



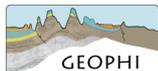
SUBSURFACE
GEOLOGY AND
GEOPHYSICS



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

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

Bologna 23 novembre 2018



Indice

Executive Summary	3
Premessa	5
1 Attività di stoccaggio dal 1 ottobre 2017 al 31 marzo 2018	6
2 Analisi GPS, aggiornamento al 31 marzo 2018	9
2.1 Quality check	9
2.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni	10
3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità	13
3.1 Piezometri	13
3.2 Assestimetri	16
4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Cotignola	18
4.1 Analisi SqueeSAR sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas	18
4.2 Analisi SqueeSAR in relazione alla movimentazione di gas nel Cluster A	24
5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas	28
6 Conclusioni	33
Bibliografia	35
Appendice A	36

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 decimo rapporto relativo all'analisi, all'interpretazione e all'integrazione tra le differenti tipologie di dati monitorati fino alla fine di marzo 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.

Dal Cluster-C tra il 23 ottobre 2017 ed il 31 marzo 2018 sono stati erogati ≈ 228 MSmc di gas; al 31 marzo 2018 risultano stoccati nel Cluster-C ≈ 40.5 MSmc di gas.

Dal Cluster-B tra il 23 ottobre 2017 ed il 31 marzo 2018 sono stati erogati ≈ 31.9 MSmc di gas; al 31 marzo 2018 risultano stoccati nel Cluster-B ≈ 6.3 MSmc di gas.

Dal Cluster-A tra il 15 dicembre 2017 ed il 31 marzo 2018 sono stati erogati ≈ 68.6 MSmc di gas: ai ≈ 13 MSmc in posto al 1 ottobre 2017, si aggiungono i ≈ 55.7 MSmc erogati grazie alla messa in opera del pozzo SPA2-DIR.

Alla fase di erogazione, durata dal 1 ottobre 2017 al 31 marzo 2018, nei reservoir di Cotignola Cluster-C e Cluster-B è corrisposto un abbassamento geodetico, rilevato attraverso le serie GPS ed InSAR.

Gli spostamenti nella componente verticale della serie GPS di CLS2 mostrano infatti relazioni causa-effetto con l'estrazione cumulata tra novembre 2017 - aprile 2018 (abbassamento di ≈ -15 mm a fronte di ≈ 228 MSmc erogati), con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2017 (sollevamento di $\approx +10$ mm a fronte di ≈ 226.5 MSmc) e con tutti i cicli di movimentazione di gas precedenti, a partire da dicembre 2015; i cambi di tendenza coincidono con l'inizio/fine delle fasi di erogazione/iniezione e non con i cambi di stagione. Le ampiezze di queste oscillazioni rientrano tuttavia nel range di deformazione stagionale, evidente anche prima dell'entrata a regime dello stoccaggio. Durante la fase di erogazione tra ottobre 2017 e marzo 2018, la stazione ha subito un abbassamento di ≈ -15 mm, mentre durante la fase di iniezione aprile-settembre 2017 aveva subito un sollevamento di $\approx +10$ mm. Anche le componenti orizzontali della serie GPS risentono della attività di stoccaggio, registrando uno spostamento significativo in concomitanza dell'erogazione di gas (ottobre 2017-marzo 2018) nell'ordine di $+9$ mm E e $+10$ mm N, in avvicinamento, verso nord-est, al centro del Pool CC1 (Cluster-C).

I trend deformativi evidenziati dalla serie interferometrica Sentinel-1 (30/03/2015 - 30/04/18), evidenziano nel semestre in esame un abbassamento verticale nell'intorno del Cluster-C, porzione di reservoir dove è stato movimentato il maggior quantitativo di gas in erogazione (≈ 228 Milioni di Smc al 31 marzo 2018), con massimi di abbassamento fino a -16 mm sopra il centro del giacimento.

Anche la componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia una inversione del trend deformativo a partire da novembre 2017, con spostamenti orizzontali che "avvicinano" i PS al centro del Cluster-C di ≈ 8 mm.

L'andamento degli spostamenti dei bersagli radar al centro del Cluster-C mostra una buona correlazione con l'andamento dei volumi di gas movimentati nel pool CC1, con le pressioni di poro misurate al fondo del pozzo C1, e coi trend delle misurazioni dell'antenna GPS, sia in termini di sincronia con cui avvengono i cambi di tendenza sia in termini di entità degli spostamenti.

Anche sul Cluster-B in concomitanza con l'attività di iniezione tra ottobre 2017 e marzo 2018 si osserva una area in subsidenza con valori medi tra i $-6-8$ mm, localizzata nella parte sud-orientale del reservoir.

Sul Cluster-A sono state evidenziate deformazioni geodetiche medie contenute entro i $\pm 5-6$ mm (max -10 mm di abbassamento in zone non prossime al campo), non correlabili con la fase di estrazione in esame (e con l'attività di stoccaggio in generale) né in termini di tempo né di distribuzione nello spazio.

Le deformazioni registrate dall'assestometro superficiale vengono ottimamente correlate alle oscillazioni piezometriche superficiali, intermedie e profonde, suggerendo che il sistema continui ad essere influenzato principalmente dalle precipitazioni e dalla dinamica degli acquiferi.

Gli strumenti installati nei primi 350 metri di sottosuolo (assestometro e piezometro profondi) non evidenziano una relazione chiara tra le deformazioni da essi registrate e la movimentazione di gas, con incongruenze in

termini quantitativi (nel caso dell'assestometro) e in termini temporali (piezometro profondo): essi appaiono pertanto maggiormente influenzati dalle dinamiche meteorologiche stagionali e dalla compattazione dei sedimenti alluvionali in cui sono installati. L'andamento dell'assestometro profondo continua infatti a registrare una compattazione a ritmo di $\approx - 4$ mm/anno, con dinamiche di deformazione correlate temporalmente con le fasi di iniezione/erogazione, ma le deformazioni registrate finora non appaiono dovute alla movimentazione di gas nel Cluster-C, poiché hanno ampiezze non proporzionali al quantitativo di gas movimentato nel reservoir.

L'andamento complessivo del piezometro profondo mostra un leggero trend di innalzamento della quota da piano campagna, che indica un aumento di pressione all'interno dell'acquifero; le sue oscillazioni appaiono invece chiaramente influenzate dalle dinamiche meteorologiche stagionali.

Analizzando questi trend non appare dunque una chiara correlazione che consenta di discriminare tra loro gli effetti delle due variabili (climatica e antropica) sui due strumenti.

Premessa

Nel mese di giugno 2013 la società Edison Stoccaggio ha reso operativa presso l'impianto di stoccaggio di Cotignola la rete di monitoraggio per la quale è prevista una integrazione con i dati di rilievo della rete di livellazione ottica sul campo di stoccaggio stesso. Nel giugno 2016 la società TO.TE.M ha ribattuto i capisaldi lungo le poligoni della rete materializzata nel 2013, aggiungendo alla rete di monitoraggio dell'impianto una nuova tipologia di dato indipendente dagli altri, che è stata trattata nel report di luglio 2016 (Geophi, Report_14004COT01-GEOPH-EDIS0-DV07_rev01, 2016). Pertanto, non verranno trattati gli aspetti relativi alla livellazione nel corso di questa relazione.

1 Attività di stoccaggio dal 1 ottobre 2017 al 31 marzo 2018

L'attività di stoccaggio nel periodo in esame (ottobre 2017 - marzo 2018) ha interessato tutti e tre i cluster della concessione San Potito - Cotignola (figura 1.1), ed è caratterizzata dalla complessiva erogazione, a partire da ottobre fino al 31 marzo 2018 di ≈ 328.6 MSmc (sul Cluster A l'erogazione è proseguita fino al 15 aprile).

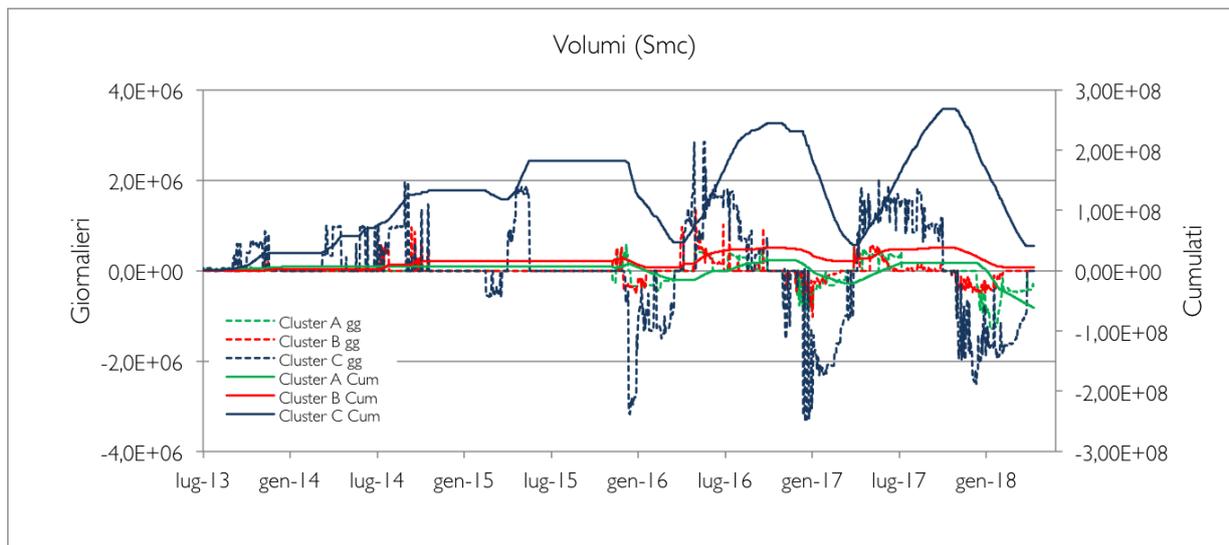


Figura 1.1: Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (ndr Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra

Nei grafici che seguono sono evidenziate le tempistiche e le quantità di fluidi movimentati in ogni cluster.

Cluster A

Tra il 15 dicembre 2017 ed il 31 marzo 2018, dal Cluster-A sono stati erogati ≈ 68.6 MSmc di gas: ai ≈ 13 MSmc in posto al 1 ottobre 2017, si aggiungono i ≈ 55.7 MSmc erogati principalmente attraverso la resa operatività del pozzo SPA2-DIR. Nei primi giorni di aprile è proceduta l'erogazione da tale pozzo: al 15 aprile 2018 risultano infatti erogati complessivamente dal cluster 77 Msmc.

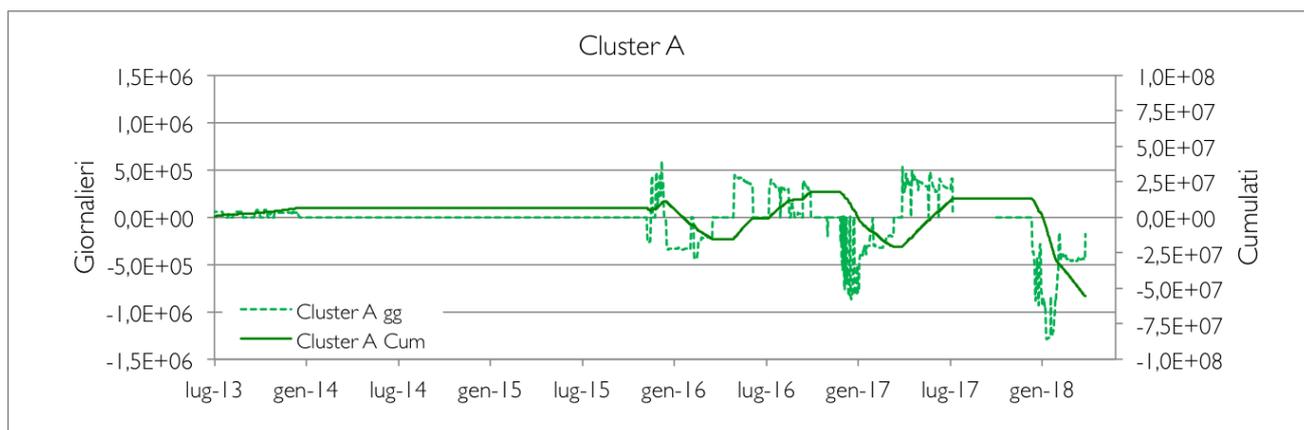


Figura 1.2: Cluster A. Andamento delle pressioni di pozzo (in bar, in ordinata a sinistra) e movimentazione volumi di gas in metri cubi standard (in Smc, in ordinata a destra).

Cluster B

Tra il 23 ottobre 2017 ed il 9 febbraio 2018, dal Cluster-B sono stati erogati ≈ 31.9 MSmc di gas; al 31 marzo 2018 risultano stoccati nel Cluster-B ≈ 6.3 MSmc di gas. L'attività è stata condotta su tutti i 3 pozzi attivi nel cluster.

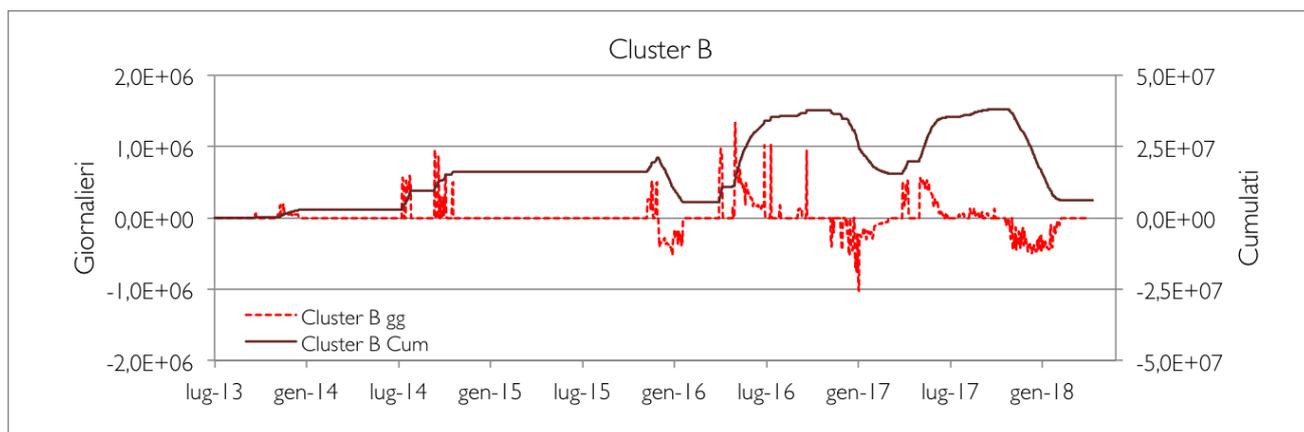


Figura 1.3: Cluster B: andamento delle pressioni di pozzo (in bar, in ordinata a sinistra) e dei volumi di gas movimentati (in Smc, in ordinata a destra).

Cluster C

Tra il 23 ottobre 2017 ed il 31 marzo 2018, dal Cluster-C sono stati erogati ≈ 228 MSmc di gas; al 31 marzo 2018 risultano stoccati nel Cluster-C ≈ 40.7 MSmc di gas.

L'attività è stata condotta principalmente tramite i pozzi C1, C2, C4 e C6 e marginalmente tramite gli altri 3 pozzi del cluster.

