco oltre la data di interruzione dell'iniezione. E' stata inoltre aggiornata la serie temporale degli indici di qualità della stazione (MP1, MP2) fino a tale data. La serie temporali delle stazioni analizzate sono state determinate nel sistema di riferimento ITRF2014 (<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>). Per tutto il semestre in esame, la stazione ha acquisito dati regolarmente processabili, a differenza di quanto avvenuto ad inizio 2018.

### 2.1 Quality check

I dati RINEX giornalieri della stazione CLS2 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 30 settembre 2018, data di interruzione dell'attività di iniezione. 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 (fino circa a dicembre) che si abbassano e stabilizzano nel periodo successivo (seppur in presenza di qualche picco) in linea con i valori indicati dall'IGS per una stazione di buona qualità. Nel

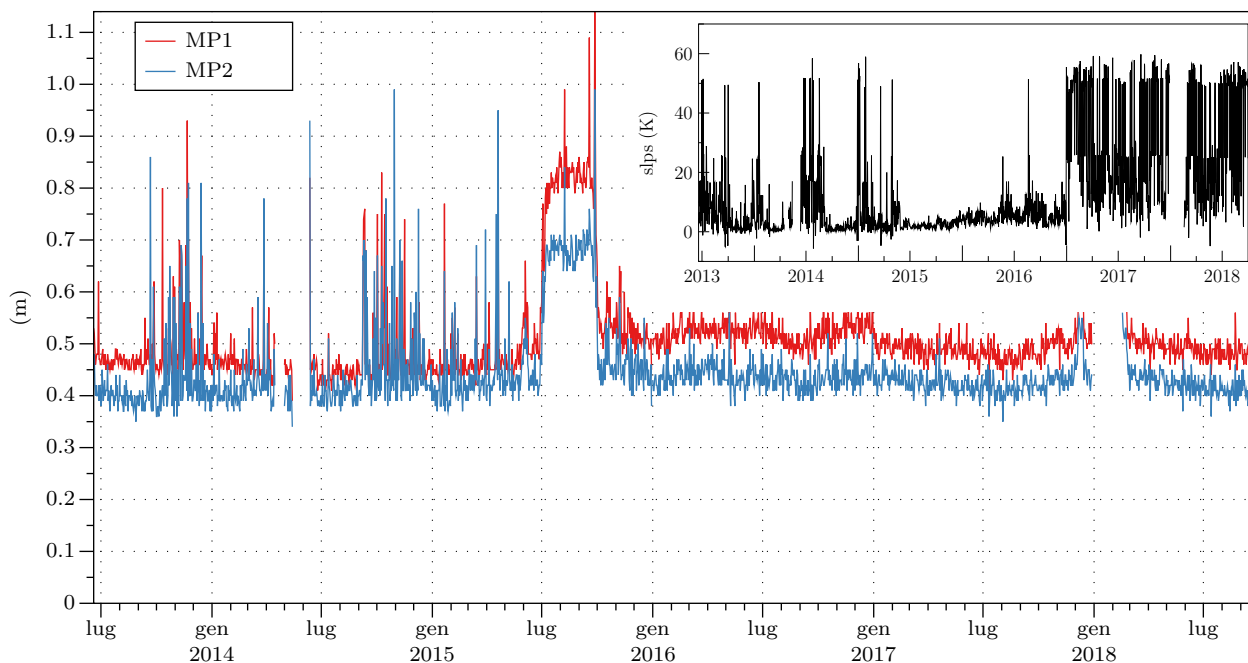


Figura 2.1: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione CLS2 fino al 30 settembre 2018.

semestre primaverile - estivo in esame i valori di MP1 e MP2 restano sempre al di sotto degli 0.46 m e 0.53 m, rispettivamente.

## 2.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni

A settembre 2018, in occasione di un aggiornamento del software di processing, è stata rivista anche la rete di inquadramento utilizzata per CLS2, che è ad oggi costituita da 22 stazioni. I dati RINEX giornalieri registrati dallo strumento della stazione CLS2 sono stati interamente ri-processati (a partire dall'inizio delle acquisizioni nel 2013) con il software scientifico GAMIT 10.7 assieme a quelli registrati dalle altre 21 stazioni afferenti a diverse reti GPS/GNSS permanenti in Emilia-Romagna, Italia settentrionale ed Europa. Successivamente, le soluzioni giornaliere, debolmente vincolate, ottenute con il software GAMIT sono state inquadrate nel sistema di riferimento ITRF14 attraverso il software GLOBK, utilizzando le stazioni di riferimento incluse nel processamento (MEDI, MATE, NOT1, GRAZ, ZIMM, WTZR, SOFI, MDVJ, TRO1, AJAC, GRAS).

La nuova stima delle coordinate della stazione CLS2 nel sistema di riferimento ITRF2014, riportate al 25/10/2018 (decimal year 2018.8178), restituisce:

X: 4468303.03277 (m) Y: 943210.62203 (m)

Lat.: N 44° 22' 16.456502" Lon.: E 11° 55' 10.336902"

Z: 4437714.13590 (m) Quota: 60.76480 (m)

Le figure 2.2 e 2.3 mostrano l'andamento delle posizioni nel tempo, per la componente est, nord e verticale della stazione CLS2, nel sistema di riferimento ITRF2014 (2.2) e in un sistema di riferimento locale Adria-fixed (2.3), 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.  $-26.56^\circ$  E., Lat.  $61.95^\circ$  N e velocità di rotazione  $0.521^\circ$  /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 associate incertezze) delle componenti annuali e semi annuali (in mm) ottenute analizzando la serie temporale aggiornata al 25 ottobre 2018:

- Ampiezza Annuale Est:  $2.330 \pm 0.061$  mm; Nord:  $2.017 \pm 0.070$  mm
- Ampiezza Annuale Up:  $2.945 \pm 0.225$  mm
- Ampiezza Semi-Annuale Est:  $0.696 \pm 0.061$  mm; Nord:  $0.61 \pm 0.069$  mm
- Ampiezza Semi-Annuale Up:  $1.057 \pm 0.233$  mm

Le velocità stimate per le tre componenti, E, N e Up nel sistema di riferimento ITRF2014 analizzando la serie temporale aggiornata al 25 ottobre 2018 sono (in mm/anno):

- Velocità Est:  $21.074 \pm 0.029$  (mm/anno)
- Velocità Nord:  $19.249 \pm 0.033$  (mm/anno)
- Velocità Verticale:  $0.794 \pm 0.108$  (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.



**A - Sistema di riferimento ITRF2014**

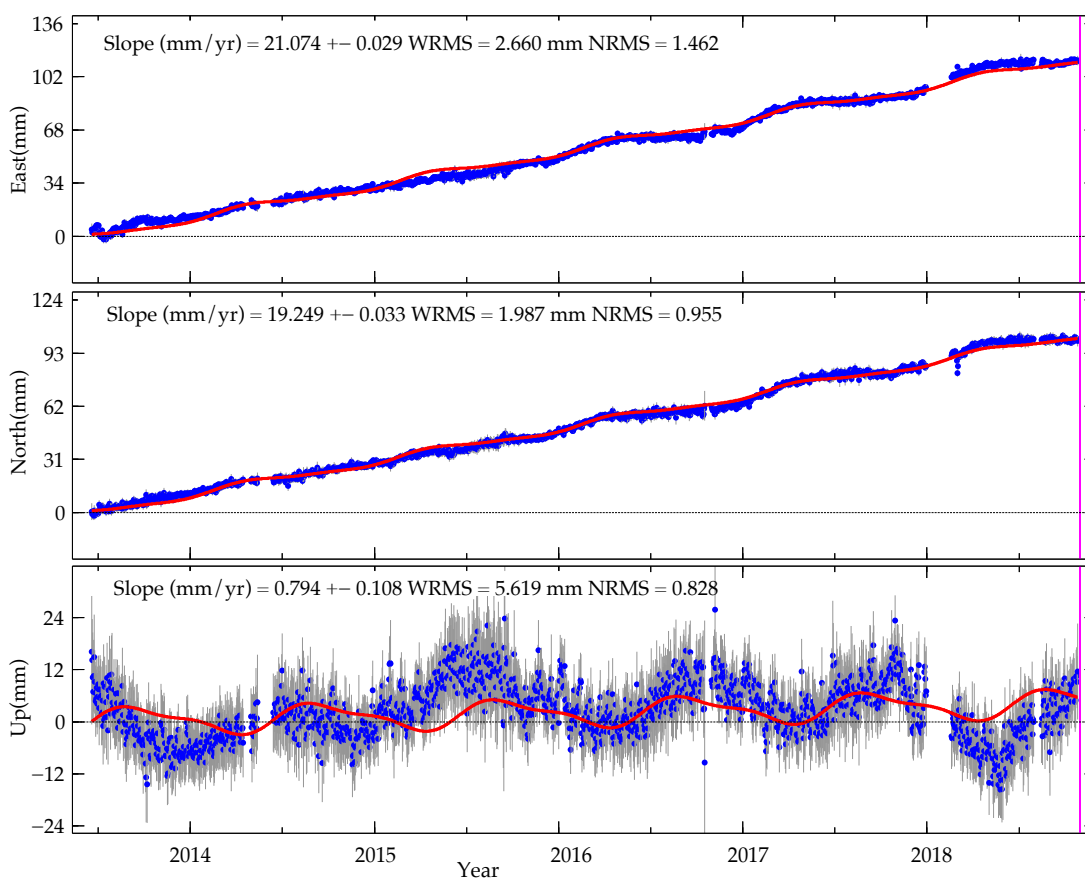
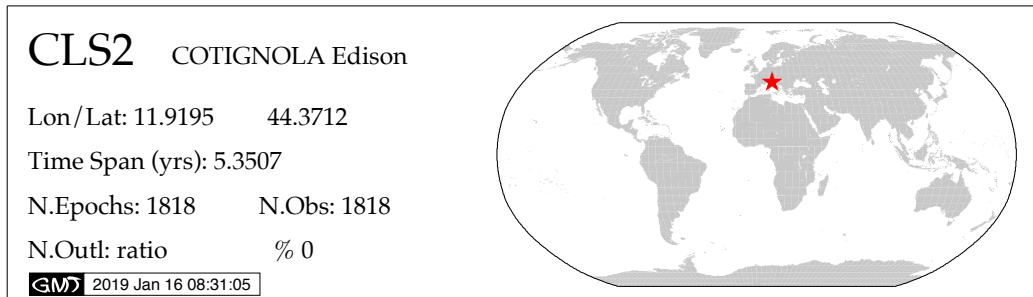


Figura 2.2: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 25 ottobre 2018, nel sistema di riferimento NNR ITRF2014. La linea rossa indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.





