



TRE
ALTAMIRA
A CLS Group Company

Relazione Tecnica

Monitoraggio subsidenza
concessioni Cotignola e San
Potito con interferometria
satellitare

Aggiornamento Aprile 2023

Dettagli Progetto

Cliente

Nome: EDISON STOCCAGGIO S.p.A.
Indirizzo: Foro Bonaparte 31
20121 Milano
Referente: Dott. Timur Gukov

Riferimenti

Nome progetto: Monitoraggio subsidenza concessioni Cotignola e San Potito con interferometria satellitare
TRE ALTAMIRA Job Order: JO21-1610
TRE ALTAMIRA Delivery: IT4668
Numero Contratto Cliente: 5500024355 CO
Data ordine Cliente: 16/09/2021

Preparato da TRE ALTAMIRA

Autori: Fernando Bellotti
Verificato da: Chiara Giannico
Approvato da: Paolo Ferrari
Data: 12 maggio 2022
Versione: 1.0

Sommario esecutivo

EDISON Stoccaggio ha dato incarico a TRE ALTAMIRA di proseguire il servizio di monitoraggio già in atto delle deformazioni superficiali sulle concessioni di Cotignola e San Potito mediante tecnica SqueeSAR®, anche per il periodo settembre 2021 – marzo 2026, utilizzando la costellazione Sentinel-1 (SNT) a media risoluzione operativa da ottobre 2014.

TRE ALTAMIRA effettua il monitoraggio sui Siti di San Potito e Cotignola per EDISON Stoccaggio da maggio 2013, in ottemperanza alle Prescrizioni dal documento di VIA n.773 del 8/10/2007 e della Delibera della Giunta Regionale Emilia-Romagna del 29/12/2006, mediante l'utilizzo dei Satelliti RADARSAT-1 e RADARSAT-2 a partire da aprile 2003 e TerraSAR-X, da dicembre 2013.

Il contratto in essere prevede l'utilizzo del satellite Sentinel-1 per un totale di dieci aggiornamenti a cadenza semestrale fino a marzo 2026.

I risultati del quarto aggiornamento relativo a marzo 2023 sono riportati nel presente rapporto.

Lo studio ha fornito risultati in linea con l'aggiornamento precedente di ottobre 2022 documento di riferimento: JO21-1610 – 4667 – REP 1.0).

Il presente aggiornamento ha evidenziato quanto segue:

- Conferma che nel Pool A i blandi fenomeni ciclici individuati sono probabilmente connessi alle variazioni stagionali della falda acquifera
- Conferma della 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 media della stagionalità misurata per la componente verticale non supera i 15 mm.

Tavola dei contenuti

| | |
|--|-----------|
| Sommario esecutivo | 3 |
| Acronimi e abbreviazioni | 5 |
| Documenti di riferimento | 5 |
| 1. Introduzione | 6 |
| 2. Area d’interesse e immagini utilizzate | 8 |
| 2.1. Area di interesse | 8 |
| 2.2. Immagini utilizzate | 9 |
| 3. Risultati | 10 |
| 3.1. Misure in singola Geometria | 10 |
| 3.2. Stima delle componenti verticale ed Est-Ovest | 13 |
| 3.3. Stima della stagionalità | 16 |
| 3.4. Analisi dei risultati | 18 |
| 3.4.1. Pool A – San Potito | 18 |
| 3.4.2. Pool B - Cotignola | 24 |
| 3.4.3. Pool C - Cotignola | 30 |
| 3.4.4. Confronto movimenti superficiali e curva di carico-scarico | 37 |
| 3.5. Confronto misure SqueeSAR® e rete GNSS | 42 |
| 4. Dati consegnati | 57 |
| 5. Conclusioni | 60 |
| Allegati | 61 |

Modifiche al documento

| Versione | Data | Sezioni | Descrizione delle modifiche |
|----------|----------------|---------|-----------------------------|
| 01.0 | 12 maggio 2023 | Tutte | Creazione del documento |

Acronimi e abbreviazioni

| | |
|------|---|
| ASC | Geometria ascendente |
| DESC | Geometria discendente |
| GNSS | <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| LOS | Linea di vista del satellite (<i>Line Of Sight</i>) |
| REF | Punto di riferimento |
| SAR | Radar ad apertura sintetica (<i>Synthetic Aperture Radar</i>) |
| SNT | Satellite Sentinel-1 |