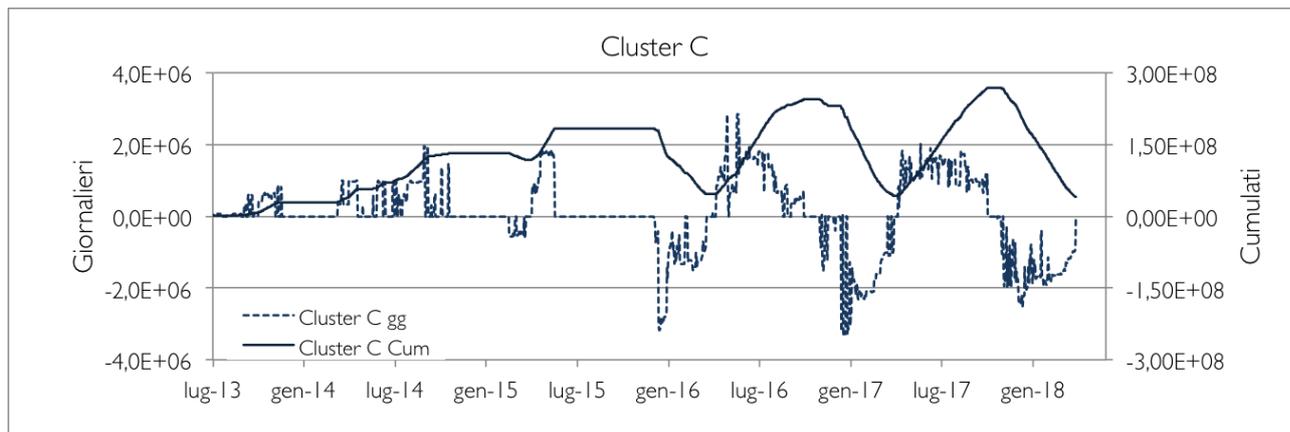


Figura 1.4: Cluster C: andamento delle pressioni di pozzo (in bar, in ordinata a sinistra) e dei volumi di gas movimentati (in Smc, in ordinata a destra).

2 Analisi GPS, aggiornamento al 31 marzo 2018

La serie temporale delle posizioni della stazione CLS2 è stata aggiornata attraverso l'analisi dei dati giornalieri fino alla data del 14 aprile 2018 (Day of Year 2018/104). 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 IGB08 (<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>).

Nei grafici del presente report si può notare un'assenza del dato GPS tra il 29/12/2017 ed il 17/02/2018. I dati che risultano mancanti sono in realtà stati acquisiti dalla stazione CLS2, ma sono risultati non processabili assieme agli altri, poiché affetti da spostamenti di entità metrica della posizione. A causa di tale anomalia i dati sono stati inviati alla ditta Topcon produttrice della stazione che 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 una sola volta nel per un'altra stazione. Nel caso di CLS2, poiché in seguito la stazione ha ripreso ad acquisire correttamente (come anche da verifica Geophi al 13 settembre 2018), il fenomeno può essere spiegato con un qualche disturbo di natura elettromagnetica che ha insistito nell'area della stazione durante il periodo in questione.

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 SP 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 aggiornato al 14 aprile 2018. La maggior disponibilità di dati, grazie ad una serie temporale ormai quinquennale, mostra

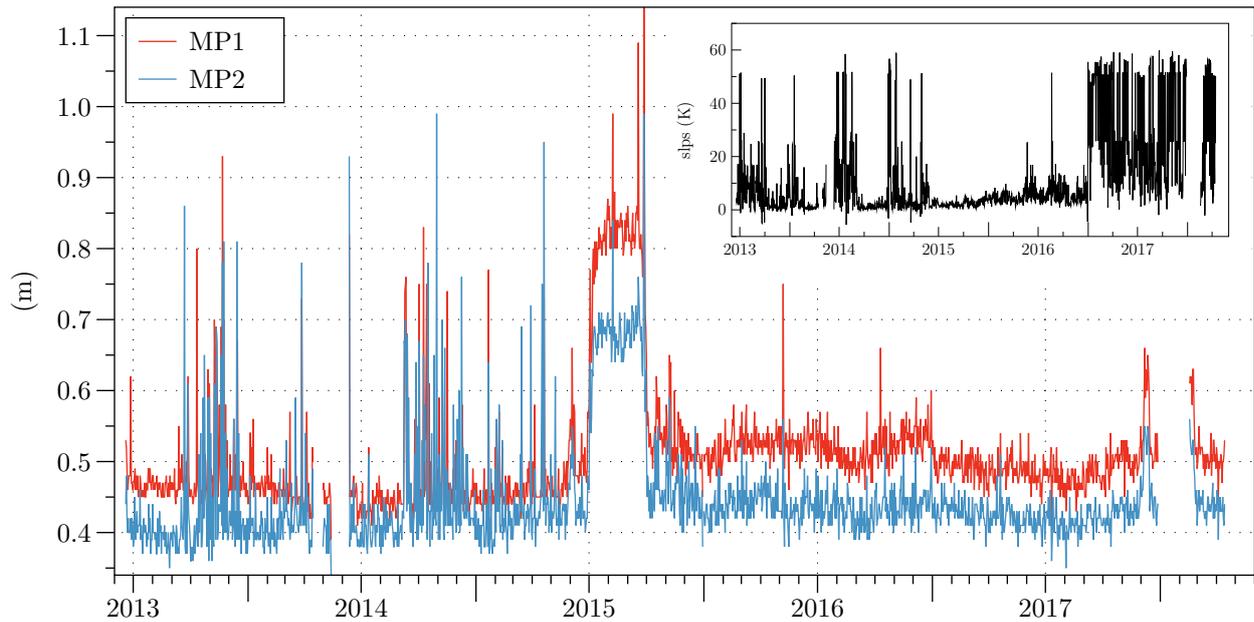


Figura 2.1: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione CLS2.

come i valori di MP1 e MP2 presentino (anche nell'ultimo semestre) un andamento stagionale, con valori più elevati nel periodo autunnale (fino circa a dicembre) e valori che nel periodo successivo si stabilizzano, seppur in presenza di qualche picco, su valori in linea con quanto indicato dall'IGS per una stazione di buona qualità.

2.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni

I dati giornalieri registrati dallo strumento della stazione CLS2 sono stati analizzati assieme a quelli registrati da diverse altre stazioni afferenti a diverse reti GPS/GNSS permanenti in Emilia-Romagna, e più in generale in Italia settentrionale, e successivamente combinati con la soluzione della rete EUREF, seguendo le procedure descritte nelle precedenti relazioni. La nuova stima delle coordinate della stazione CLS2 nel sistema di riferimento IGB08, riportate al 14-04-2018 (decimal year 2018.2836), sono:

X: 4468303.03147 (m) Y: 943210.62242 (m)

Lat.: N 44° 22' 16.456514" Lon.: E 11° 55' 10.336932"

Z: 4437714.13525 (m) Quota: 60.76349 (m)

La figura 2.2 mostra l'andamento delle posizioni nel tempo, per la componente est, nord e verticale della stazione CLS2, nel sistema di riferimento IGB08 (A) e in un sistema di riferimento locale Adria-fixed (B), in cui le posizioni orizzontali sono state ruotate utilizzando le coordinate e la velocità di rotazione di un polo di rotazione Euleriano per la microplacca Adriatica determinato in un lavoro di Serpelloni et al. (2016) e definito da Lon. -26.56° E., Lat. 61.95° N e velocità di rotazione 0.521° /Ma. Rispetto a questo sistema di riferimento locale

si nota da gennaio 2016 l'inizio di una fase deformativa in cui le posizioni si discostano significativamente dal modello (lineare + stagionale). Di seguito sono riportate le ampiezze (e associate incertezze) delle componenti annuali e semi annuali (in mm) ottenute analizzando la serie temporale aggiornata al 14 aprile 2018:

- Ampiezza Annuale Est: 1.999 ± 0.065 mm; Nord: 1.752 ± 0.076 mm
- Ampiezza Annuale Up: 3.187 ± 0.240 mm
- Ampiezza Semi-Annuale Est: 0.876 ± 0.064 mm; Nord: 0.763 ± 0.073 mm
- Ampiezza Semi-Annuale Up: 1.216 ± 0.241 mm

Le velocità stimate per le tre componenti, E, N e Up nel sistema di riferimento IGb08 analizzando la serie temporale aggiornata al 14 aprile 2018 sono (in mm/anno):

- Velocità Est: 20.668 ± 0.034 (mm/anno)
- Velocità Nord: 19.013 ± 0.039 (mm/anno)
- Velocità Verticale: 1.611 ± 0.125 (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.

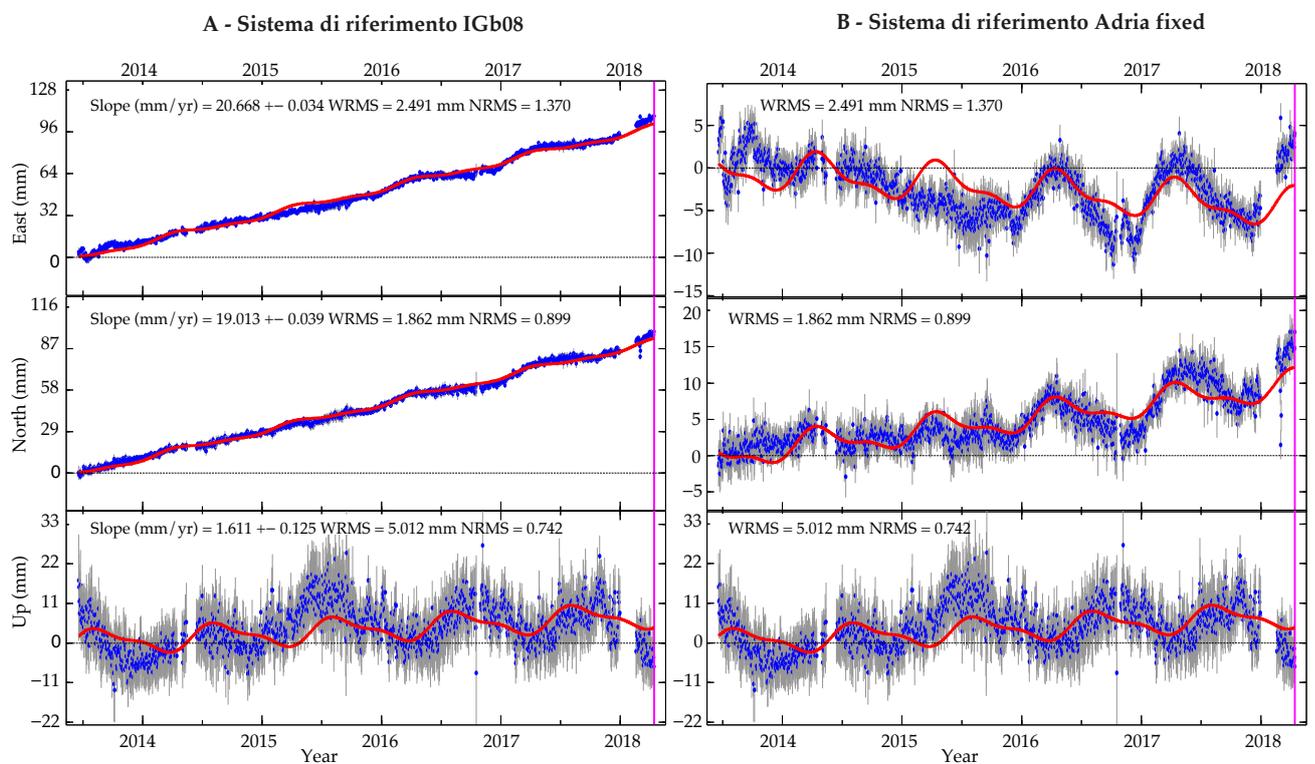
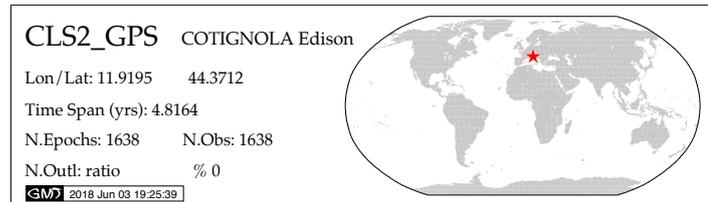


Figura 2.2: A: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 14 aprile 2018, nel sistema di riferimento NNR IGB08. La linea rossa indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere. B: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2 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 ottobre 2017 - marzo 2018 ha andamento confrontabile con quanto avvenuto nei medesimi periodi degli anni precedenti, ovvero un generale trend di innalzamento delle quote piezometriche a partire da metà ottobre sia per PS1C che per PI1C. La diversa profondità delle falde investigate dai 2 strumenti, ne spiega le differenti oscillazioni in risposta alle dinamiche pluviometriche, pressoché istantanee quelle della falda superficiale (PS1C in Fig. 3.1 e 3.2) più regolari quelle della falda intermedia (PI1C in Fig. 3.1). In questo semestre di osservazione l'entità di tali sollevamenti risulta contenuta nei range di variazione già osservati con un Δ massimo positivo di $\approx +260$ cm per il piezometro superficiale, e di $\approx +190$ cm per quello intermedio (Fig. 3.1).

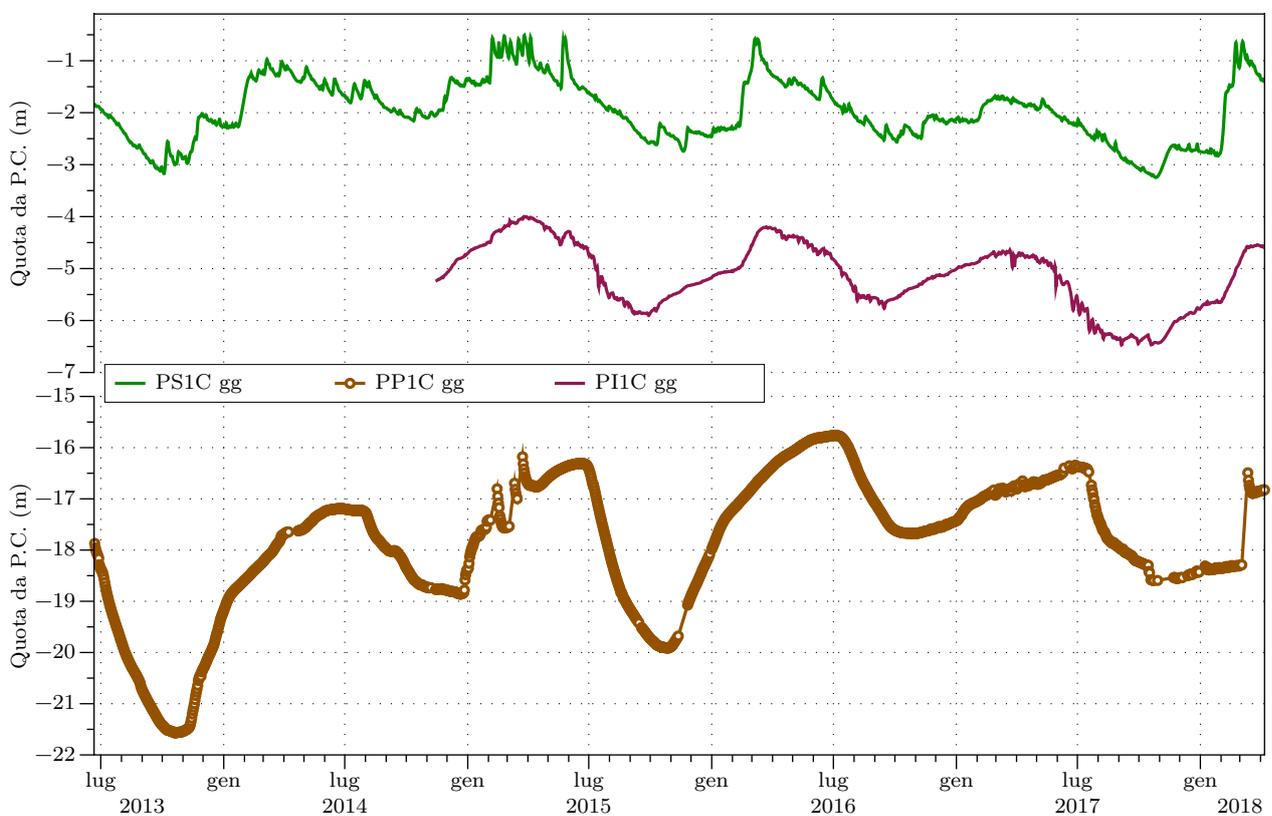


Figura 3.1: Variazioni giornaliere medie della quota dal piano campagna registrate rispettivamente nei piezometri superficiale, intermedio e profondo, compensate per la pressione atmosferica. Dal grafico sono escluse le medie con valori di deviazione standard ≥ 0.05 .