**B - Sistema di riferimento Adria fixed**

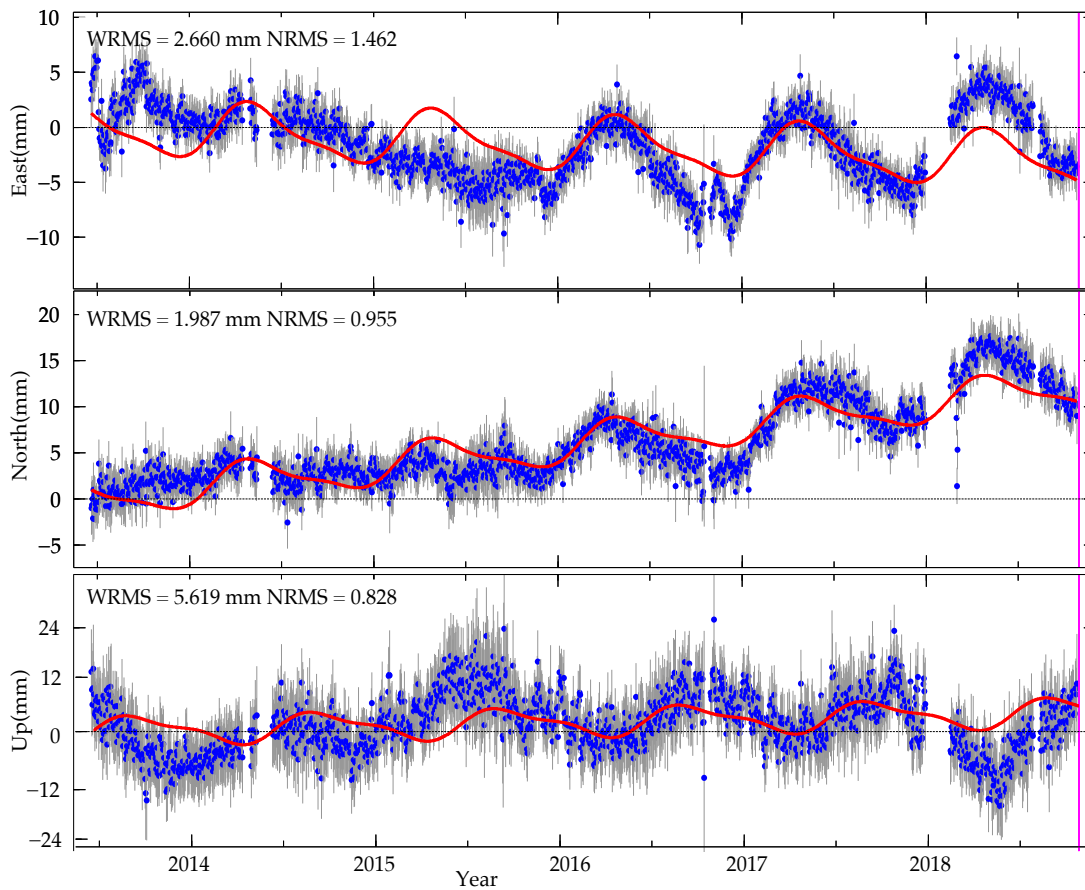


Figura 2.3: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 25 ottobre 2018, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016).

### 3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità

#### 3.1 Piezometri

Il comportamento dei piezometri superficiali nel periodo aprile - settembre 2018 ha andamento confrontabile con quanto avvenuto nei medesimi periodi degli anni precedenti, ovvero un trend di abbassamento delle quote da p.c., a partire da istanti diversi a seconda della profondità dello strumento (marzo per PS1C, aprile per PI1C), a suggerire differenti tempi di risposta delle falde alle dinamiche pluviometriche.

La quota del piezometro PS1C scende di quasi 2.5 m a partire da febbraio 2018, con un trend lineare, fino a -

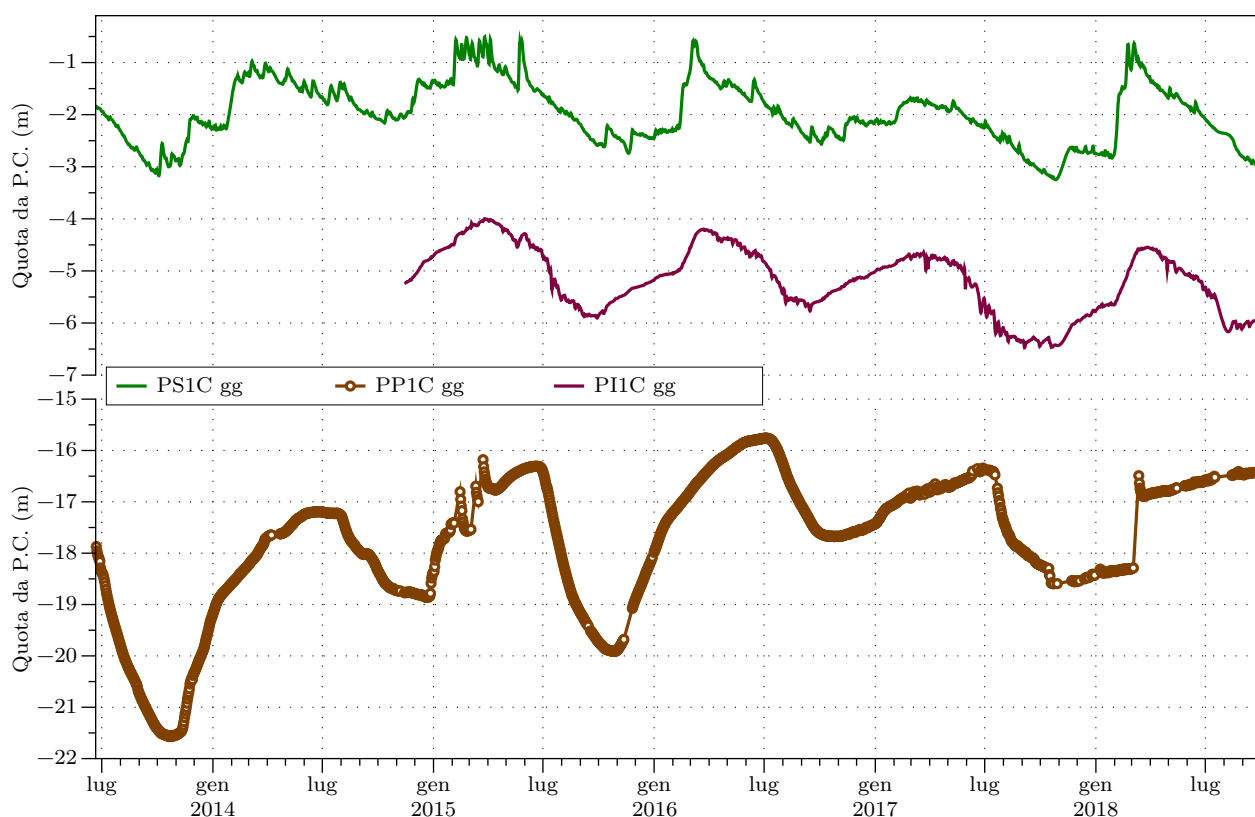


Figura 3.1: Variazioni giornaliere medie della quota dal piano campagna registrate rispettivamente nei piezometri superficiale, intermedio e profondo, compensate per la pressione atmosferica. Dal grafico sono escluse le medie con valori di deviazione standard  $\geq 0.05$ .

3 m da p.c. a fine monitoraggio.

La quota del piezometro intermedio scende di circa 1.5 m tra aprile e settembre 2018, attestandosi a circa - 6 m da p.c.. In questo trend di abbassamento, le falde investigate appaiono scarsamente influenzate dalle precipitazioni estive: si verificano infatti solo piccoli impulsi di risalita delle quote, in risposta alle precipitazioni (figura 3.2).