Documenti di riferimento

| Riferimento | Data | Titolo |
|----------------------------|------------|---|
| JO17-361 – 401– REP 1.0 | 06/12/2017 | Cotignola_RelazioneTecnica_UpdateOct2017.pdf |
| JO17-361 – 403– REP 1.0 | 30/06/2018 | Cotignola_RelazioneTecnica_UpdateApr2018.pdf |
| JO17-361 – 405– REP 1.0 | 30/11/2018 | Cotignola_RelazioneTecnica_UpdateOct2018.pdf |
| JO17-361 – 407– REP 1.0 | 30/04/2019 | Cotignola_RelazioneTecnica_UpdateMar2019.pdf |
| JO19-962–1899 – REP 1.3 | 31/01/2020 | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateOCT2019.pdf |
| JO19-962–1902 – REP 1.2 | 20/07/2020 | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateAPR2020.pdf |
| JO19-962–1904 – REP 1.0 | 09/12/2020 | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateOCT2020.pdf |
| JO19-962 –1906 – REP 1.0 | 29/05/2021 | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateAPR2021.pdf |
| JO21-1610 – 4663 – REP 1.0 | 12/11/2021 | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateSET2021.pdf |
| JO21-1610 – 4665 – REP 1.0 | 13/05/2022 | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateMAR2022.pdf |
| JO21-1610 – 4667 – REP 1.0 | 28/10/2023 | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateOCT2022.pdf |
| - | 16/01/2017 | TREALTAMIRA_Handbook.pdf |

1. Introduzione

Nell'ambito dell'attività di controllo delle deformazioni del suolo mediante interferometria satellitare, EDISON Stoccaggio ha dato incarico a TRE ALTAMIRA di proseguire il servizio già in atto di monitoraggio con tecnica SqueeSAR® sui siti di Cotignola e San Potito, anche per il periodo settembre 2021 – marzo 2026.

Il monitoraggio delle deformazioni superficiali su queste concessioni è attivo da maggio 2013 con cadenza semestrale, in ottemperanza alle Prescrizioni dal documento di VIA n.773 del 8/10/2007 e dalla Delibera della Giunta Regionale Emilia-Romagna del 29/12/2006, ed è stato effettuato da TRE ALTAMIRA, mediante l'utilizzo dei seguenti satelliti e relative coperture temporali:

Immagini RADARSAT-1 e RADARSAT-2, da aprile 2003 ad ottobre 2013

Immagini TerraSAR-X, da dicembre 2013 ad aprile 2017

Immagini Sentinel-1, da maggio 2017 ad aprile 2023

Come da specifica tecnica il progetto di monitoraggio si svolgerà su un periodo temporale di 5 anni con frequenza di consegna semestrale, le cui date seguiranno il ciclo di stoccaggio stagionale come rappresentato nella seguente tabella:

| Aggiornamento | Semestre | Analisi |
|---------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1 | 07/10/2014-30/09/2021 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 2 | 07/10/2014-31/03/2022 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 3 | 07/10/2014-30/09/2022 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 4 | 07/10/2014-31/03/2023 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 5 | 07/10/2014-30/09/2023 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 6 | 07/10/2014-31/03/2024 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 7 | 07/10/2014-30/09/2024 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 8 | 07/10/2014-31/03/2025 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 9 | 07/10/2014-30/09/2025 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |
| 10 | 07/10/2014-31/03/2026 | SqueeSAR®+Scomposizione+Report |

Tabella 1: Elenco delle consegne previste

Il servizio di monitoraggio verrà realizzato mediante l'utilizzo del satellite a media risoluzione Sentinel-1 (Banda C), in orbita da ottobre 2014, che garantisce la continuità temporale con il

monitoraggio effettuato in precedenza. I dati verranno acquisiti in doppia geometria (ascendente e discendente) per consentire la stima della componente verticale ed orizzontale est-ovest dei movimenti superficiali.