Il comportamento del piezometro profondo è, nella sostanza, simile a quello dei 2 anni precedenti, ovvero caratterizzato da un abbassamento estivo che si completa entro il mese di ottobre e da un progressivo innalzamento che si completa entro luglio, generalmente in maniera lenta. Nell'autunno-primavera 2018 la risalita

di quota, seppur confrontabile per entità con quella dell'analogo periodo dell'anno precedente (ottobre 2016 -aprile 2017 $\approx + 1$ m), ha invece andamento differente: avvengono infatti una risalita minima di $\approx + 30$ cm tra ottobre e marzo ed un brusco innalzamento di $\approx + 80$ cm tra il 4 ed il 13 marzo. Va rimarcato che i valori di spostamento compresi tra il 4 ed il 13 marzo superano abbondantemente i valori di significatività in base all'analisi della deviazione standard dalla media giornaliera e sono perciò stati esclusi dalla rappresentazione grafica: la presenza di una serie prolungata di dati non significativi implica la presenza di qualche problema di natura strumentale nella misurazione, il quale potrebbe aver alterato/mascherato la reale entità dei dati immediatamente precedenti /o successivi a quelli anomali.

Come si può osservare dalla figura 3.2, l'andamento e l'entità dell'innalzamento di quota di entrambi gli strumenti superficiali (+ 260 cm PS1C; + 190 cm PI1C) ben si accordano con le date e con le quantità di precipitazioni giornaliere e cumulate: a 2 abbondanti giorni di pioggia in novembre corrisponde il primo picco di risalita, mentre a più giornate consecutive di precipitazioni tra febbraio e marzo fa seguito il più importante innalzamento di quota per entrambi i piezometri.

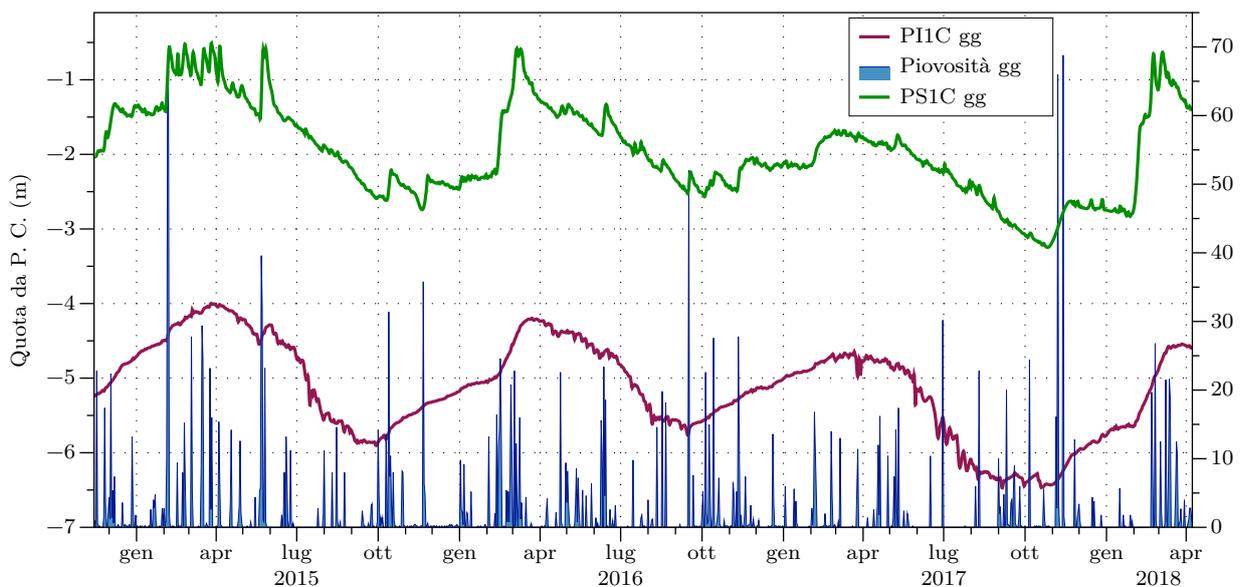


Figura 3.2: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nei piezometri superficiale e intermedio, in relazione alla piovosità giornaliera.

Come si può osservare dalla figura 3.3, l'andamento di PP1C sembrerebbe rispondere in maniera sincrona alle precipitazioni cumulatesi nell'ultimo semestre: lo scarso innalzamento di $\approx + 30$ cm avvenuto tra ottobre e febbraio coincide coi 40 mm di pioggia cumulatesi in quel periodo, mentre la brusca risalita di quota di inizio marzo ($\approx + 80$ cm) avviene a seguito di ≈ 180 mm cumulatesi tra inizio febbraio e fine marzo. Tali risposte nel breve periodo risultano essere atipiche per PP1C (prima volta nei 5 anni di monitoraggio) e pertanto imputabili ad una semplice coincidenza. In generale e come già evidenziato durante i precedenti periodi di monitoraggio,

le dinamiche degli acquiferi investigati dai 3 strumenti risentono delle precipitazioni con effetti che vanno dal breve (piezometro superficiale) al lungo termine (piezometro profondo).

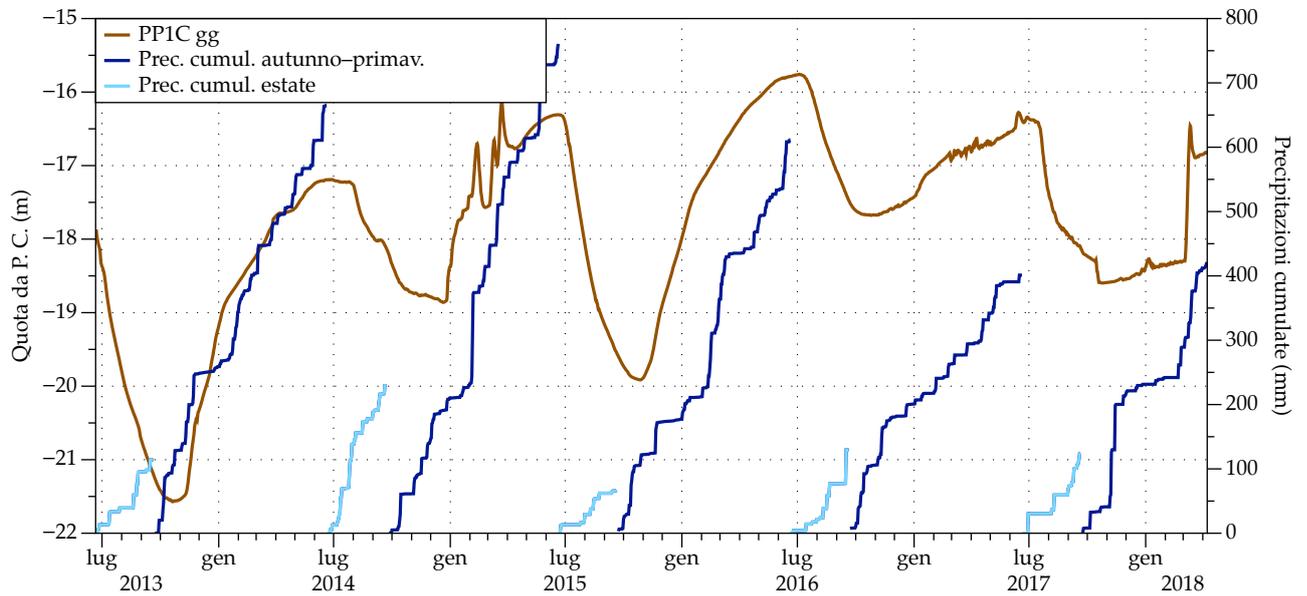


Figura 3.3: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nel piezometro profondo in relazione con le precipitazioni cumulate ogni anno. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale dello strumento, le cumulate della piovosità vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno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

I grafici di tutte le relazioni tra i piezometri e la piovosità giornaliera e cumulata sono contenuti in Appendice A.

3.2 Assestimetri

Nel presente rapporto vengono descritte le misurazioni dal 1 ottobre 2017 al 31 marzo 2018, e se ne riportano gli andamenti descritti nei precedenti report a partire da gennaio 2015 (Fig. 3.4). Per comodità di scrittura/lettura, nel presente capitolo 3 e nei capitoli seguenti gli assestimetri verranno indicati anche nel testo con le sigle ASS-P ed ASS-S, che li contraddistinguono nei grafici.

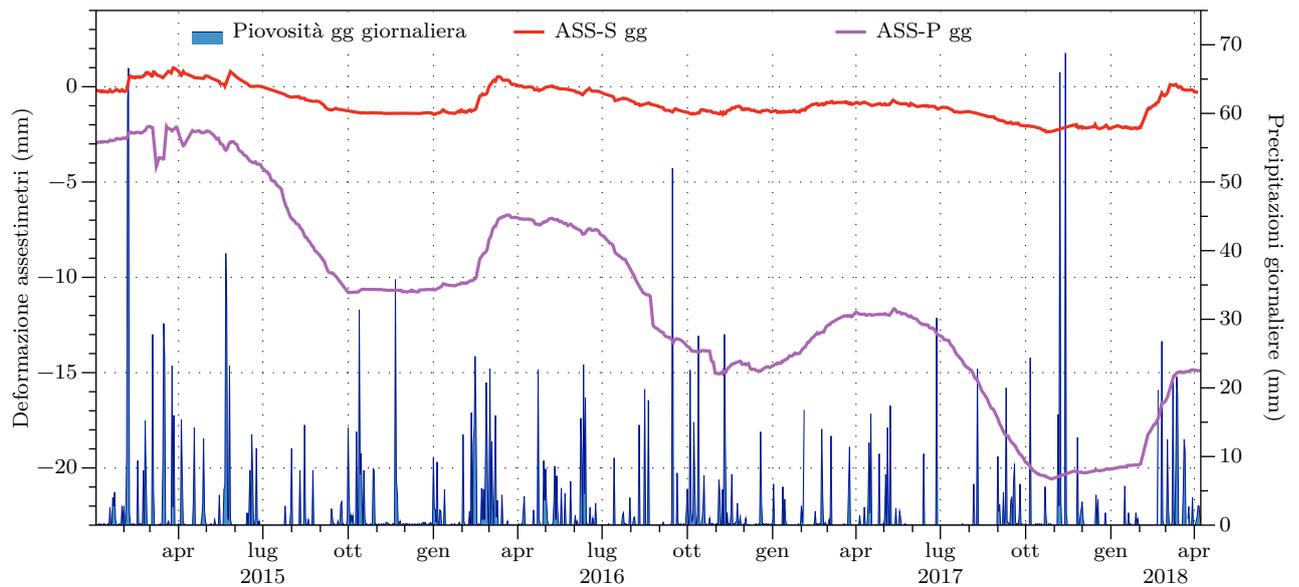


Figura 3.4: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo le aste degli assestimetri superficiale (ASS-S) e profondo (ASS-P) in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015 fino al 31 marzo 2018.

Il grafico che descrive le deformazioni avvenute nel semestre ottobre 2017-marzo 2018 lungo l'asta dell'assestometro profondo (curva viola in figura 3.4) ha andamento simile a quello del medesimo periodo degli anni precedenti: deformazioni contenute nel periodo ottobre-gennaio e inizio della dilatazione a partire da febbraio fino a fine marzo (e oltre). L'entità delle deformazioni di ASS-P nel periodo ottobre 2017-marzo 2018 risulta simile a quella dello stesso semestre 2015-2016, anche se differiscono (Fig. 3.4) le deformazioni residue accumulate lungo l'asta dello strumento (≈ -7 mm a aprile 2016 e ≈ -15 mm a aprile 2018), che suggeriscono una compattazione media di ≈ -4 mm annui a partire da inizio monitoraggio. In particolare, in questo semestre di osservazione si hanno:

- la registrazione della massima compattazione cumulata da ASS-P ≈ -20.6 mm;
- deformazioni minime tra fine ottobre ed inizio febbraio, con un leggerissimo trend dilatativo tra novembre e febbraio di $\approx +0.6$ mm, registrato anche da ASS-S, a seguito delle piogge di inizio mese;
- regolare dilatazione tra febbraio e marzo 2018 che ammonta a $\approx +5$ mm, fino a quota -15 mm lungo l'asta dello strumento (massima dilatazione registrata nell'intero monitoraggio);

- la registrazione della massima compattazione cumulata di ASS-S ≈ -20 mm.

L'andamento delle deformazioni dei primi 11 metri di sedimento, derivato dalle misure dell'assestometro superficiale nel periodo ottobre 2017-marzo 2018 (Fig. 3.5) mostra un trend di dilatazione pressoché analogo a quello del semestre 2015-2016 con una dilatazione relativa di ≈ 2 mm tra ottobre 2017 e fine marzo 2018 (1.8 mm nel 2015-2016) .

In dettaglio nel semestre in esame:

- massima dilatazione registrata nell'intero monitoraggio per ASS-S ($\approx +2$ mm) contestualmente alla massima dilatazione di ASS-P;
- una compattazione media di 0.2 mm annui;
- non sussiste deformazione residua (l'assestometro torna, a fine marzo, intorno al valore 0).

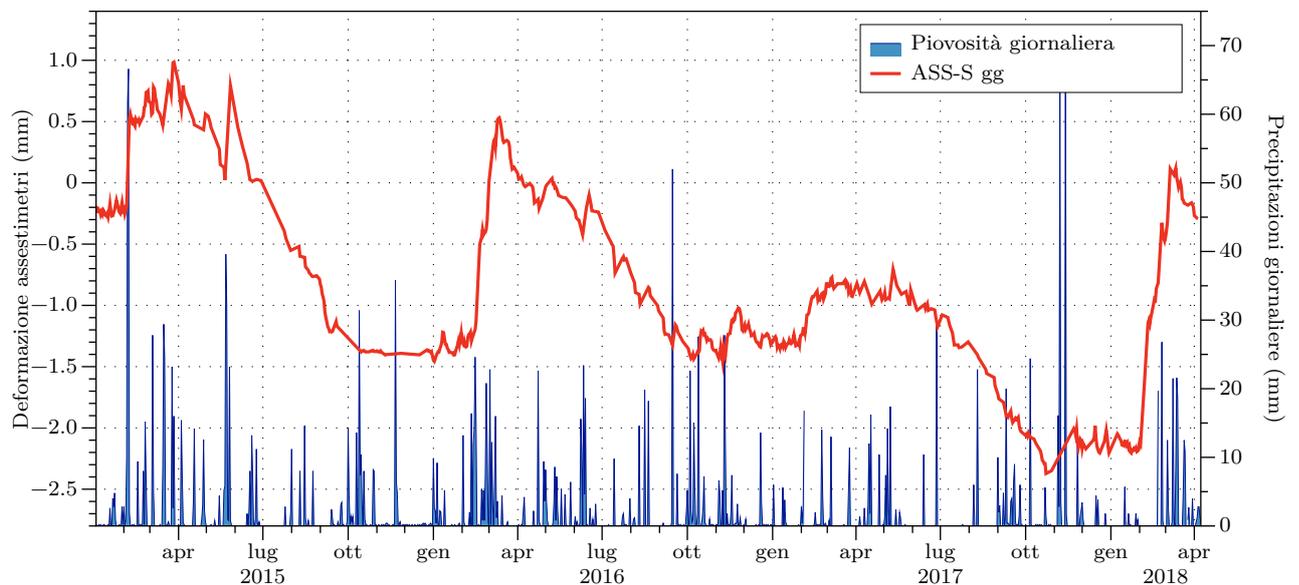


Figura 3.5: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo l'asta dell'assestometro superficiale (ASS-S), in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015.