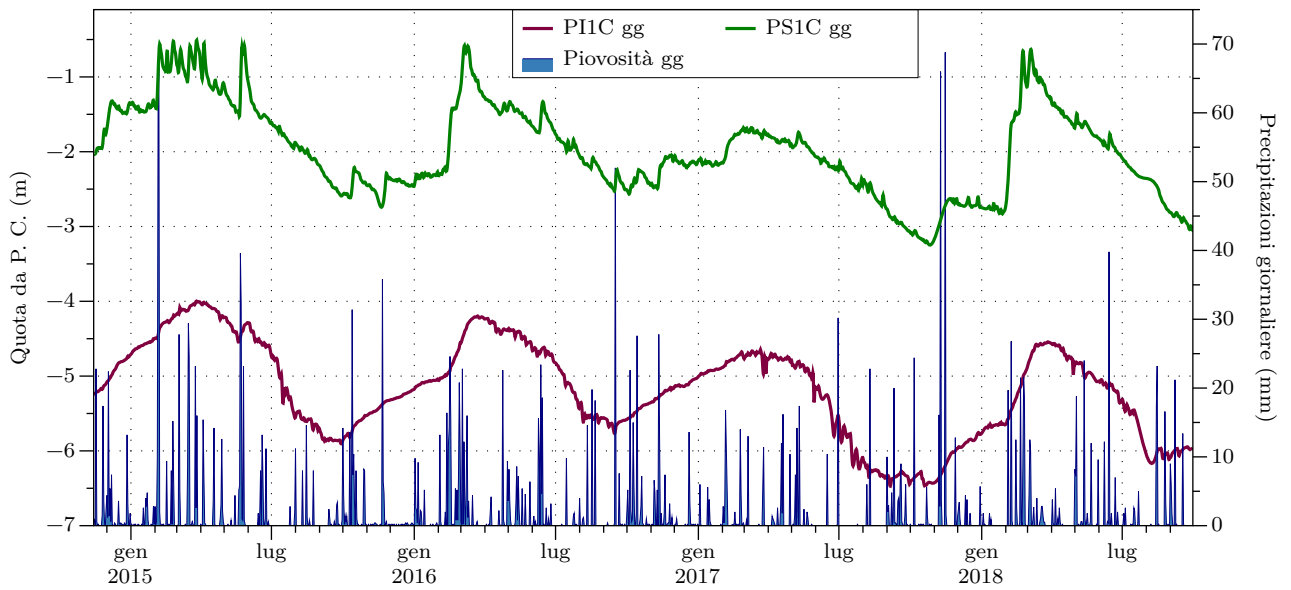


Figura 3.2: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nei piezometri superficiale e intermedio, in relazione alla piovosità giornaliera.

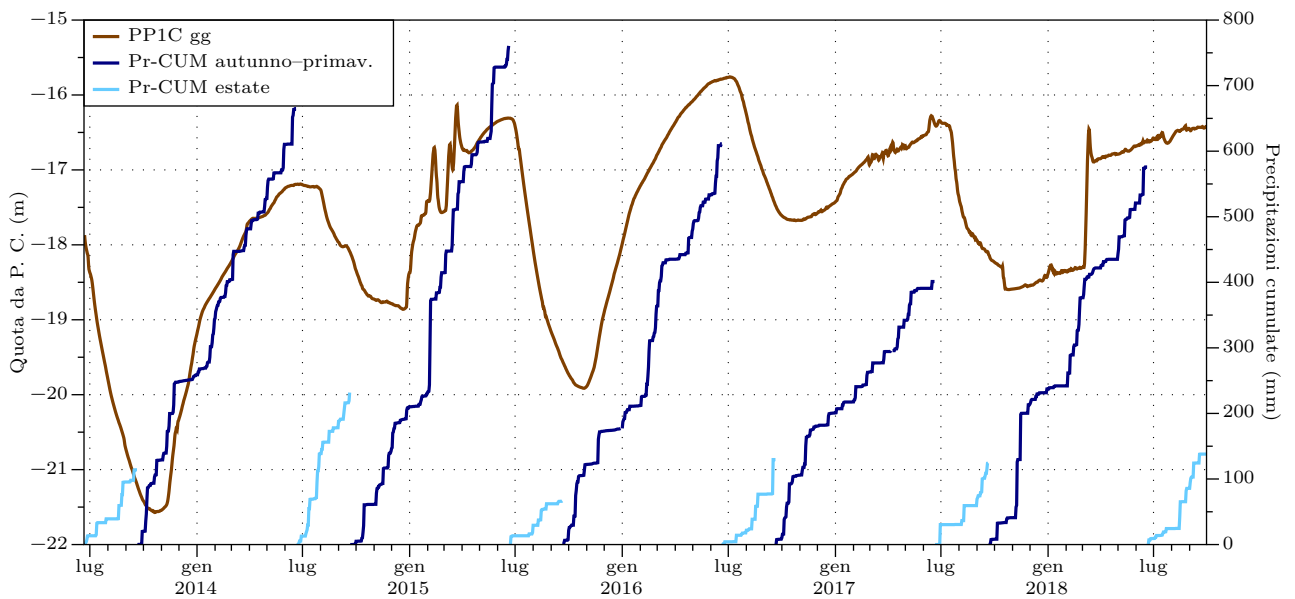


Figura 3.3: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nel piezometro profondo in relazione con le precipitazioni cumulate ogni anno. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale dello strumento, le cumulate della piovosità vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno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

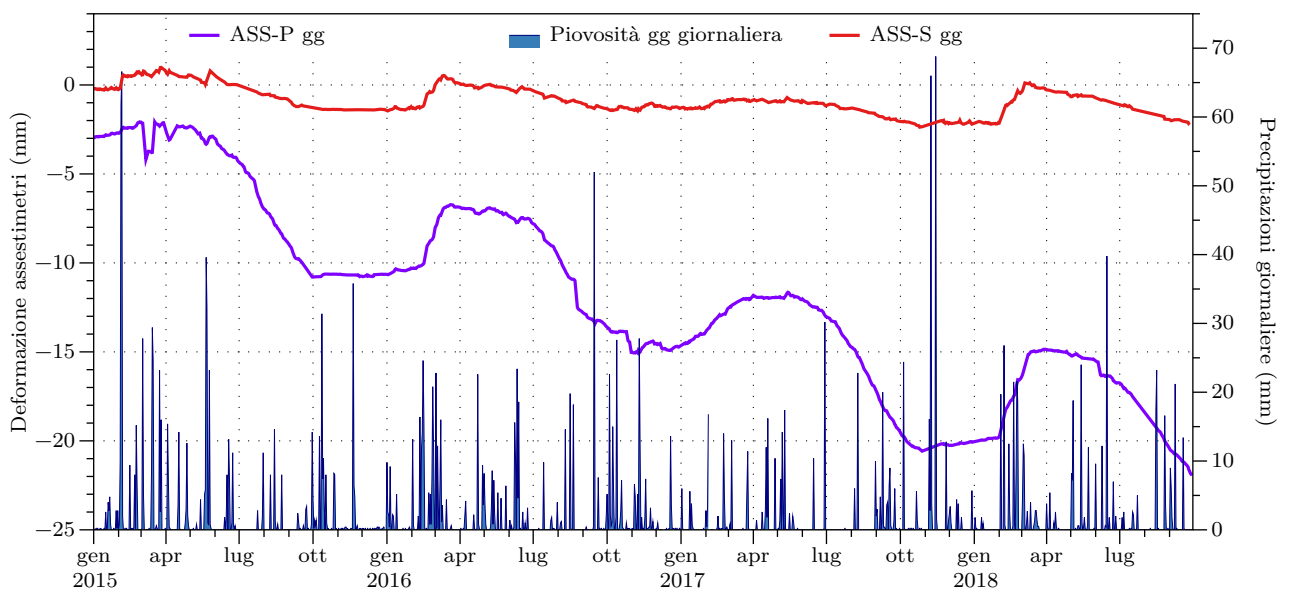


Figura 3.4: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo le aste degli assestimetri superficiale (ASS-S) e profondo (ASS-P) in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015 fino al 30 settembre 2018.

- Nel semestre in esame, i primi 11 metri di sedimento (linea rossa in figura 3.4) si sono compattati di  $\approx 2$  mm. Questa dinamica si inserisce in un trend di lievissima compattazione da inizio monitoraggio ( - 0.25 mm annui); a fine settembre 2018 lo strumento indica 2.2 mm di deformazione accumulata.
- I 350 metri di colonna sedimentaria, monitorata tramite l'assestimetro profondo (linea viola in figura 3.4) si sono compattati di  $\approx 7$  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 settembre 2018 lo strumento indica una compattazione complessiva di circa 22 mm.

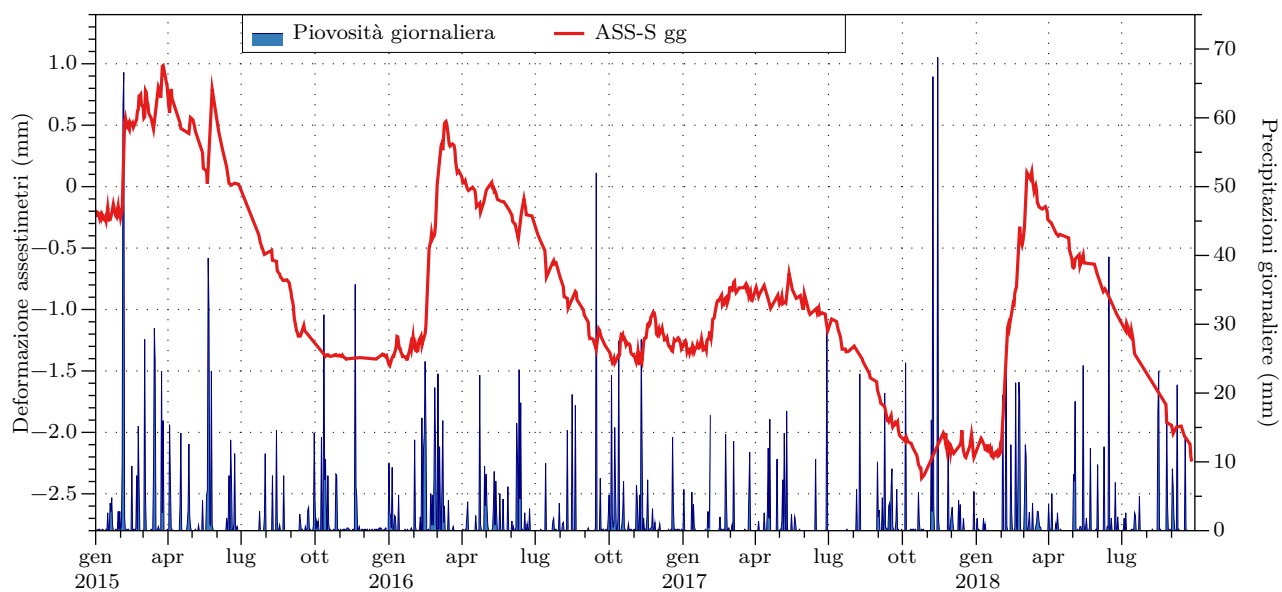


Figura 3.5: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo l'asta dell'assestimetro superficiale (ASS-S), in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015.