Le serie temporali fornite dal Committente per la stazione GNSS - CLS2 attiva sul sito a partire da gennaio 2014 e per la rete GNSS installata successivamente, sono confrontate con le serie storiche SqueeSAR® ottenute dalle elaborazioni SNT in geometria ascendente e discendente.

Il presente studio costituisce il quarto aggiornamento del servizio.

2. Area d'interesse e immagini utilizzate

2.1. Area di interesse

L'AOI include le aree di produzione di San Potito e Cotignola, estendendosi su una superficie di 548 km² (Figura 1).

L'estensione scelta permette un inquadramento ad ampia scala delle deformazioni in atto, consentendo verifiche indipendenti mediante confronto con dati di altre reti di misura (livellazione, GPS, strumentazione in foro). Le profondità dei giacimenti fornite dal Committente sono le seguenti: -1800 m s.l.m. per il Pool A di San Potito e rispettivamente -970 m e -860 m s.l.m. per il Pool B e il Pool C del giacimento di Cotignola.

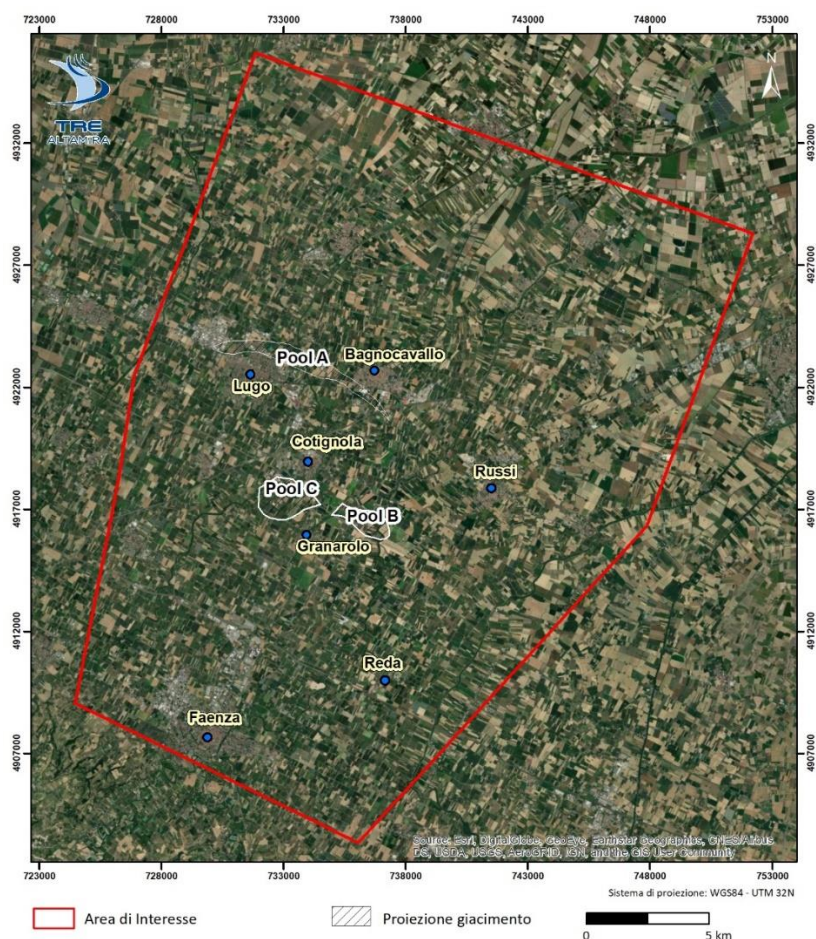


Figura 1: AOI aggiornata ad aprile 2023. Le aree con tratteggio bianco corrispondono alla proiezione in superficie del limite dei giacimenti di S. Potito e Cotignola. Pool A= Giacimento di San Potito, afferente ai pozzi del cluster A; Pool B = porzione di giacimento orientale di Cotignola, afferente ai pozzi del Cluster B; Pool C = porzione di giacimento occidentale di Cotignola, afferente ai pozzi del Custer C.