I grafici delle relazioni tra gli assestimetri e le precipitazioni e delle relazioni tra gli andamenti di assestimetri e piezometri sono visibili in Appendice A.

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

4.1 Analisi SqueeSAR sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas

L'analisi prodotta da TRE aggiornata ad aprile 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". "Nell'area del Pool B l'ampiezza massima della stagionalità misurata per la componente verticale è risultata di circa 12 mm", TRE ALTAMIRA Cotignola_RelazioneTecnica_Aggiornamento_Aprile_2018_JO17-361 – 403– REP 1.1, (2018).

I dati di aggiornamento ad aprile 2018 prodotti da TRE ALTAMIRA mostrano sul giacimento una inversione del trend di sollevamento della serie storica a partire da novembre, con l'inizio di un nuovo fenomeno di subsidenza. L'inversione si osserva sia nel Cluster B che nel Cluster C, anche se è più marcato nella zona centrale di quest'ultimo (- 16 mm). Tale valore è paragonabile agli spostamenti registrati nei cicli precedenti: il sollevamento cumulato tra maggio e ottobre 2017, nel centro del Cluster C, era di quasi + 15 mm; l'abbassamento cumulato nel precedente semestre di erogazione (novembre 2016 - aprile 2017) risultava di $\approx - 15$ mm nel centro del Cluster C.

In accordo con quanto osservato per la componente verticale, anche nella componente orizzontale est-ovest si osserva una contemporanea inversione del trend deformativo, tra novembre 2017 e aprile 2018: si osservano spostamenti orizzontali che "avvicinano" i PS al centro del Cluster-C di ≈ 10 mm (es. ≈ 10 mm verso ovest per punti posti all'interno della proiezione del campo a est di CLS2, fino a ≈ 15 mm verso est per un bersaglio radar posto ad ovest del centro del Cluster-C). Questo comportamento risulta conforme con quello della stazione GPS CLS2.

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

- i quantitativi di gas siano in grado di accentuare la subsidenza storica dell'area, durante e a seguito delle fasi di erogazione;
- i quantitativi di gas siano in grado di contrastare la subsidenza, durante e a seguito delle fasi di iniezione;
- l'analisi interferometrica sia in grado di evidenziare l'effetto di tali accentuazione e contrasto.

Questo assunto può essere verificato durante il semestre in esame, durante il quale il quantitativo di gas movimentato nel giacimento tra aprile 2017 e fine marzo 2018 corrisponde ad un ciclo di iniezione/erogazione quasi completo, con l'iniezione di ≈ 226.5 MSmc di tra aprile e ottobre 2017 e l'erogazione di ≈ 228.5 MSmc tra novembre 2017 e marzo 2018 (Figs. 1.1 e 1.4).

Le serie temporali fornite da TRE ALTAMIRA sono state ulteriormente elaborate per meglio definire e visualizzare i trend di deformazione nell'intorno dell'impianto di stoccaggio. In queste elaborazioni si è scelto di utilizzare solo i parametri di spostamento e non quelli di velocità media delle serie temporali dei bersagli

radar, poiché tale parametro, in questa fase caratterizzata da possibili inversioni di tendenza concomitanti con il passaggio da attività di iniezione ad estrazione, risulta meno efficace nell'evidenziare i trend di deformazione.

Allo scopo di visualizzare la deformazione indotta sulla superficie topografica dagli spostamenti causati dalla movimentazione di gas, viene qui proposta la figura 4.1: essa mostra la superficie di spostamento verticale che si ottiene interpolando gli spostamenti cumulati che ogni bersaglio ha subito nel periodo tra novembre 2017 e marzo 2018, durante il quale c'è stata erogazione di gas dai reservoir (≈ 228.5 MSmc dal Cluster-C; ≈ 31.9 MSmc dal Cluster-B).

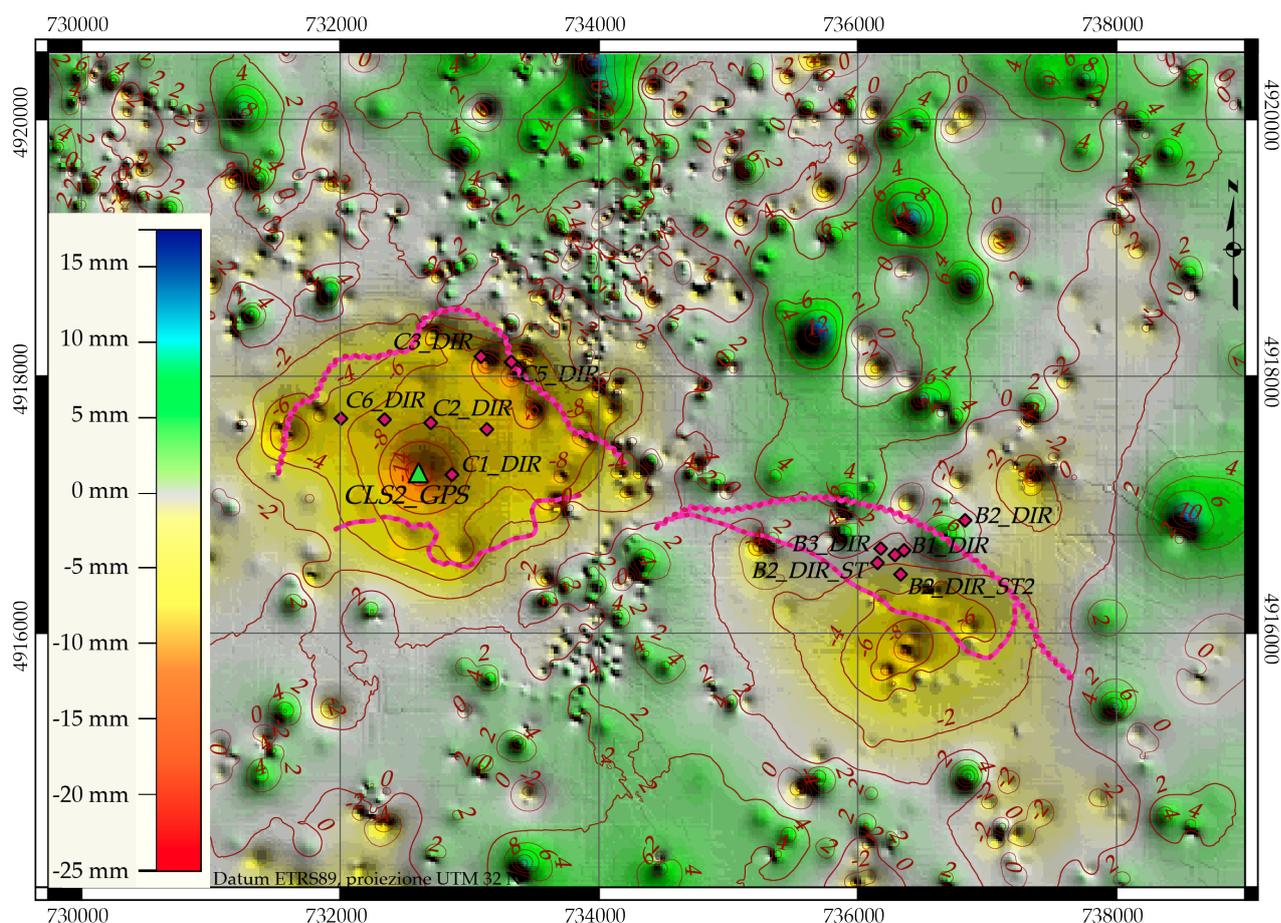


Figura 4.1: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di erogazione tra novembre 2017 e fine marzo 2018 (esagerazione verticale 1000x).

La superficie descrive un ampio cono di depressione al di sopra del Cluster-C, con valori massimi che raggiungono i - 16 mm; uno spostamento fino a $\approx - 6$ mm avviene anche al di sopra del Cluster-B, dove la superficie di deformazione risulta leggermente traslata nella parte sud-est delle proiezione in superficie dei limiti del reservoir (Fig. 4.1): si registrano valori maggiori di subsidenza per alcuni punti posti al di fuori dei limiti sud orientali

del Cluster-B, a circa 1 km di distanza dai 3 pozzi attivi sul cluster. La particolarità di questi bersagli radar era già stata descritta nei precedenti report. Le oscillazioni finora registrate da questo gruppo di PS risultano in fase con l'attività di movimentazione di gas nel Cluster-B; tuttavia la stessa entità di spostamenti verticali, sia positivi che negativi, si registra per questi PS anche in periodi (marzo 2015-gennaio 2016 ad esempio) in cui non si è avuta movimentazione di gas nel Cluster-B, ed allo stesso modo nella componente orizzontale est-ovest (si veda in figura 4.10 in appendice, il periodo tra marzo 2015 e gennaio 2016 dove massime oscillazioni si verificano in assenza di movimentazione di gas). Le osservazioni riguardo al comportamento "anomalo" di questo gruppo di PS portano ad escludere un'influenza della movimentazione di gas nel sottosuolo del cluster; col proseguimento del monitoraggio verrà posta particolare attenzione al movimento verticale di quest'area.

Analogamente a quanto operato nei report precedenti, sono state svolte una serie di 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, laddove la roccia serbatoio è più spessa e dunque più soggetta a dilatazione o compattazione. Questa è anche la parte dove sono presenti i pozzi maggiormente utilizzati in fase di stoccaggio, C1, C2 e C4. 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 principali di attività di reservoir degli ultimi 3 anni. Le serie sono calcolate riportando a zero il valore di spostamento di ogni punto all'inizio di ogni fase.

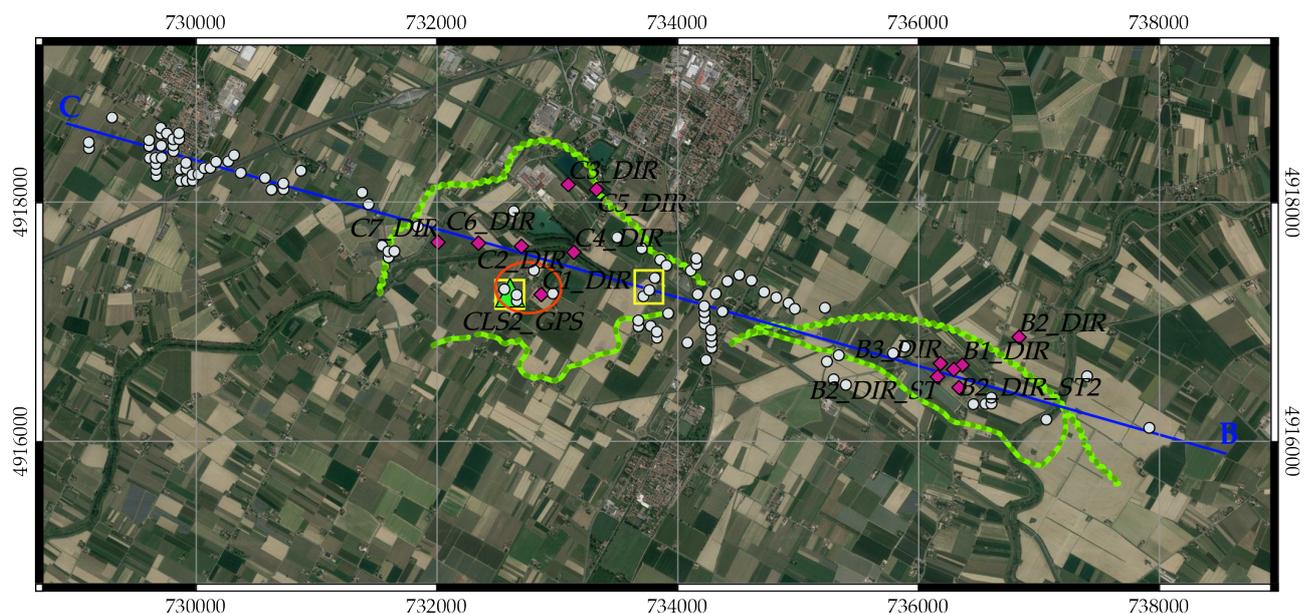


Figura 4.2: Mappa dei limiti di reservoir dei Cluster C e B; localizzazione del profilo CB (in blu) lungo il quale sono stati proiettati i bersagli radar (in bianco) che si distribuiscono attorno ad esso; il cerchio arancio al centro del Cluster-C evidenzia i bersagli radar di cui sono state analizzate le serie temporali mostrate in figura 4.4; i quadrati gialli evidenziano i bersagli radar le cui serie temporali orizzontali sono analizzate in figura 4.5.

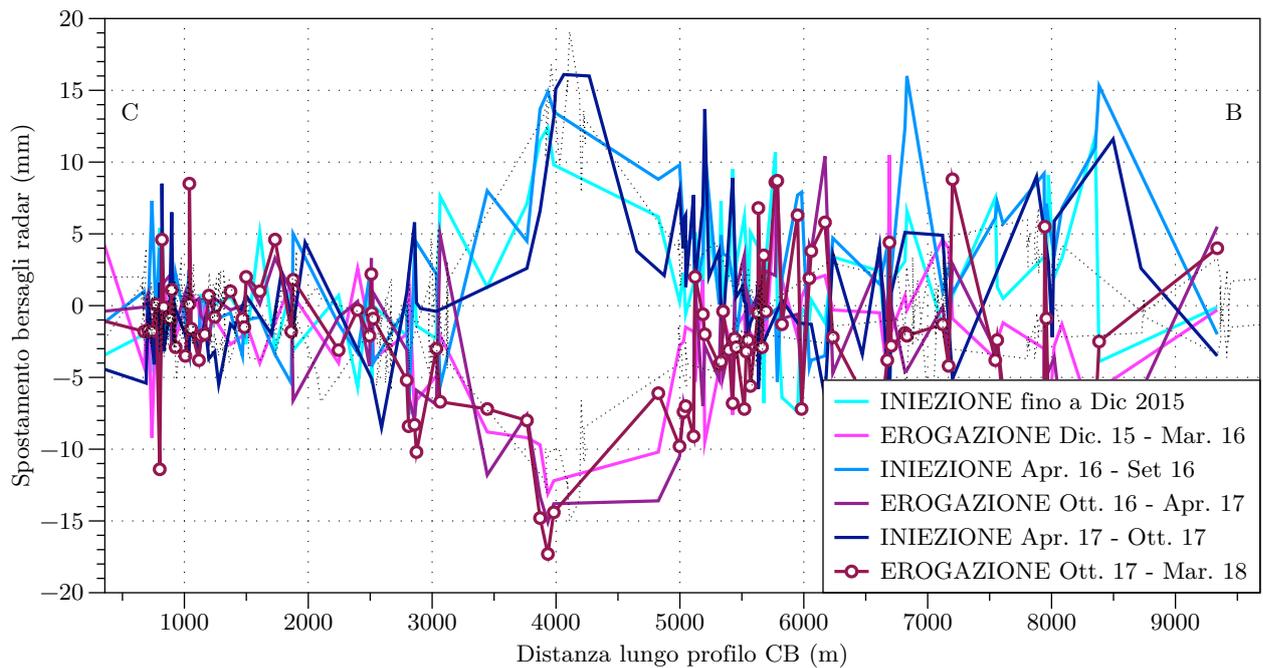


Figura 4.3: Profilo longitudinale di spostamento verticale ottenuto dai dati delle serie temporali Sentinel-1 (in colore solido) e TerraSAR-X per confronto (in nero tratteggiato). Le curve del grafico sono costruite proiettando lungo il profilo CB, in blu nella mappa di figura 4.2, i valori di spostamento 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.