## 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 prodotta da TRE aggiornata ad ottobre 2018 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". "Nei Pool B e C l'ampiezza massima della stagionalità misurata per la componente verticale è risultata di circa 15 mm", TRE ALTAMIRA Cotignola RelazioneTecnica – Aggiornamento Ottobre 2018: JO17-361 – 405– REP 1.0, (2018).

I dati dell'aggiornamento ad ottobre 2018 prodotti da TRE ALTAMIRA mostrano sul giacimento una inversione

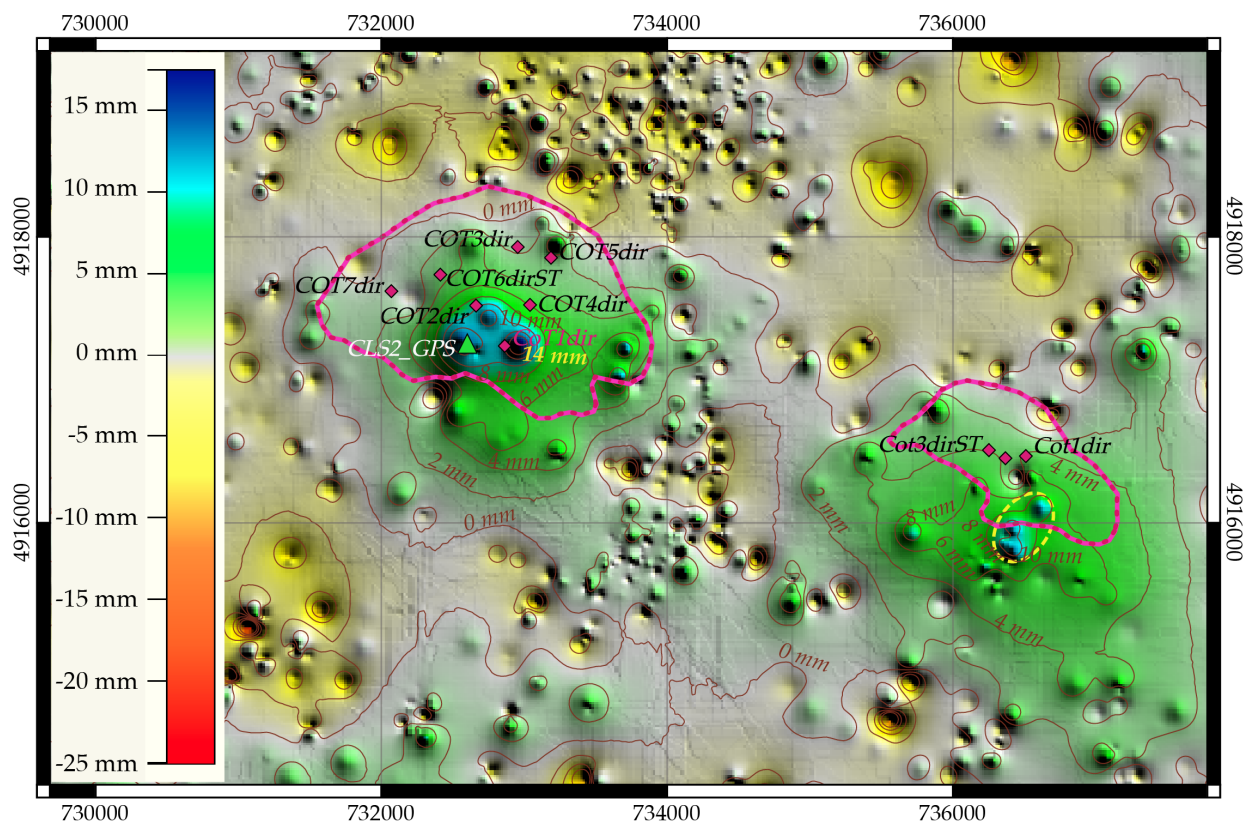


Figura 4.1: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di iniezione tra aprile e settembre 2018 (esagerazione verticale 1000x).

del trend di subsidenza della serie storica a partire da maggio, 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 centrale di quest'ultimo. La superficie che interpola gli spostamenti verticali subiti dai bersagli radar durante i 6 mesi della



fase di iniezione 2018 nei cluster B e C ( $\approx 215.5$  MSmc nel Cluster C,  $\approx 31.7$  MSmc nel Cluster B, fig. 4.1), mostra le due zone di sollevamento localizzate a ridosso dei cluster.

Al di sopra del Cluster-B si evidenzia un sollevamento areale mediamente compreso tra  $+6$  e  $+8$  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 sollevamento areale mediamente compreso tra  $+4$  e  $+14$  mm, con massimi fino a  $+17$  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).

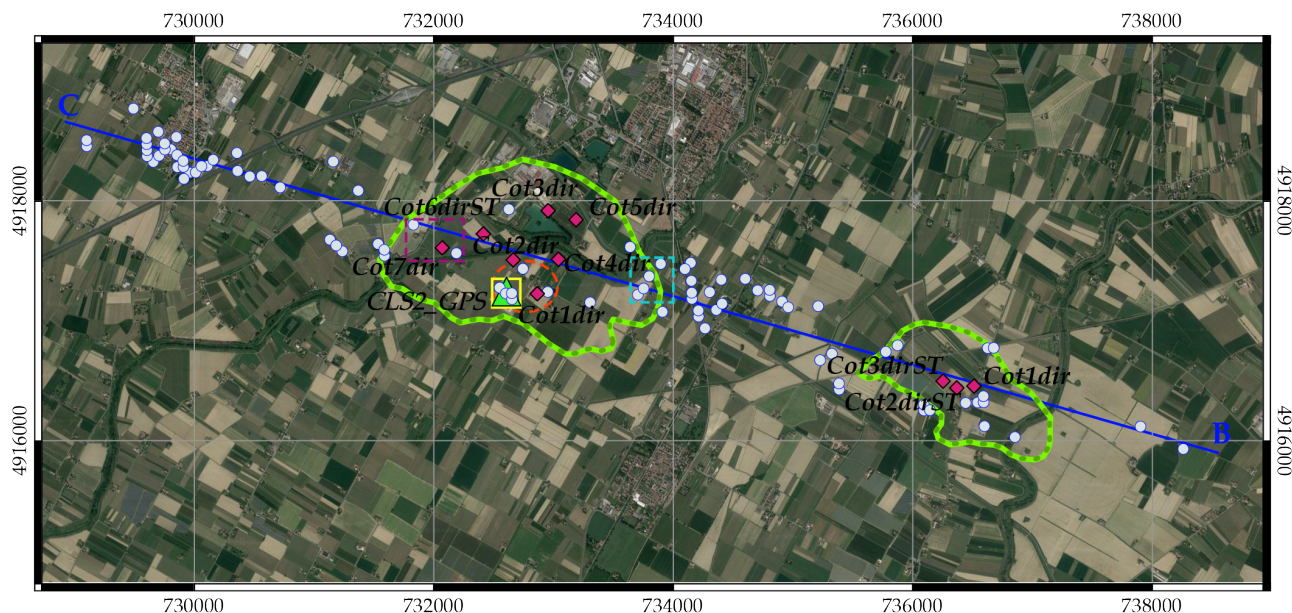


Figura 4.2: Mappa dei limiti di reservoir dei Cluster C e B; localizzazione del profilo CB (in blu) lungo il quale sono stati proiettati i bersagli radar (in bianco) che si distribuiscono attorno ad esso; il cerchio arancio al centro del Cluster-C evidenzia i bersagli radar di cui sono state analizzate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

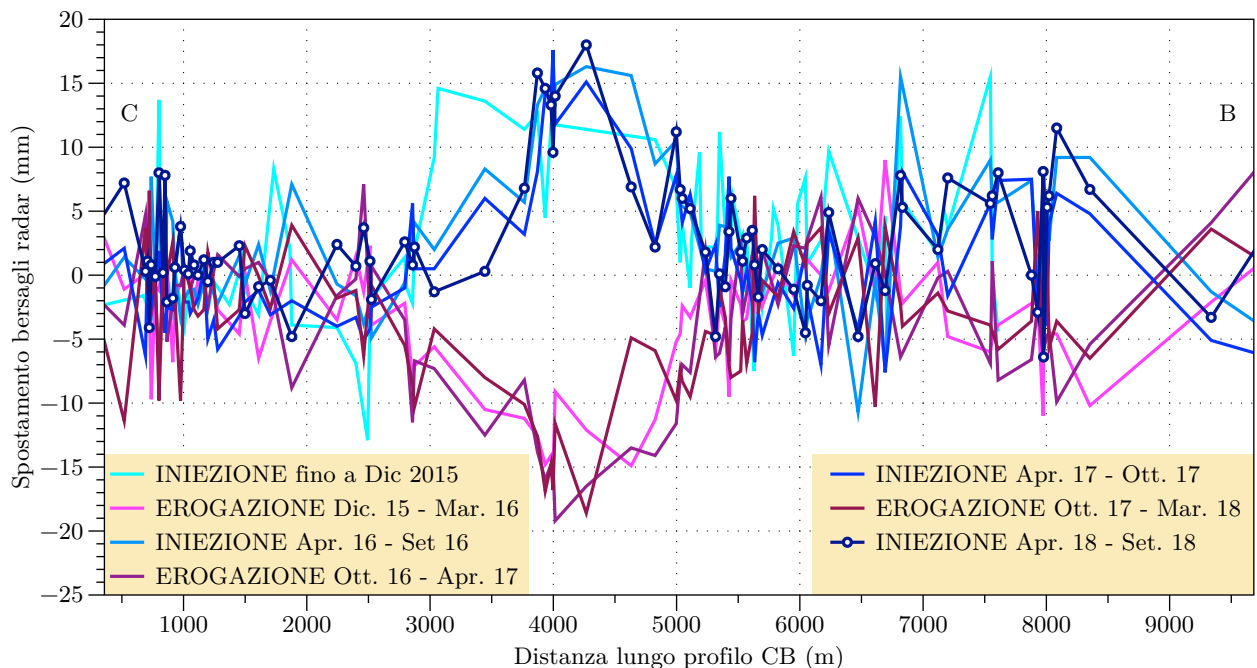


Figura 4.3: Profilo longitudinale di spostamento verticale ottenuto dai dati delle serie temporali Sentinel-1. Le curve del grafico sono costruite proiettando lungo il profilo CB, in blu nella mappa di figura 4.3, i valori di spostamento verticale dei bersagli radar (punti bianchi in mappa), che si distribuiscono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