Come si può notare i massimi valori di spostamento si distribuiscono esattamente in prossimità del centro del Cluster-C e ben descrivono il cono di sollevamento/subsidenza creato dalle attività di stoccaggio.

Durante le 3 fasi di iniezione rappresentate in figura 4.3, nell'intorno del Cluster-C (tra 3000 e 5000 m in ascissa) si osservano:

- un sollevamento relativamente minore a seguito della prima iniezione (≈ 183 MSmc, 2013 – nov 2015, curva ciano);
- un sollevamento massimo di $\approx + 19$ mm nel caso della seconda fase di iniezione (≈ 197.5 MSmc nel periodo apr-ott 2016, curva azzurra);
- un sollevamento massimo di $\approx + 17$ mm nel caso della della terza di iniezione (≈ 226.5 MSmc apr – ott 2017, curva blu con punti bianchi); Questo avviene in virtù del fatto che la serie Sentinel-1 inizia a catturare gli spostamenti al di sopra del della concessione, a partire da marzo 2015 e pertanto si perde la deformazione accumulatasi nel periodo precedente.

Analogamente, per quanto riguarda il Cluster-C (tra 3000 e 5000 m in ascissa) rispetto alle 3 fasi di erogazione rappresentate, si possono notare i coni di subsidenza che risultano proporzionali al quantitativo di gas prelevato ogni volta dal reservoir:

- un abbassamento massimo di ≈ -13 mm a fronte di 136.5 MSmc di gas tra dicembre 2015 - marzo 2016, curva porpora.
- un abbassamento massimo di ≈ -15 mm a fronte di 202.2 MSmc di gas tra novembre 2016 - marzo 2017, curva viola;
- un abbassamento massimo di ≈ -17 mm a fronte di 228 MSmc di gas tra novembre 2017 e marzo 2018, curva viola con pallini.

Il cono di abbassamento della più recente fase di erogazione descritta dalla linea viola con pallini risulta appena più marcato di quella della precedente fase erogativa descritta dalla linea porpora. In figura 4.3 si notano, riguardo il Cluster-B (tra 7500 e 8500 m in ascissa):

- spostamenti di $\approx +13$ e $+14$ mm dei 2 PS al di sopra del Cluster-B la cui scarsa validità del dato è stata già discussa in precedenza;
- spostamenti di ≈ -4 mm, correlabili con la erogazione di gas in corrispondenza della parte sud-orientale del pool B (curve viola e porpora).

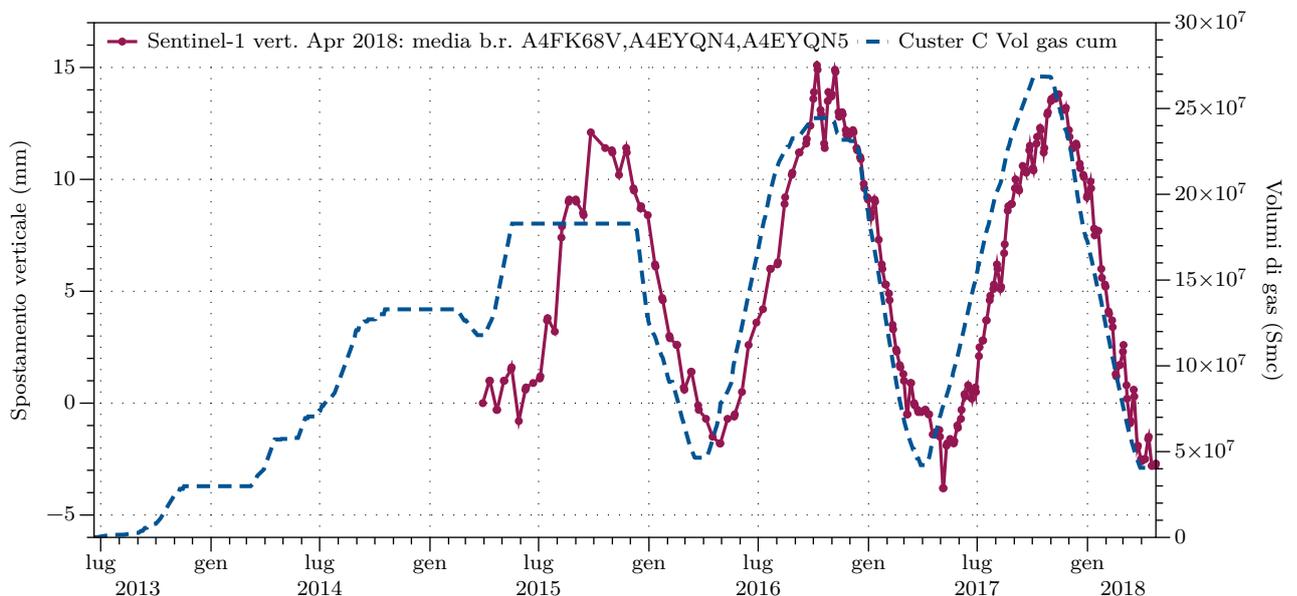


Figura 4.4: Confronto tra medie degli spostamenti verticali dei bersagli radar (mm) individuati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2) e volumi movimentati nel pool CC1.

Per meglio descrivere la possibile influenza al suolo delle attività di stoccaggio sono stati isolati un gruppo di bersagli radar all'interno del Cluster-C in prossimità del centro del reservoir, posizionati tra i pozzi C1, C2 e C4. L'andamento delle medie degli spostamenti di tale gruppo di punti mostra una buona correlazione sia con l'andamento dei volumi di gas movimentati nel pool CC1 (Fig. 4.4), sia con le pressioni di poro misurate al fondo del pozzo C1 (Fig.1.4). In particolare, nel semestre in esame (a partire da novembre 2017) osserviamo un abbassamento medio dei bersagli radar di ≈ -16 mm a fronte di una iniezione di 228.5 MSmc e di un relativo drop di pressione di ≈ -85 kg/cm².

Anche nella componente orizzontale est-ovest si osserva una contemporanea inversione del trend deformativo, tra novembre 2017 e aprile 2018 (Fig. 4.5): si osservano spostamenti orizzontali che "avvicinano" i PS al centro del Cluster-C di ≈ 8 mm verso est, per punti posti a ridosso di CLS2 (curva blu con valori passanti da negativi a positivi in Fig. 4.5). Questo comportamento risulta conforme con quello della stazione GPS CLS2 (Fig. 5.4).

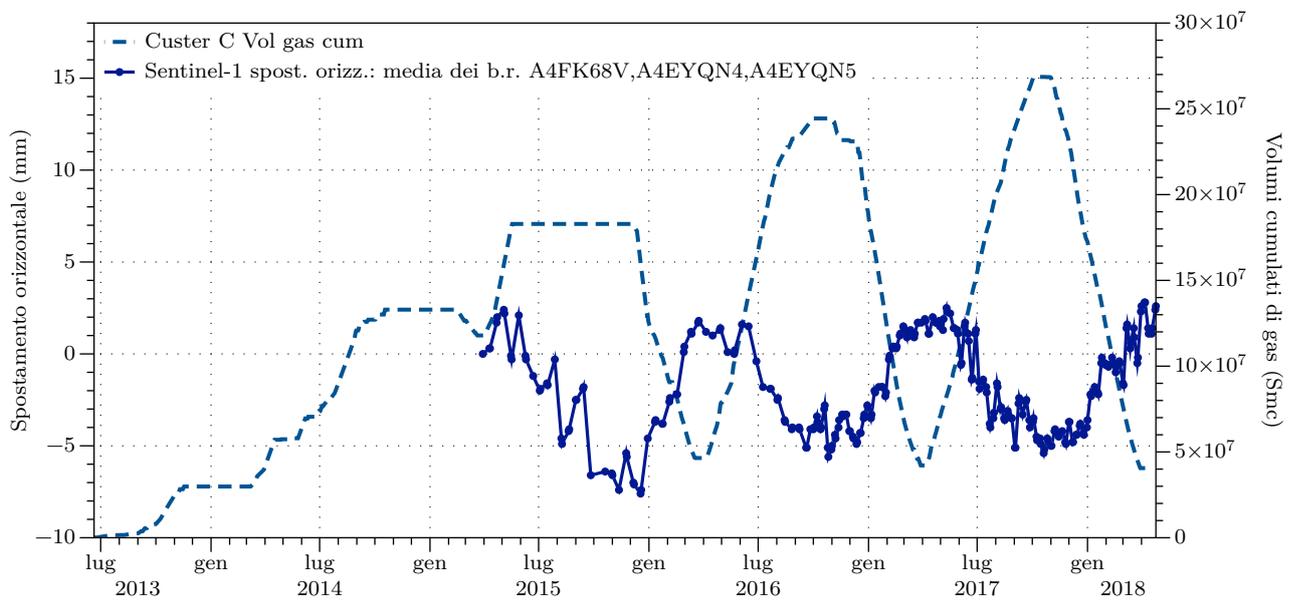


Figura 4.5: Confronto tra la movimentazione di gas e le serie temporali medie di spostamento lungo la componente orizzontale di bersagli radar individuati a ridosso della stazione GPS CLS2 (curva blu). La posizione dei bersagli radar analizzati in questa figura è evidenziata dal quadrato giallo attorno a CLS2 in figura 4.2.

4.2 Analisi SqueeSAR in relazione alla movimentazione di gas nel Cluster A

Le serie temporali analizzate da TRE ALTAMIRA (Cotignola e San Potito Relazione Tecnica – Aggiornamento Aprile 2018 REF.: JO17-361 – 403– REP 1.1, 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.

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 4.6);
- 2) l'analisi della serie temporale media calcolata tra un gruppo di punti che si trovano nei pressi dei pozzi direzionati San Potito 1 DIR e San Potito A2-DIR (cerchi arancio nella mappa di Fig. 4.6), perforati sulla culminazione strutturale del reservoir di San Potito.

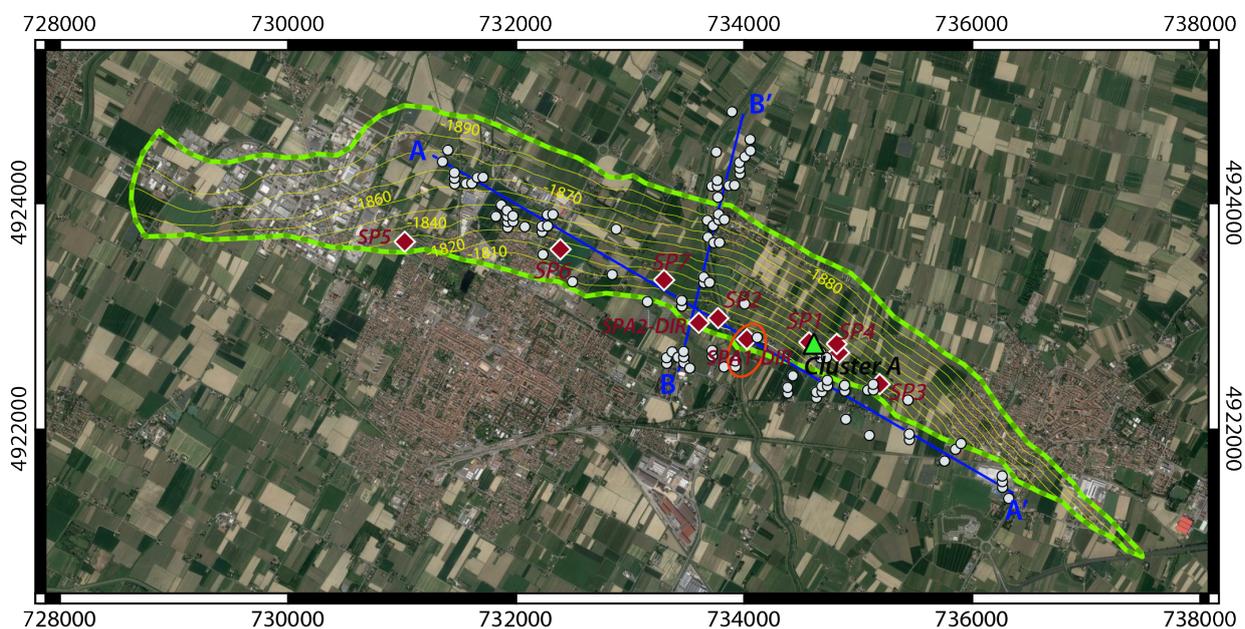


Figura 4.6: Mappa della proiezione in superficie del top del giacimento di San Potito, con le relative isobate e la posizione dei fondo pozzo, in bordeaux; in bianco i bersagli radar della serie Sentinel-1 aggiornata ad aprile 2018, i cui spostamenti sono stati proiettati lungo i profili AA' e BB' per creare le figure 4.7 e 4.8; il cerchio arancio delimita i bersagli radar analizzati in figura 4.9.

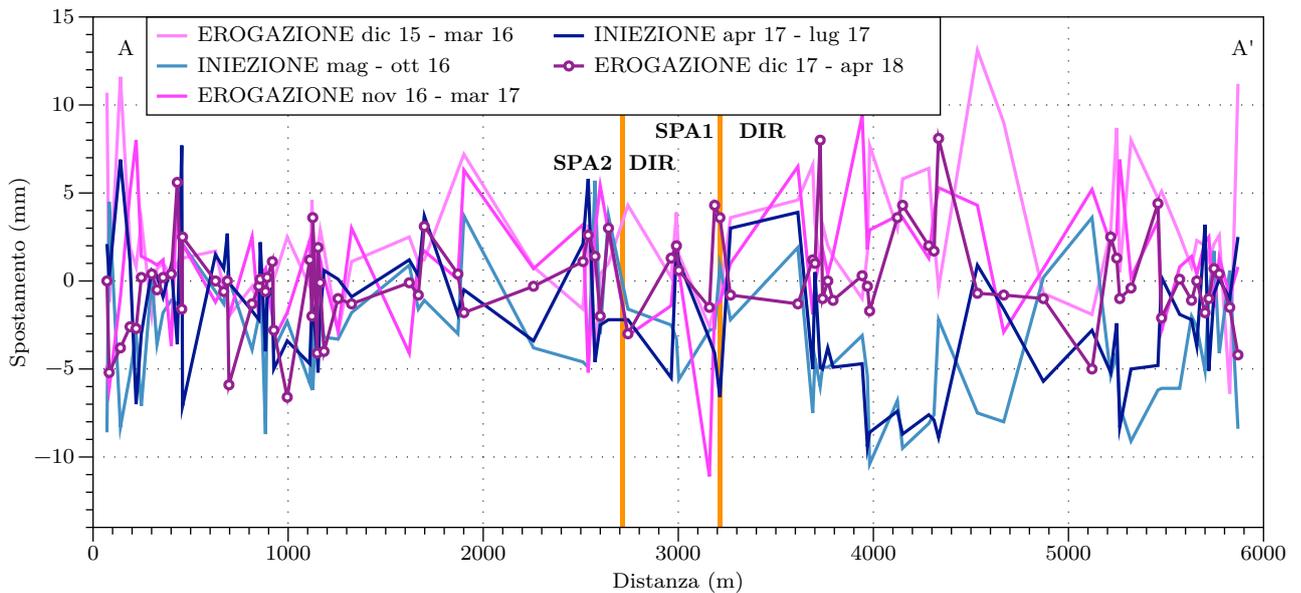


Figura 4.7: Spostamenti dei bersagli radar distribuiti lungo il profilo AA' (mappa di Fig. 4.6); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee arancio localizzano i pozzi San Potito A1-DIR e A2-DIR.

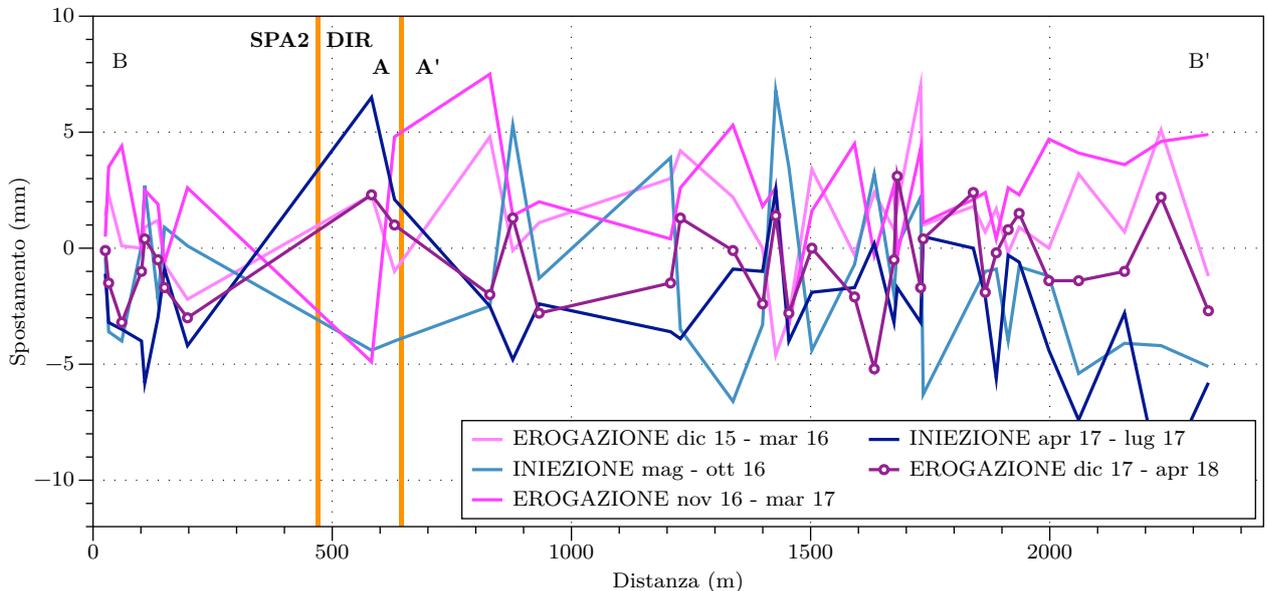


Figura 4.8: Spostamenti dei bersagli radar distribuiti lungo il profilo BB' (mappa di Fig. 4.6); in azzurro e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in rosa, porpora e viola quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee arancio 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.

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 4.7 e 4.8 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 contenute entro i 5 - 6 mm (sia in positivo che in negativo), con oscillazioni massime tra una fase e l'altra di ± 10 mm. Nelle figure 4.7 e 4.8 (ed in maniera più evidente lungo il profilo AA') si può notare come le curve azzurra e blu, che descrivono gli spostamenti dei PS avvenuti durante le fasi di iniezione (maggio-ottobre 2016 e aprile-luglio 2017), si assestino al di sotto delle curve rosa, porpora e viola (spostamenti avvenuti durante le fasi di erogazione operate rispettivamente nei periodi dicembre 2015-marzo 2016, novembre 2016-marzo 2017, novembre 2017-marzo 2018) in maniera evidente solo nella parte sud orientale del profilo AA' (tra i 3500 e i 5500 m). Con ogni probabilità (dato l'ancora esiguo quantitativo di gas movimentato nel Cluster-A), i modesti spostamenti dei bersagli radar sono influenzati essenzialmente dalle compattazioni estive e dalle dilatazioni invernali del suolo, dovute alle condizioni meteorologiche ed al prelievo delle acque di falda, maggiore nelle stagioni calde. Tale comportamento viene confermato osservando l'andamento della serie temporale media dei

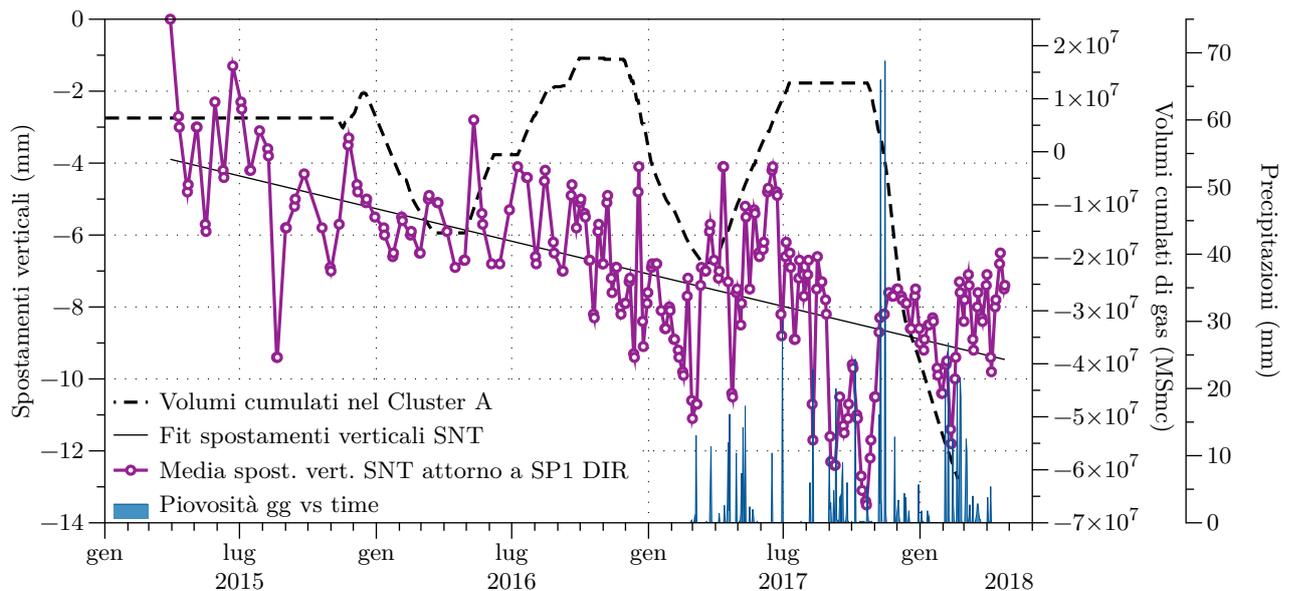
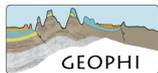


Figura 4.9: Serie temporale media di spostamento del gruppo di bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito A1-DIR (cerchio giallo in figura 4.6), al di sopra della culminazione strutturale del giacimento in relazione alla movimentazione di gas ed alle precipitazioni.

bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito 1 DIR sulla culminazione strutturale del Cluster-A (Fig. 4.9): seppur caratterizzata da uno scatter piuttosto elevato (soprattutto nel primo periodo di acquisizione) la serie mostra un generale trend di abbassamento, lineare e lieve ($\approx 1-2$ mm/anno) fino a fine aprile 2018. Sul Cluster-A, a seguito dell'iniezione 2017 (33.8 MSmc di gas) non si era osservato alcun sollevamento come al di



sopra del Cluster-C, ma al contrario un abbassamento, perdurato sia durante l'iniezione che durante il periodo di inattività, dovuto con ogni probabilità alla compattazione estiva dei sedimenti superficiali. Durante l'ultima fase di erogazione, tra novembre e dicembre 2017 i bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito 1 DIR (Fig. 4.9) registrano un sollevamento di $\approx + 6$ mm, mentre invece tra gennaio e febbraio 2018 un abbassamento di $\approx - 3$ mm (in accordo con la subsidenza attesa durante l'estrazione di gas), subito recuperato (+ 5 mm) entro la fine di aprile. In sostanza avviene dunque un complessivo sollevamento che ben si correla con la naturale dilatazione dei sedimenti durante l'inverno e la primavera, ed i cui piccoli cambi di fase sembrano poter essere più facilmente associati alle variazioni delle precipitazioni piuttosto che all'estrazione di gas (Fig. 4.9).

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, dalle quali si possono osservare:

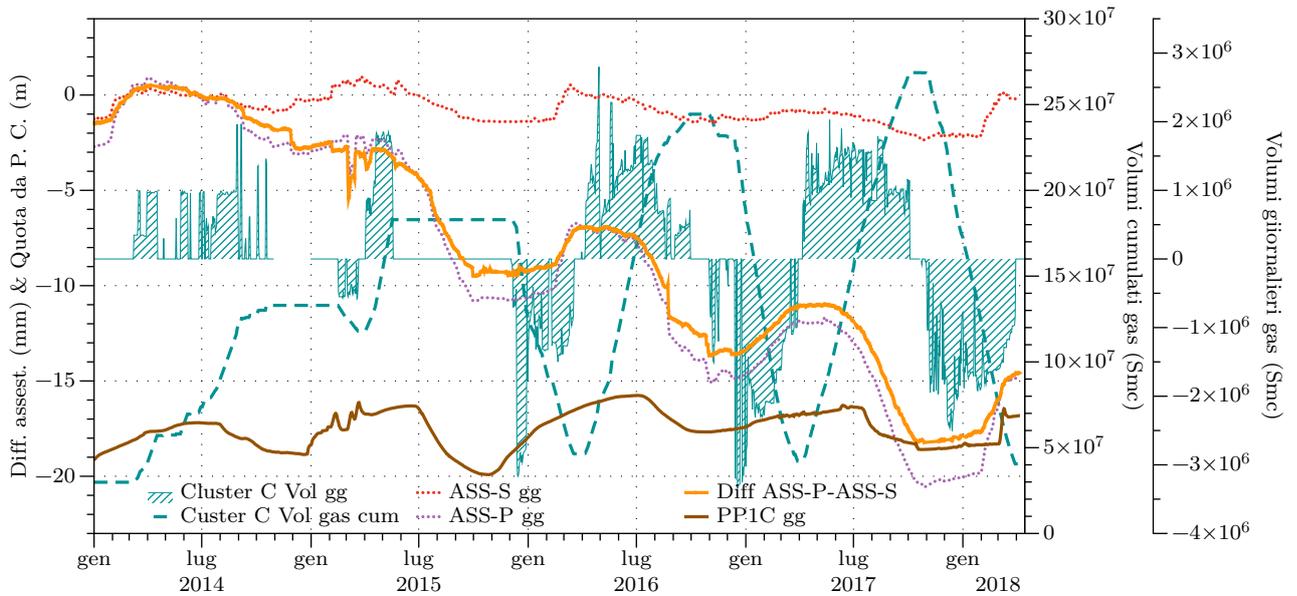


Figura 5.1: Andamento degli strumenti profondi in relazione alla movimentazione di gas nel reservoir del Cluster-C per tutto il periodo di monitoraggio

- una correlazione diretta tra l'andamento di lungo periodo del piezometro profondo (in innalzamento di quota rispetto a P. C.) rispetto al quantitativo di gas imposto complessivamente nel reservoir. Tuttavia le variazioni di quota di PP1C non seguono i cicli di iniezione/erogazione, ma meglio si correlano con i cicli meteorologici stagionali; in questo semestre, le oscillazioni della quota piezometrica risultano all'interno del range di oscillazioni già registrate dallo strumento ($\approx +1$ m), nonostante una "anomala" ed improvvisa risalita tra il 4 ed il 13 marzo. La scarsa significatività di tale dato è stata discussa nel paragrafo 3.1.
- una correlazione inversa tra il trend di deformazione di lungo termine registrato dall'ASS-P (in compattezza) ed il quantitativo di gas imposto complessivamente nel reservoir. Da gennaio 2017 anche ASS-P sembra rispondere alla movimentazione di gas in termini di inizio e fine del suo ciclo di dilatazione (in corrispondenza con la fase di erogazione) e compattazione (in corrispondenza con la fase di iniezione). Come si può vedere dalle figure 5.2 e 5.3, la curva arancio (differenza tra le deformazioni dei 2 assestetri) che rappresenta la sola componente di deformazione profonda di ASS-P, risulta speculare, e dunque

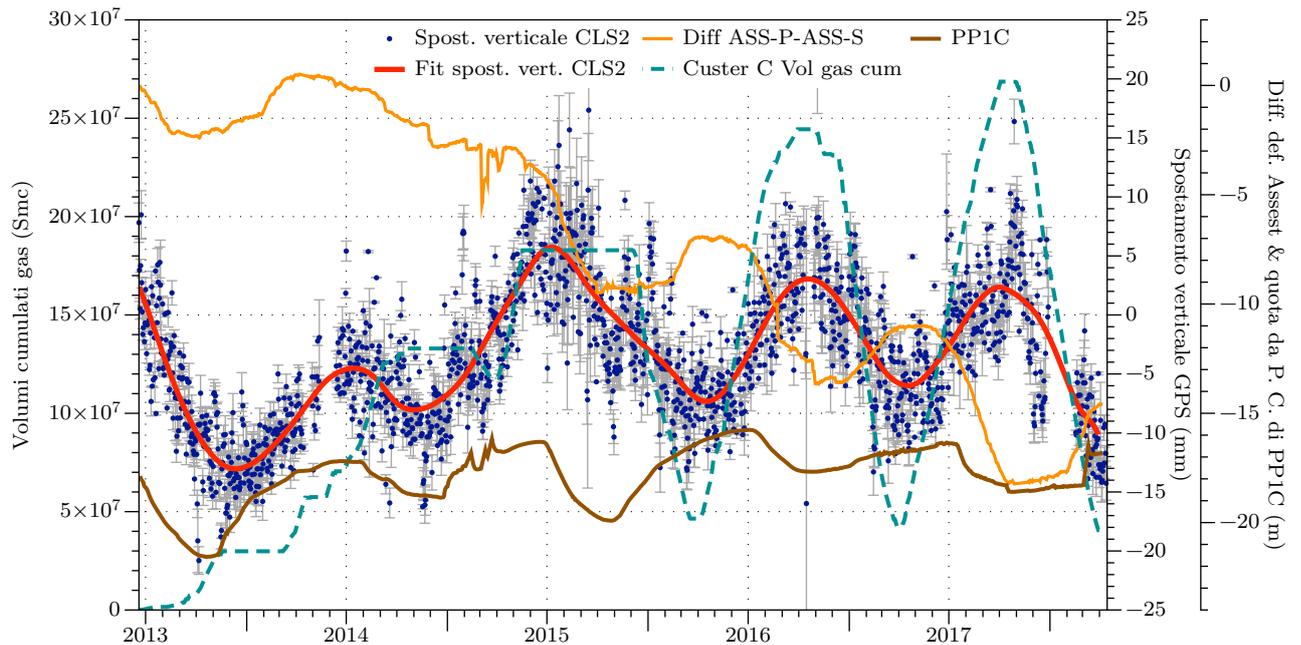


Figura 5.2: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS (componente verticale; nel sistema di riferimento Igb08) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con l'andamento del piezometro profondo e con quello della differenza tra le misure degli assestimetri.

allineata in termini di cambi di tendenza, alle serie temporali GPS ed InSAR, che non seguono i cicli di deformazione stagionale;

- la dilatazione descritta dalla componente profonda di ASS-P (curva arancio) durante la fase di erogazione tra novembre 2017 e marzo 2018, che ammonta a $\approx +6$ mm.