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 4 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 aprile - settembre 2018 (curva blu con punti bianchi) si possono notare:

- un sollevamento massimo di  $\approx + 12$  mm (a fronte di 31.7 Msmc iniettati) in prossimità del centro del Cluster-B;
- un sollevamento massimo di  $\approx + 17$  mm (a fronte di  $\approx 215.5$  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 in

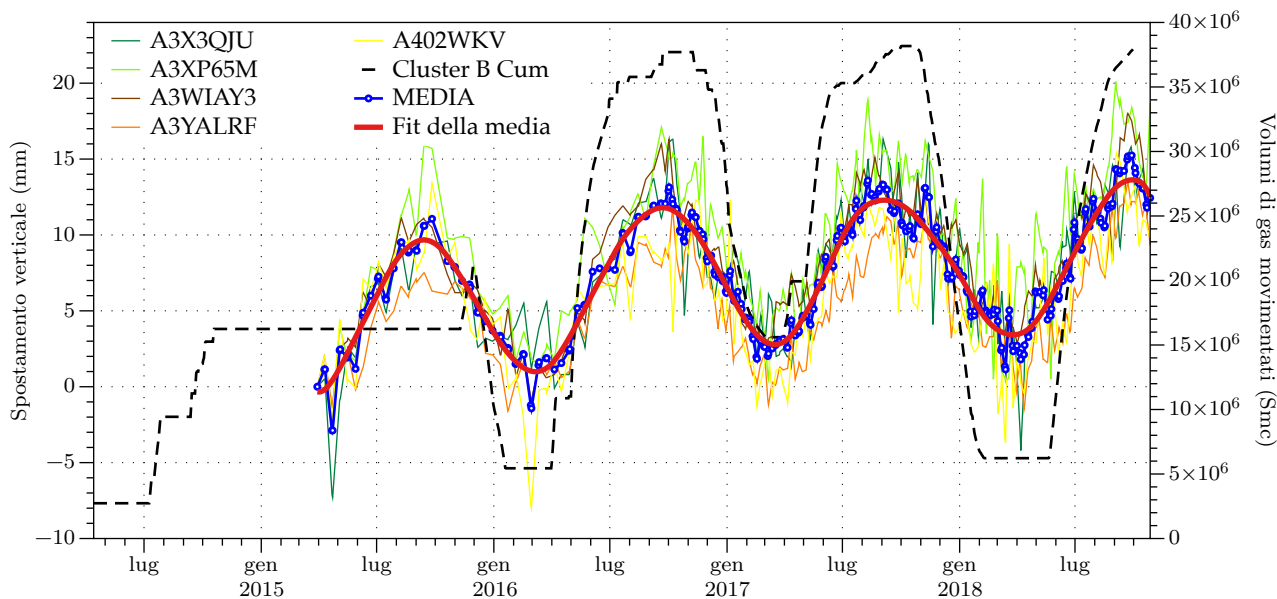


Figura 4.4: Serie temporali di spostamento verticale dei bersagli radar Sentinel-1 che hanno mostrato massimo sollevamento nel semestre aprile - settembre 2018, nella zona sud del Cluster B; in blu la media degli spostamenti; in rosso il fit della media.

un'area appena a sud del reservoir (cerchio giallo in fig. 4.1) si sollevano di oltre + 10 mm, con un massimo di + 13 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 subsidenza in favore del sollevamento (così come negli anni precedenti) avviene verso la metà di maggio, ovvero circa un mese e mezzo dopo la data di ripresa dell'iniezione (01/04/18), a differenza di quanto si verifica a inizio erogazione, laddove l'abbassamento avviene in maniera quasi "istantanea". Le serie temporali di spostamento orizzontale (Fig. 4.6) dei bersagli

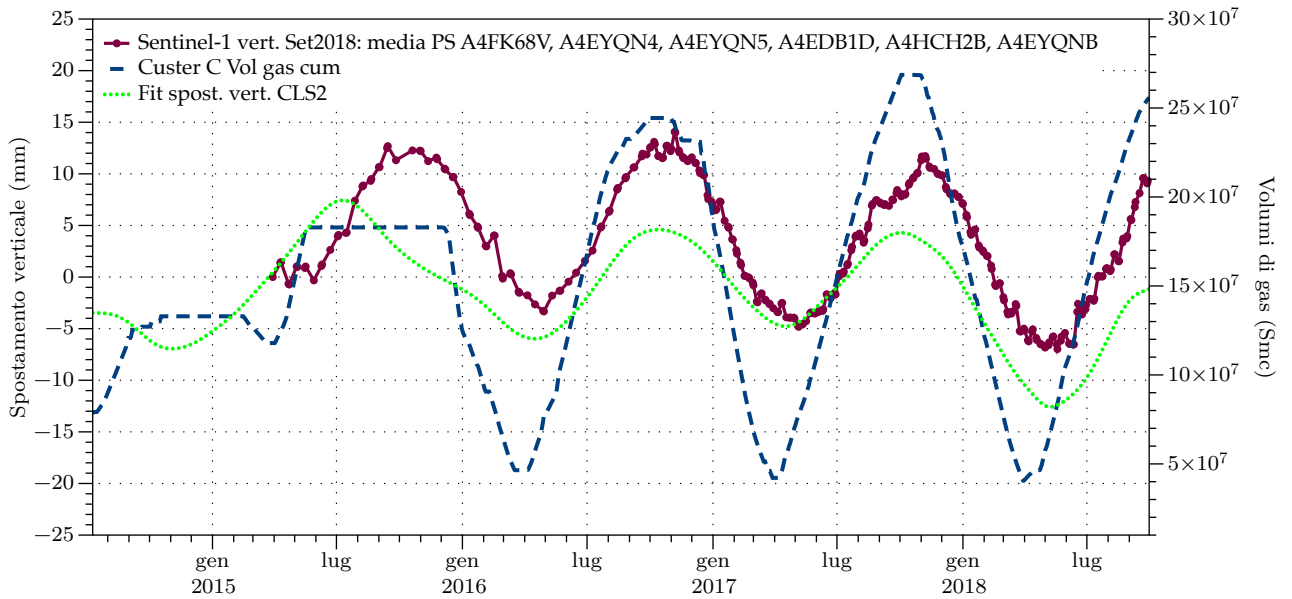


Figura 4.5: Confronto tra medie degli spostamenti verticali dei bersagli radar (mm) individuati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2), fit della serie GPS verticale CLS2 e volumi movimentati nel pool CC1.

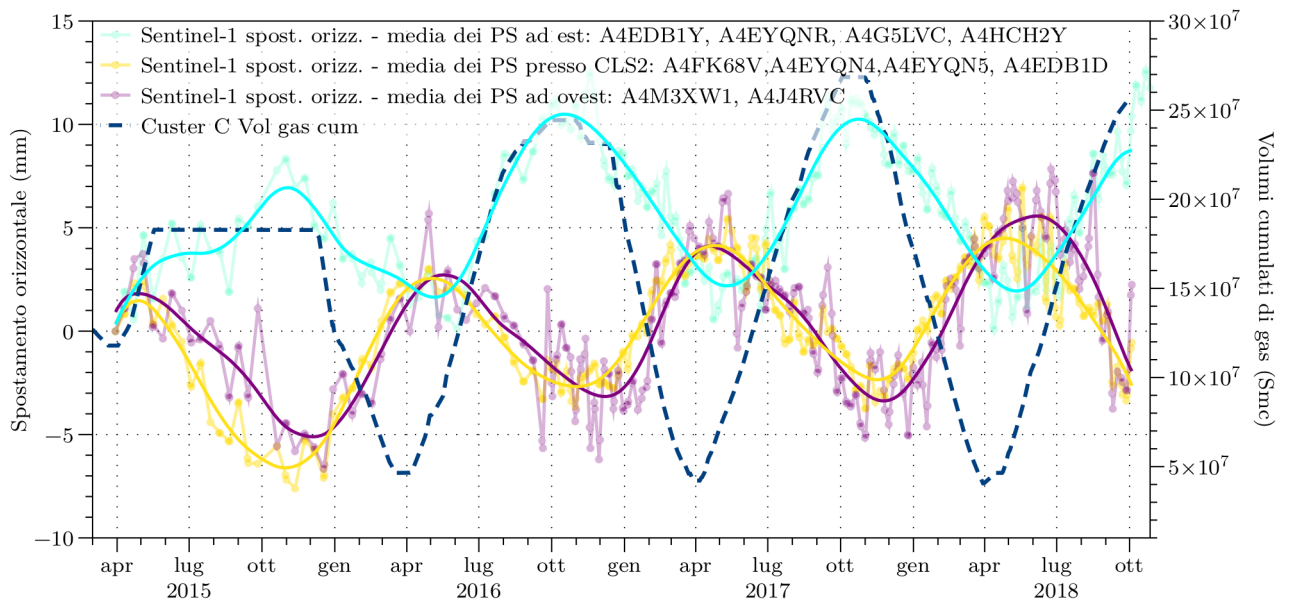


Figura 4.6: Confronto degli spostamenti orizzontali medi di gruppi di PS localizzati in zone ad est e ad ovest del centro del reservoir (box azzurro, giallo e viola in fig. 4.2); in azzurro media e degli spostamenti di PS situati ad est del centro; in giallo di PS a ridosso di CLS2; in viola di PS situati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

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  $\approx + 11$  mm, e descriva dunque un allontanamento dal centro verso est;
- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona occidentale (quadrato viola in fig. 4.2) abbia valore negativo fino a  $\approx - 12$  mm, e descriva dunque un allontanamento dal centro verso ovest;
- 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 negativi fino a  $\approx - 9$  mm, e descriva dunque un allontanamento verso ovest 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 (Cotignola e San Potito Relazione Tecnica – Aggiornamento Ottobre 2018 REF.: JO17-361 – 405– REP 1.0, 2018) "hanno evidenziato 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.

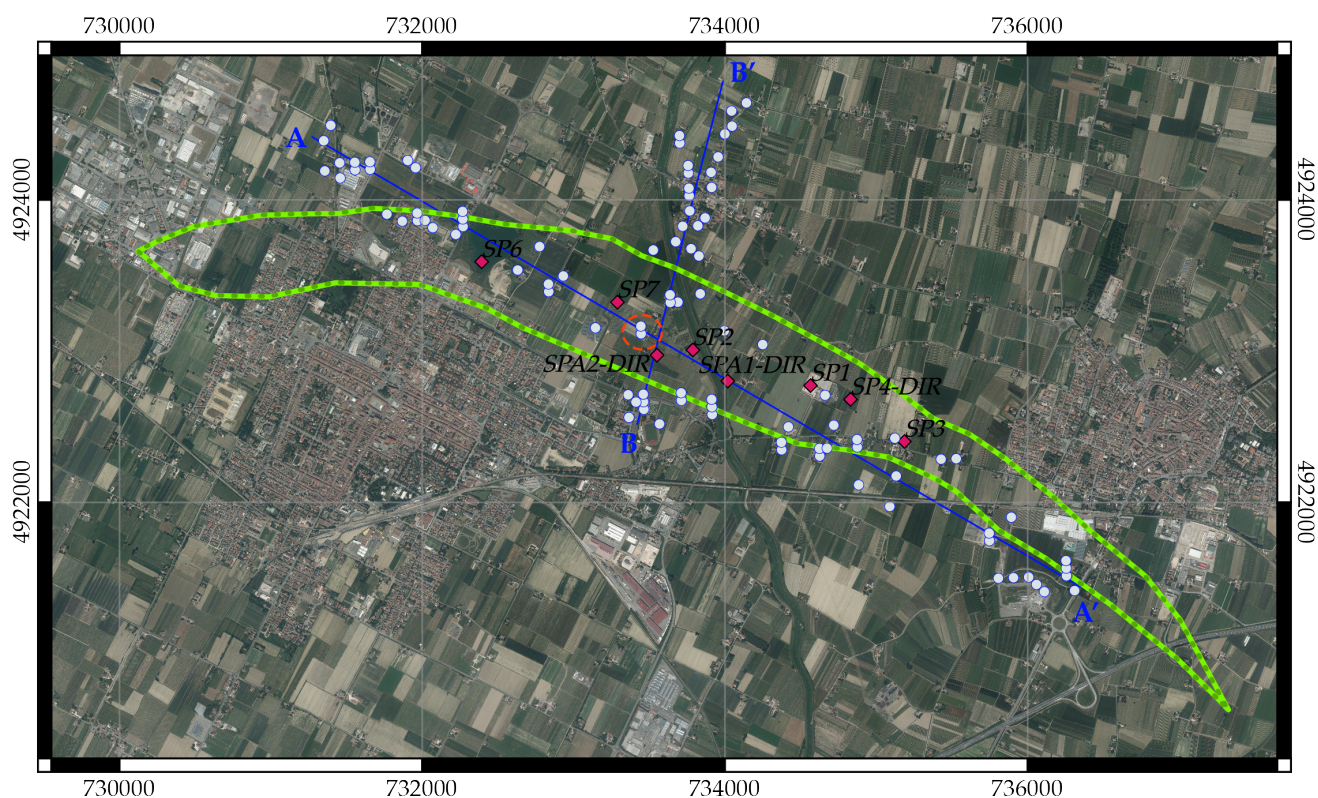


Figura 4.7: Mappa della proiezione in superficie del top del giacimento di San Potito, con la posizione dei fondo pozzo, in fucsia; in bianco i bersagli radar della serie Sentinel-1 aggiornata a settembre 2018, i cui spostamenti sono stati proiettati lungo i profili AA' e BB' per creare le figure 4.8 e 4.9; il cerchio arancio delimita i bersagli radar analizzati in figura 4.10.

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 media calcolata tra un gruppo di punti che si trovano nei pressi del pozzo direzionato San Potito A2-DIR (cerchio arancio nella mappa di Fig. 4.7), perforato sulla culminazione strutturale del reservoir di San Potito.

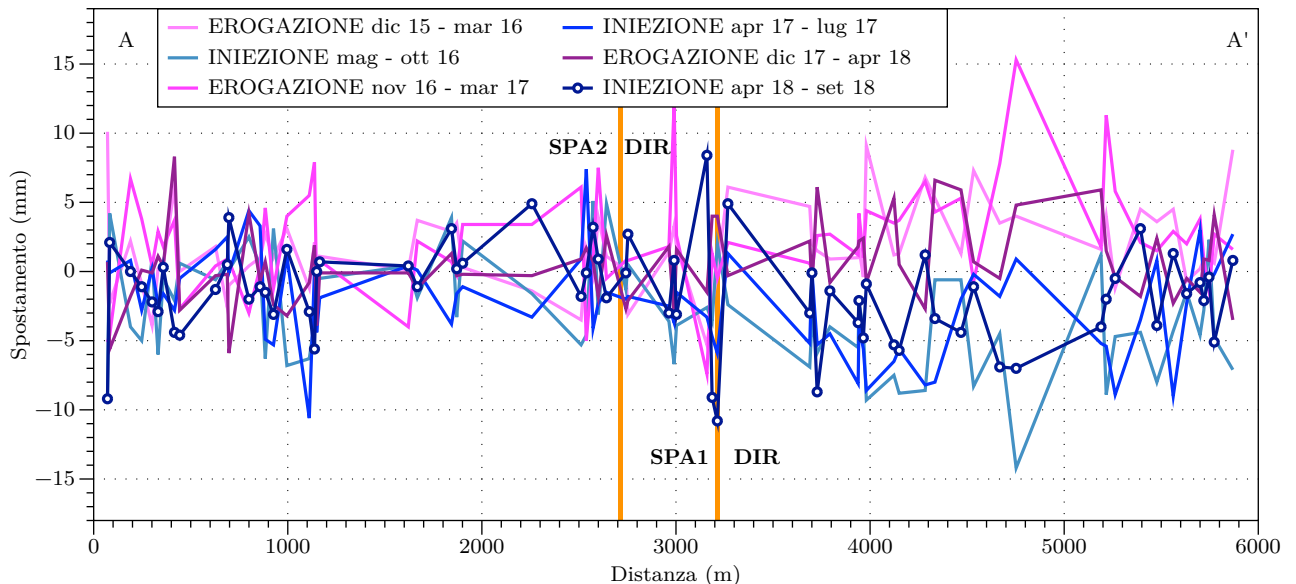


Figura 4.8: Spostamenti dei bersagli radar distribuiti lungo il profilo AA' (mappa di Fig. 4.7); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee arancio 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  $\approx 10$  mm. Tali oscillazioni non mostrano alcuna influenza con i volumi movimentati.

Tale comportamento viene confermato osservando l'andamento della serie temporale media dei bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito A2 DIR sulla culminazione strutturale del Cluster-A (Fig. 4.10); non si riscontra alcun particolare trend nella serie media degli spostamenti verticali intorno al pozzo, sebbene siano stati movimentati dei volumi di gas non trascurabile ( $\approx 90$  milioni di Smc complessivamente tra iniezione ed erogazione).



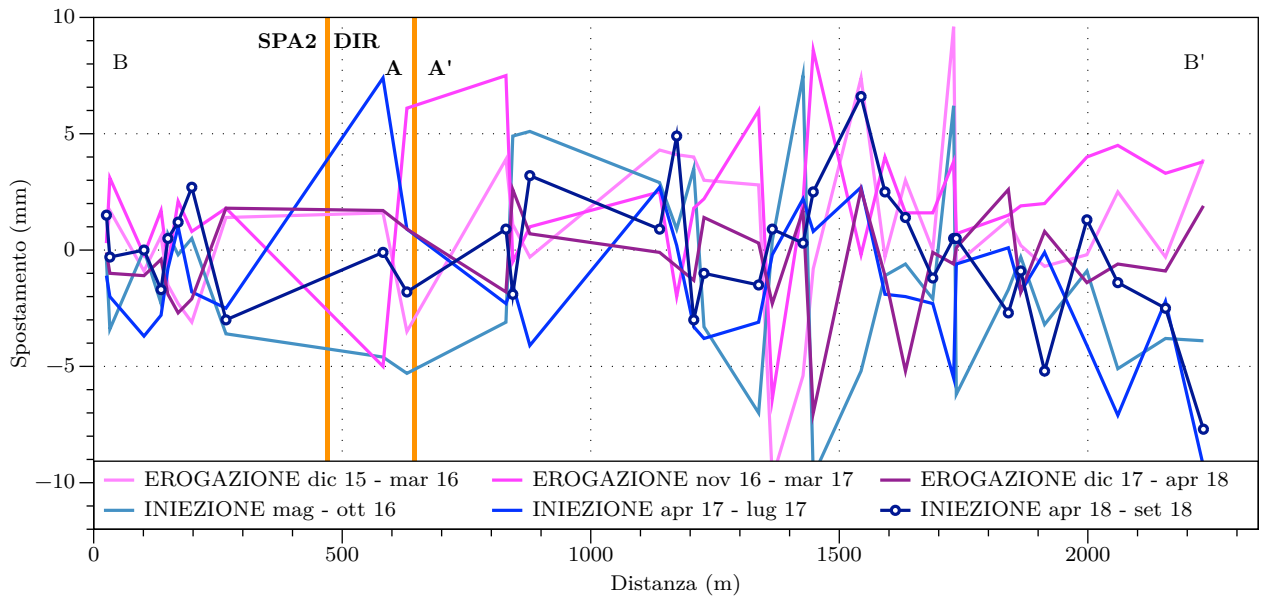


Figura 4.9: Spostamenti dei bersagli radar distribuiti lungo il profilo BB' (mappa di Fig. 4.7); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee arancio 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.