A partire dal 2016 (\approx ultimi 2 anni di monitoraggio), il dato GPS, nella sua componente verticale, mostra un andamento che mima la movimentazione di gas nel Cluster C: i punti di flesso della serie non si posizionano più in corrispondenza dei cambi di stagione, ma dell'inizio/fine delle fasi di erogazione/iniezione, descrivendo trend di abbassamento in fase di erogazione (dicembre 2015 - aprile 2016, novembre 2016 - aprile 2017 e novembre 2017 - aprile 2018) e trend di innalzamento in fase di iniezione (aprile - ottobre 2016 e aprile - settembre 2017, Fig. 5.2). L'ampiezza di tali oscillazioni non mostra però scostamenti significativi rispetto all'andamento stagionale misurato prima del 2016 ed è dunque confrontabile con le oscillazioni dei periodi in cui lo stoccaggio non era a pieno regime, sebbene nell'ultimo semestre il consistente abbassamento registrato dall'antenna, risulti in generale maggiormente accentuate rispetto agli "abbassamenti" precedenti. L'ampiezza di tali oscillazioni 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 FERR di Ferrara (Fig. 5.3), che ne evidenziano lo sfasamento in termini temporali dei punti di flesso (inizio delle fasi di sollevamento e abbassamento).

Dall'osservazione delle figure 5.2 e 5.3 si evince che:

- I Δ di spostamento di CLS2 rientrano nell'ordine della stagionalità, ma i punti di flesso della serie GPS (curva fit in rosso) sono allineati con quelli descritti dalla curva dei volumi movimentati nel reservoir (in tratteggio) e non sui punti di flesso tipici della stagionalità (ad es: curva blu di FERR in Fig. 5.3);
- I Δ di spostamento di GPS e InSAR mostrano valori tra loro confrontabili: dalla mappa in figura 4.1, notiamo come CLS2 è posizionata in un'area che, secondo il dato InSAR, ha subito nel semestre in esame deformazioni fino a ≈ -16 mm a seguito della fase di erogazione 2017-2018. Tale entità di deformazione rientra comunque nel range di spostamento registrato anche dalla stazione CLS2, in questa fase di attività (componente up media ≈ -15 mm, max ≈ -22 mm, Fig. 5.2). Le lievi differenze riscontrate possono essere più semplicemente dovute alla diversità delle due tecniche di rilevamento, sia in termini di numero di sensori e dunque di distribuzione spaziale, che di frequenza delle acquisizioni. A tal proposito, per confrontare in modo esaustivo il dato derivante dalle due tecniche, sarebbe interessante installare presso la stazione GPS un bersaglio radar artificiale (*corner reflector*) i cui spostamenti possano coincidere con quelli di CLS2.
- I cicli di spostamento della componente verticale di GPS e InSAR (curva fit in rosso e bordeaux rispettivamente, Fig. 5.3) sono perfettamente allineati ai cicli di movimentazione di gas (curva tratteggiata in nero, Fig. 5.3), con un leggerissimo shift tra spostamento e movimentazione di gas.

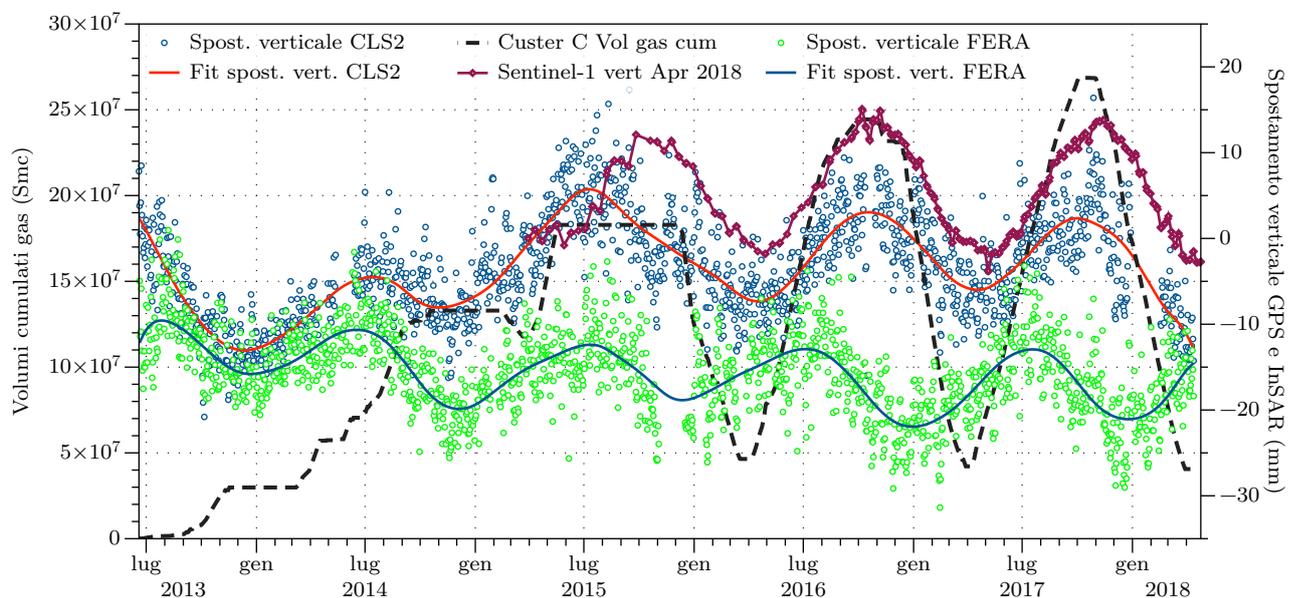


Figura 5.3: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS (componente verticale; nel sistema di riferimento IGB08) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con la serie Sentinel-1 ad aprile 2018 e con la serie temporale GPS della stazione FERR.

Così come nei semestri precedenti, le componenti orizzontali di spostamento GPS evidenziano una forte 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. Nell'arco temporale novembre 2017 aprile 2018, si verifica uno spostamento positivo sia lungo la componente Est (9 mm verso est) che lungo quella Nord (9/10 mm verso nord). Si nota un leggero "ritardo" nella risposta della componente Nord, rispetto alla Est. La composizione di tale moto restituisce uno spostamento che avvicina la stazione al centro del Cluster-C di ≈ 13 mm in direzione nord-est. Questo dato conferma l'influenza sull'andamento della antenna GPS da parte dell'attività di erogazione che, creando la bolla di subsidenza (Fig. 4.1), "avvicina" la stazione CLS2 al centro del reservoir (Fig. 5.4). Tale avvicinamento viene registrato anche dai bersagli radar Sentinel-1 individuati attorno alla stazione: come si vede in figura 5.4, la serie temporale di spostamento orizzontale Sentinel-1 (curva arancio) ha infatti andamento simile alla componente est della serie GPS (punti blu e curva fit rossa in Fig. 5.4).

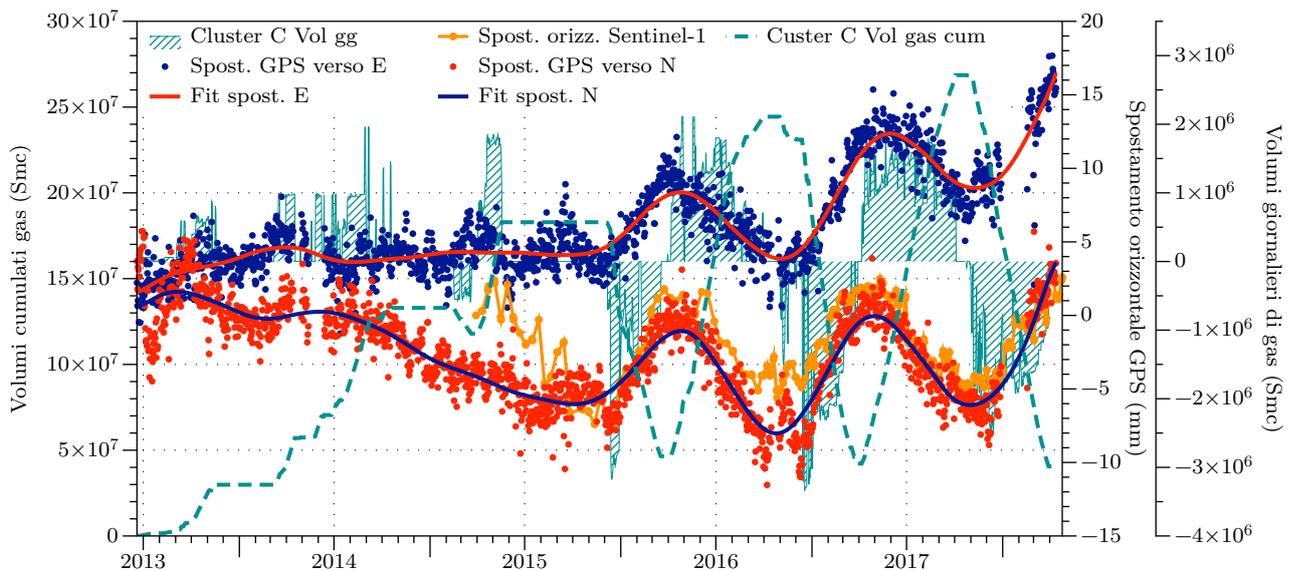
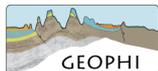


Figura 5.4: Confronto tra la serie temporale delle posizioni orizzontali della stazione GPS CLS2 con la movimentazione di gas nel Cluster-C. Gli spostamenti sono riferiti alla stazione GPS FERR di Ferrara, allo scopo di eliminare la componente crostale del moto; in rosso la componente nord e in blu la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

Riassumendo, constatiamo come gli strumenti superficiali e profondi (Piezometri ed Assestimetri) non mostrano andamenti da evidenziare; nel semestre in esame, tutte le misure rientrano tra i valori già registrati nel corso del presente monitoraggio, ad esclusione delle misure assestimetriche che, a fine settembre, registrano i loro minimi assoluti. In questo trend di compattazione, le ampiezze delle massime variazioni registrate dagli



strumenti registrano oscillazioni già verificatesi in altri anni per gli stessi strumenti anche in occasione di scarsa attività del reservoir (es. aprile–ottobre 2015). Questo suggerisce che le deformazioni del sottosuolo fino a -350 metri di profondità e l'andamento delle falde investigate dai piezometri siano principalmente governati da variabili meteorologiche, senza evidenti "effetti" imputabili alla movimentazione di gas nel sottosuolo.

6 Conclusioni

A fine marzo 2018, la strumentazione installata presso l'impianto del Cluster C continua ad essere a tutti gli effetti funzionante.

Dal Cluster-C tra il 23 ottobre 2017 ed il 31 marzo 2018, sono stati erogati ≈ 228 MSmc di gas; al 31 marzo 2018 risultano stoccati nel Cluster-C ≈ 40.7 MSmc di gas.

Dal Cluster-B tra il 23 ottobre 2017 ed il 9 febbraio 2018, sono stati erogati ≈ 31.9 MSmc di gas; al 31 marzo 2018 risultano stoccati nel Cluster-B ≈ 6.3 MSmc di gas.

Dal Cluster-A tra il 15 dicembre 2017 ed il 31 marzo 2018 sono stati erogati ≈ 68.6 MSmc di gas; al 31 marzo 2018 risultano erogati complessivamente dal Cluster-A ≈ 55.7 MSmc di gas (grazie alla messa in opera del pozzo SP-A2DIR).

Così come nei semestri precedenti, anche nel semestre ottobre 2017 - marzo 2018 le tecniche di monitoraggio satellitare, GPS ed InSAR, evidenziano una relazione diretta e proporzionale tra le deformazioni al suolo e le attività di stoccaggio con sollevamento/subsidenza durante i periodi di iniezione/erogazione, più consistenti nel centro del Cluster C; l'inversione delle fasi deformative coincide con i periodi di passaggio tra le fasi di iniezione ed erogazione in e dal reservoir.

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 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 $\approx + 1.6$ mm/anno: il fatto che la movimentazione di volumi di gas, pari a quelli di un completo ciclo di iniezione/erogazione (riempimento/svuotamento) nel pool CC1, influenzi inequivocabilmente i movimenti della stazione CLS2, fa sì che gli spostamenti semestrali (per ciclo di stoccaggio) ne descrivano il comportamento in modo più efficace, rispetto alle velocità medie della serie.

Gli spostamenti di breve periodo nella componente verticale mostrano infatti relazioni causa-effetto con l'estrazione cumulata tra novembre 2017 - aprile 2018 (abbassamento di $\approx - 15$ mm a fronte di ≈ 228 MSmc erogati), con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2017 (sollevamento di $\approx + 10$ mm a fronte di ≈ 226.5 MSmc) e con tutti i cicli di movimentazione di gas precedenti, a partire da dicembre 2015. I cambi di tendenza coincidono con l'inizio/fine delle fasi di erogazione/iniezione e non con i cambi di stagione, anche se i valori delle oscillazioni non si discostano da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni legati alle dinamiche meteorologiche stagionali (periodi antecedenti dicembre 2015).

Anche nel semestre di erogazione 2018 le componenti orizzontali della serie risentono della attività di stoccaggio, registrando uno spostamento in concomitanza dell'estrazione di gas (ottobre 2017-marzo 2018) nell'ordine di $+ 9$ mm E e $+ 10$ mm N, in avvicinamento, verso nord-est, al centro del Pool CC1 (Cluster-C).

Le nuove serie temporali di interferometria, prodotte dall'elaborazione di scene acquisite nell'intervallo temporale 30/03/2015 - 30/04/18 dal satellite Sentinel-1, evidenziano per il semestre in esame un abbassamento verticale nell'intorno del Cluster-C, porzione di reservoir dove è stato erogato il maggior quantitativo di gas (≈ 228 Milioni di Smc al 31 marzo 2018), con massimi di abbassamento fino a - 16 mm sopra il centro del giacimento.

Anche la componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia una inversione del trend deformativo a partire da ottobre 2017, con spostamenti orizzontali che "avvicinano" i PS al centro del Cluster-C di ≈ 8 mm (fino a ≈ 13 mm verso est per punti posti ad ovest del centro del reservoir, con avvicinamento al centro di subsidenza). Questa dinamica è di breve termine, e si inserisce in un andamento con generale trend di sollevamento (evidenziato dalle serie GPS) di ≈ 1.5 mm/anno che appaiono indipendenti dalla movimentazione di gas.

L'andamento degli spostamenti dei bersagli radar al centro del Cluster-C mostra dunque una buona correlazione sia con l'andamento dei volumi di gas movimentati nel pool CC1, sia con le pressioni di poro misurate al fondo del pozzo C1 DIR.

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.

Sul Cluster-B in concomitanza con l'attività di erogazione tra ottobre 2017 e marzo 2018 si osserva una area in subsidenza con valori medi tra i - 6-8 mm, localizzata nella parte sud-orientale del reservoir.

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 dei pozzi SPA1-DIR e SPA2-DIR (quest'ultimo attivo durante tutta la fase invernale di erogazione), i bersagli radar registrano nel semestre ottobre 2017-marzo 2018 un sollevamento complessivo minimo di ≈ 2 mm (con oscillazioni tra $\approx - 3$ e $+ 6$ mm), correlabile con una scarsa dilatazione invernale dei sedimenti.

Gli assestimetri ed i piezometri installati continuano a monitorare in modo efficiente le deformazioni poro-elastiche nei primi 350 m di sottosuolo.