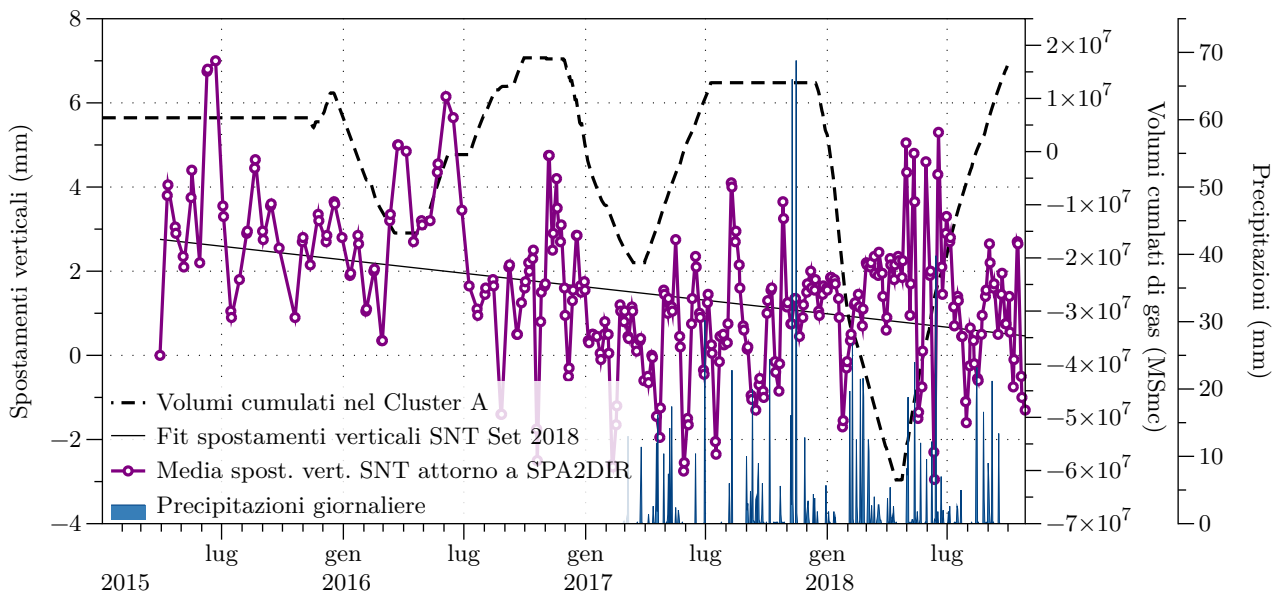


Figura 4.10: Serie temporale media di spostamento del gruppo di bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito A2 DIR (cerchio arancio in figura 4.7) al di sopra della culminazione strutturale del giacimento, in relazione alla movimentazione di gas ed alle precipitazioni.

## 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

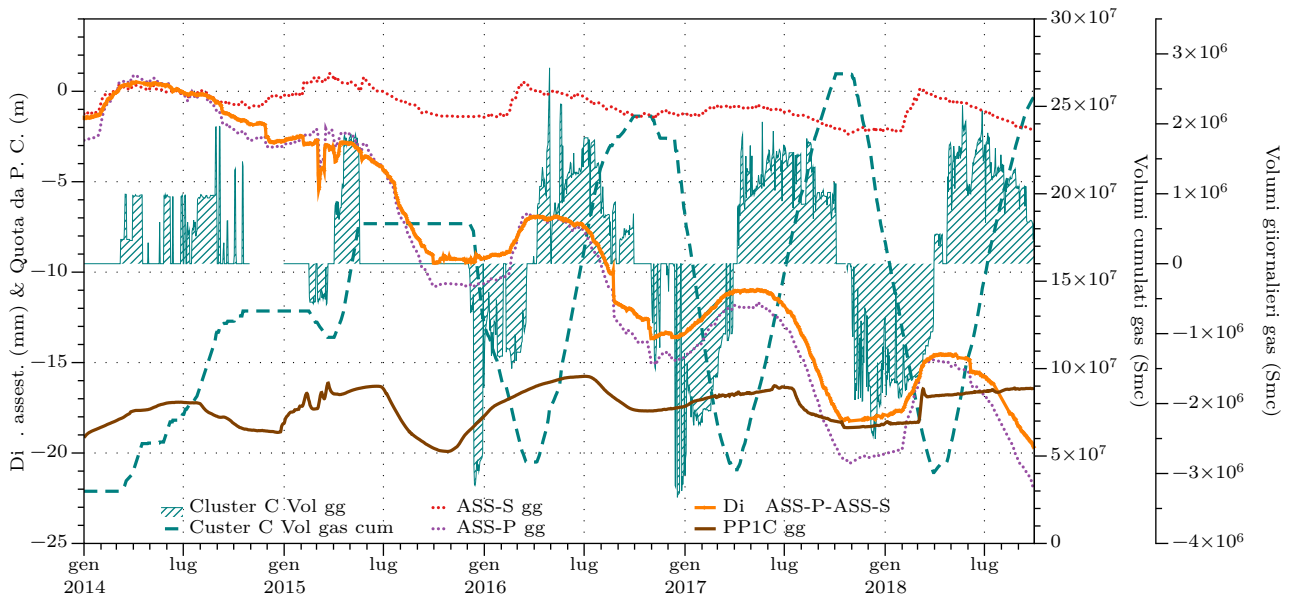


Figura 5.1: Andamento degli strumenti profondi in relazione alla movimentazione di gas nel reservoir del Cluster-C per tutto il periodo di monitoraggio. In arancio la curva che descrive la componente profonda della deformazione, ottenuta dalla differenza degli spostamenti di ASS-P meno quelli di ASS-S.

movimentati. Questo andamento comune 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 subisce il “solito” abbassamento a partire da luglio; questa variazione non appare al momento correlata all'andamento dei volumi nel cluster. 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). Si conferma un trend di compattazione inversamente correlato all'andamento dei volumi nel cluster; questo trend mostra oscillazioni di ampiezza confrontabili con gli intervalli già misurati per i precedenti semestri di monitoraggio. Le oscillazioni mostrano andamento confrontabile con alla movimentazione dei volumi, ma non esiste però proporzionalità tra l'entità delle oscillazioni della compattazione ed il quantitativo di gas movimentato nello stoccaggio.

Anche nel semestre in esame, le inversioni degli andamenti della serie GPS verticale (punti blu e linea rossa in figura 5.2) seguono i cambi di attività dello stoccaggio (iniezione/erogazione): da maggio a fine settembre 2018, l'antenna GPS registra un sollevamento di max 20 mm (12 mm in media, curva rossa in figura 5.2) a

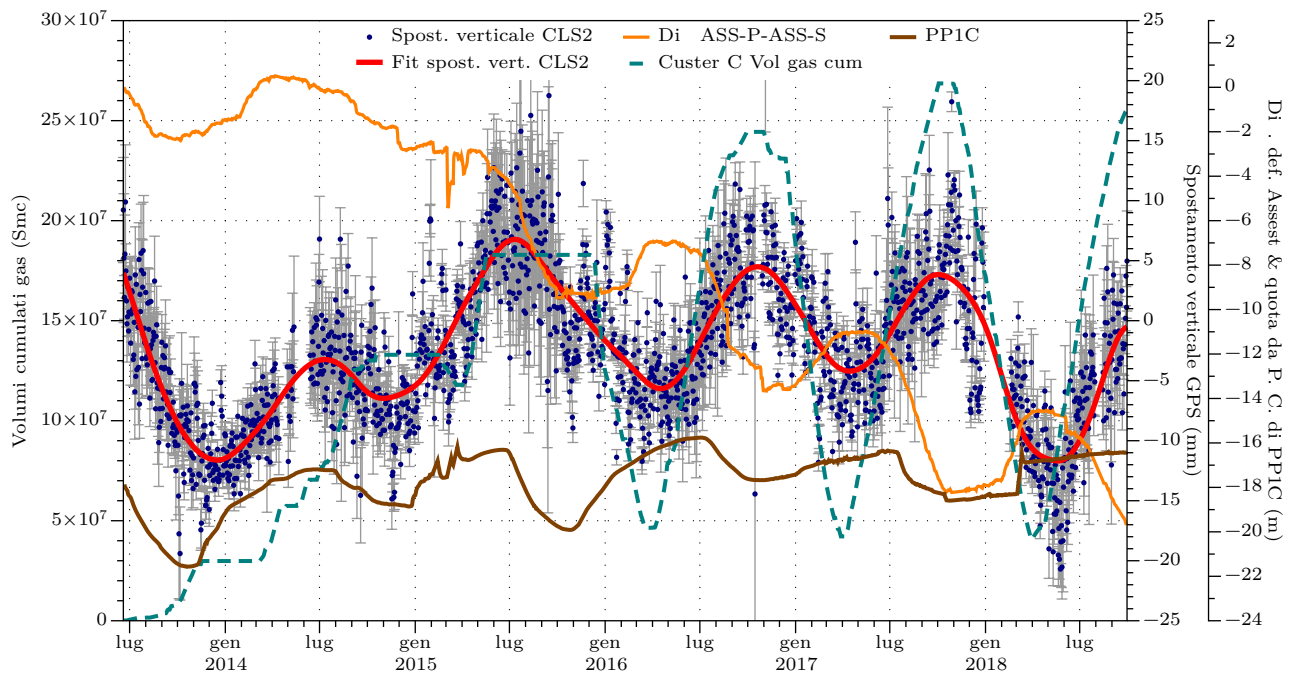


Figura 5.2: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS (componente verticale; nel sistema di riferimento ITRF2014) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con l'andamento del piezometro profondo e con quello della differenza tra le misure degli assestimetri.

fronte dell'iniezione di 215.5 Msmc. L'ampiezza del sollevamento non si discosta in maniera significativa dalle precedenti ed è inoltre confrontabile (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). Non si riscontra una proporzionale correlazione tra quantitativi di gas movimentati e ampiezza dei sollevamenti/abbassamenti registrati dalla componente verticale del GPS sul Cluster-C.