Le deformazioni registrate dall'assestometro superficiale vengono ottimamente correlate alle oscillazioni piezometriche superficiali, intermedie e profonde, suggerendo che il sistema continui ad essere influenzato principalmente dalle precipitazioni, dalle temperature e dalla dinamica degli 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, con incongruenze in termini quantitativi (nel caso dell'assestometro) e in termini temporali (nel caso piezometro profondo): essi appaiono pertanto maggiormente influenzati dalle dinamiche meteorologiche stagionali e dalla compattazione dei sedimenti alluvionali in cui sono installati.

L'andamento dell'assestometro profondo continua a registrare una compattazione a ritmo di $\approx - 4$ mm/anno, con dinamiche di deformazione correlate temporalmente con le fasi di iniezione/erogazione: l'ipotesi già avanzata, secondo cui il rigonfiamento del reservoir dovuto alla iniezione di gas compatti i sedimenti che lo circondano (e

dunque anche quelli che gli stanno sopra) è da tenere ancora in considerazione, ma le deformazioni registrate finora non appaiono dovute alla movimentazione di gas nel Cluster-C, poiché hanno ampiezze non proporzionali al quantitativo di gas in posto nel reservoir.

Sebbene il trend di innalzamento della quota piezometrica dell'acquifero sia in accordo con l'ipotesi di una possibile compattazione (aumento di pressione nell'acquifero) indotta dallo stoccaggio, la dinamica delle sue oscillazioni appare invece chiaramente influenzata dai fattori meteorologici stagionali. Ricordiamo che 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. 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.

Appendice A

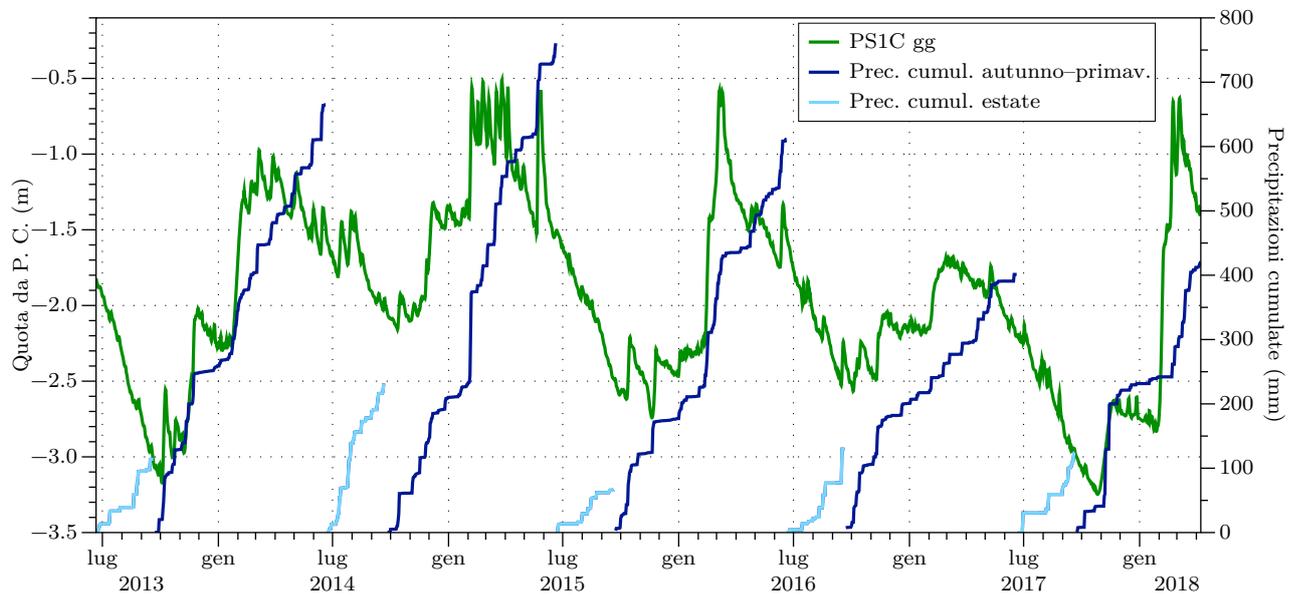


Figura 3.6: Confronto tra le variazioni della quota giornaliera media da P. C. nel piezometro superficiale con le precipitazioni giornaliere cumulate nell'intero periodo di monitoraggio fino a ottobre 2017. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale del piezometro, le cumulate vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno di ciascun anno e riportate a zero all'inizio di ogni estate (stagione secca); dai valori di quota del piezometro sono stati scartati in base all'analisi statistica quelli con deviazione standard dalla media ≥ 0.05).

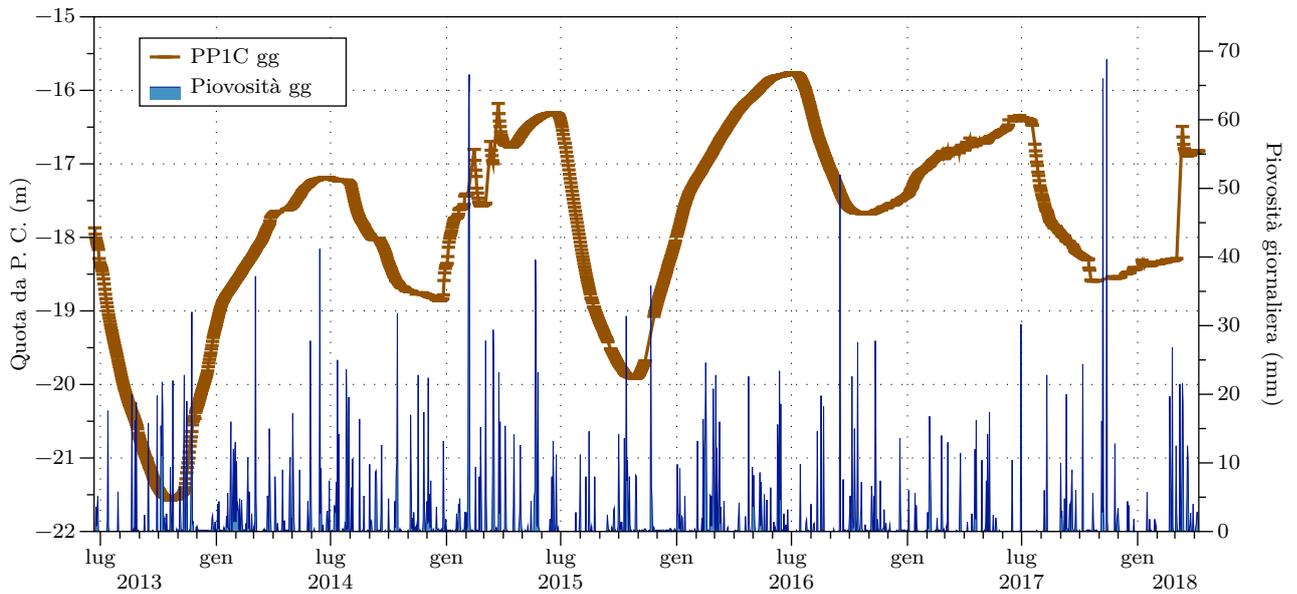


Figura 3.7: Confronto tra variazioni di quota giornaliera media da P. C. di PP1C e le precipitazioni giornaliere.

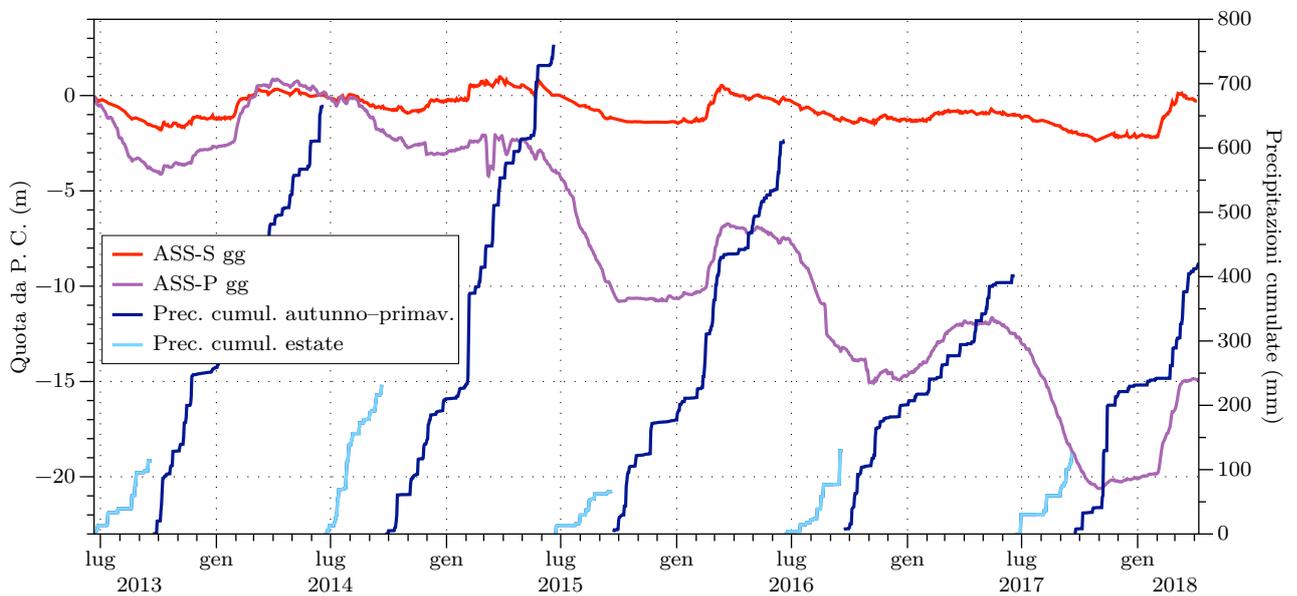


Figura 3.8: Relazione tra l'andamento degli assestimetri superficiale (ASS-S) e profondo (ASS-P) e le precipitazioni cumulate nell'intero periodo di monitoraggio, fino ad aprile 2018. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale degli strumenti, le cumulate della piovosità vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno di ciascun anno e riportate a zero all'inizio di ogni estate (stagione secca).



Figura 3.9: Relazione tra le deformazioni giornaliere medie registrate lungo l'asta dell'assestometro superficiale (ASS-S) e le oscillazioni di quota nel piezometro superficiale PS1C, durante l'intero periodo di monitoraggio.

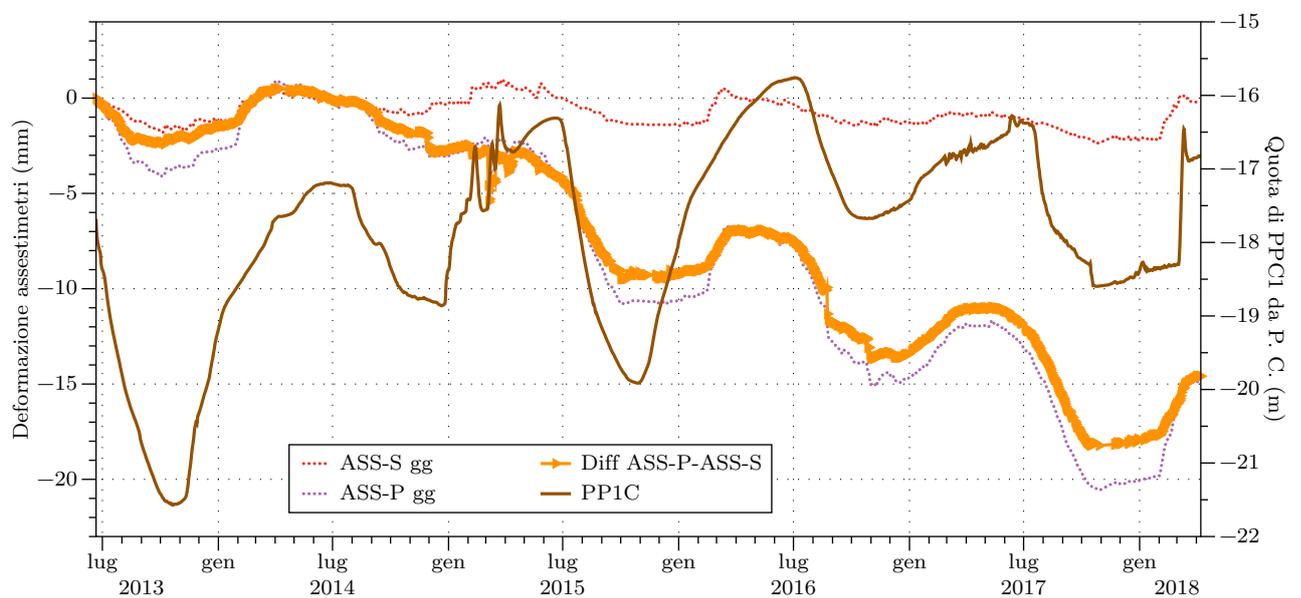


Figura 3.10: Confronto tra l'andamento della deformazione profonda, tramite la differenza (curva arancione) tra i valori giornalieri di deformazione dell'ASS-P e quelli dell'ASS-S con l'andamento del piezometro profondo.

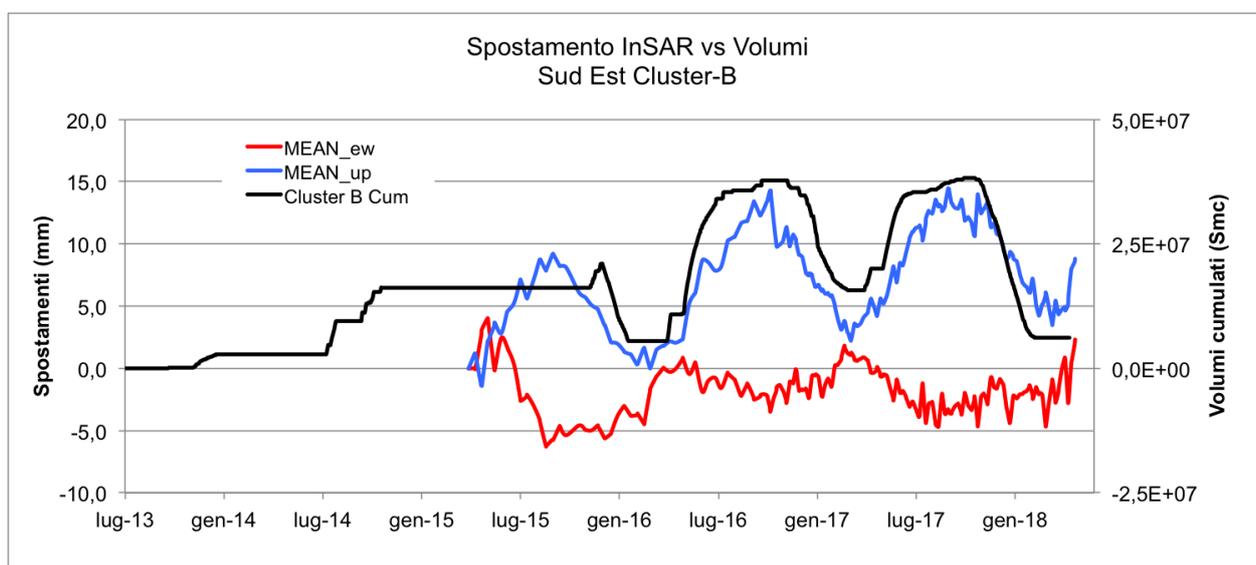


Figura 4.10: Andamento degli spostamenti medi verticali in mm (MEAN up, in azzurro) ed orizzontali (MEAN ew, in rosso) in ordinata a sinistra e volumi movimentati nel cluster B, in Smc, in ordinata a destra.