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 + 20 mm nel semestre (scarto valore massimo – valore minimo nel semestre), a fronte di una media di circa + 12 mm.
- Il solo PS A4FK68V posizionato tra i pozzi centrali del campo registra un massimo movimento di + 30 mm (scarto valore massimo – valore minimo nel semestre), a fronte di una media di circa +17 mm per tutto gruppo di 6 PS individuati tra i pozzi centrali del campo.

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



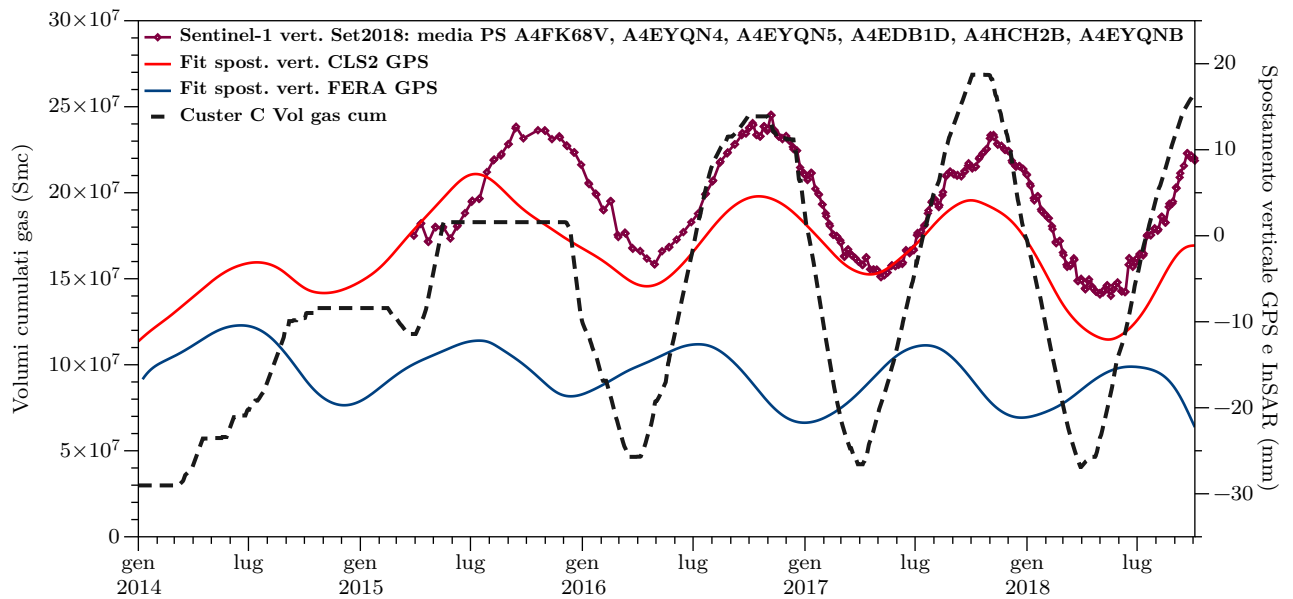


Figura 5.3: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS (componente verticale; nel sistema di riferimento ITRF2014) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con la serie Sentinel-1 a settembre 2018 e con la serie temporale GPS della stazione FERA.

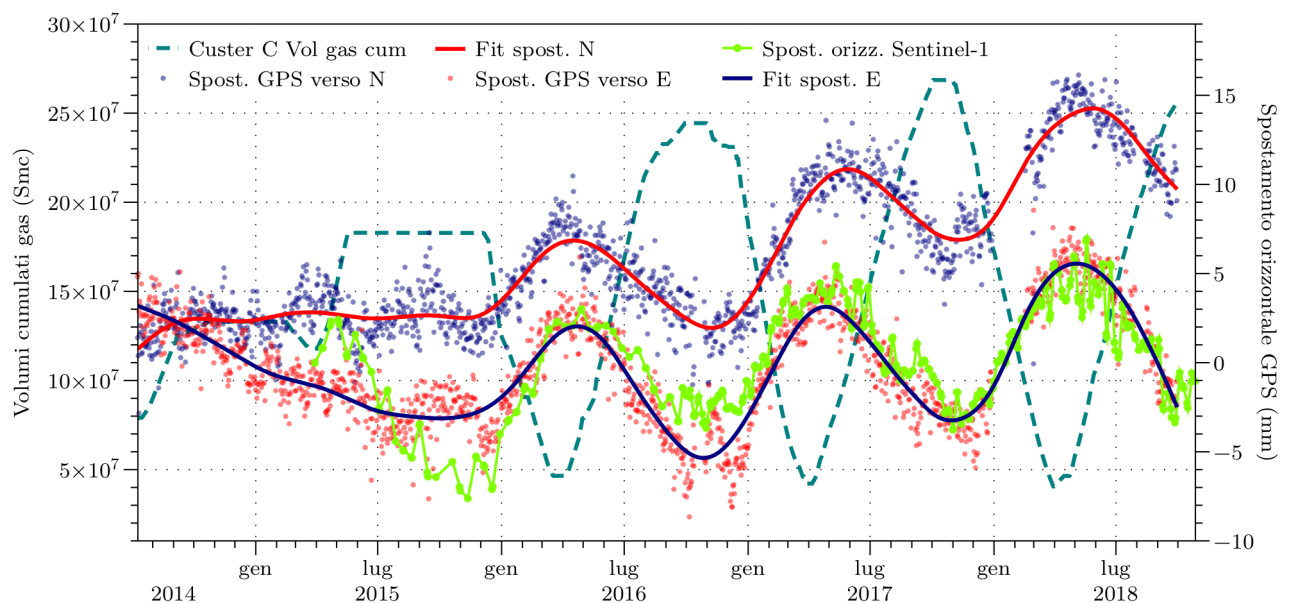


Figura 5.4: Confronto tra la serie temporale delle posizioni orizzontali della stazione GPS CLS2 con la movimentazione di gas nel Cluster-C. Gli spostamenti sono riferiti alla stazione GPS FERR di Ferrara, allo scopo di eliminare la componente crostale del moto; in rosso la componente nord e in blu la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

Al momento, 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 spostamento negativo sia lungo la componente Est (9-10 mm verso ovest) che lungo quella Nord (9 mm verso sud): la composizione di tale moto restituisce uno spostamento che allontana la stazione dal centro del Cluster-C di 13 mm in direzione sud-ovest. 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 allontanamento viene registrato anche dai bersagli radar Sentinel-1 individuati attorno alla stazione (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 settembre 2018, 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 anni). La stima della componente verticale degli spostamenti della serie GPS restituisce valori con velocità media in leggero sollevamento di  $\approx + 0.794$  mm/anno, da inizio monitoraggio. Gli spostamenti nella componente verticale mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2018 (massimo innalzamento + 20 mm;  $\approx + 12$  mm in media); tuttavia i valori delle oscillazioni osservate nel semestre non si discostano da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni legati alle dinamiche meteorologiche stagionali (periodi antecedenti dicembre 2015). Le componenti orizzontali della serie si correlano anch'esse con l'attività di stoccaggio, registrando uno spostamento a SW, di + 9.5 mm W e 10 mm S, in allontanamento dal centro del Pool CC1 (Cluster-C).

Le nuove serie temporali di interferometria, prodotte dall'elaborazione di scene acquisite nell'intervallo temporale 30/03/2015 - 27/10/2018 dal satellite Sentinel-1, evidenziano per il semestre in esame un innalzamento verticale massimo di +17.5 mm, all'interno del Cluster-C, sopra il centro del giacimento.

La componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia spostamenti orizzontali che "allontanano" i PS dal centro del Cluster-C (circa 9 mm per punti posti a ridosso della stazione GPS CLS2 e fino a 12 mm verso ovest per punti posti nella zona occidentale del reservoir; 11 mm verso est per punti situati 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 iniezione dell'ultimo semestre (apr-sett2018) si osserva una area in uplift con valori medi tra i + 6 - 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" 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 5 - 6 mm, non correla-

bili 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 aprile-settembre 2018 un abbassamento lieve delle quote, in controtendenza con l'iniezione del gas, ed in maggiore accordo con le variabili meteorologiche (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'assestimetro profondo continua a registrare una compactazione 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.

L'andamento delle quote da p. c. del piezometro profondo conferma il trend di risalita finora osservato e pertanto in accordo con l'ipotesi di una possibile compactazione indotta. Tuttavia la dinamica delle oscillazioni appare invece chiaramente influenzate dai fattori meteorologici stagionali. Si segnala che nel semestre in esame non si è ancora registrato l'inizio dell'abbassamento di quota del piezometro profondo che nei precedenti anni si è sempre verificato a luglio. 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 compactazione dello spessore di sedimenti alluvionali in cui sono installati i due strumenti.

I dati finora raccolti non evidenziano una chiara correlazione con l'attività di stoccaggio.

## 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.