2.2. Immagini utilizzate

In accordo con le specifiche tecniche del progetto, il monitoraggio richiesto ha previsto l'utilizzo di immagini radar acquisite dalla costellazione Sentinel-1 (SNT) tra ottobre 2014 e marzo 2023, in geometria ascendente e discendente, acquisite senza soluzione di continuità rispetto al periodo precedente di monitoraggio, aprile 2017- settembre 2021.

Si ricorda che la costellazione SNT è costituita da due satelliti, SNT-1A (in orbita da ottobre 2014) e SNT-1B (in orbita da ottobre 2016), a media risoluzione (5x20 metri), con una frequenza di acquisizione media di 12 giorni nel periodo coperto dalla presente analisi..

In Tabella 2 e Figura 2 sono mostrate le distribuzioni temporali delle immagini, rispettivamente per il dato SNT ascendente e discendente elaborato. Per la lista completa delle immagini utilizzate (satellite, data di acquisizione) ed i dettagli relativi alle elaborazioni condotte si rimanda ai rispettivi Rapporti di Elaborazione allegati ai dati consegnati.

| Satellite | Geometria | # Immagini | Periodo di acquisizione |
|-----------|-------------|------------|-------------------------|
| SNT | Ascendente | 392 | 30/03/2015 – 24/03/2023 |
| SNT | Discendente | 396 | 12/10/2014 – 23/03/2023 |

Tabella 2: dataset elaborati per il presente aggiornamento

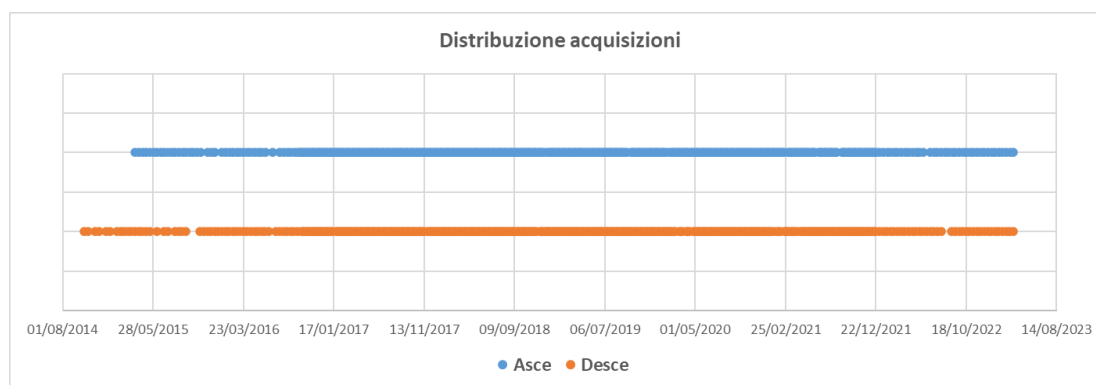


Figura 2: Distribuzione temporale delle immagini processate per il presente aggiornamento.

3. Risultati

3.1. Misure in singola Geometria

I risultati ottenuti nelle singole elaborazioni ascendente e discendente sono mostrate in Figura 3 e Figura 4. I risultati sono visualizzati per velocità media annua nel periodo analizzato.

Il campo di velocità media è in accordo con i risultati ottenuti dal precedente monitoraggio SNT aggiornato ad ottobre 2022 (documento di riferimento: JO21-1610-4667 – REP 1.0). Sono stati individuati 37.141 MP per il dataset ascendente e 42.772 per il discendente con una densità rispettiva di 68 MP/km² e 78 MP/Km².

Si ricorda che tutte le misure SqueeSAR® in singola geometria si intendono prese lungo la direzione della linea di vista del satellite (*Line of Sight* - LOS) e sono relative sia nel tempo, perché riferite alla prima misura della serie considerata, sia nello spazio, rispetto al punto di misura scelto come punto di riferimento. I punti di riferimento sono stati mantenuti coerenti con le analisi precedenti.

La precisione delle velocità medie stimate è descritta dalla deviazione standard. La deviazione standard misura il grado di dispersione di una popolazione di dati attorno al valore medio e, nel caso delle misure SqueeSAR®, si riferisce alla velocità media dei punti di misura rispetto al punto di riferimento. Dipende da diversi fattori, tra cui il numero di immagini elaborate, la lunghezza dell'intervallo analizzato e la continuità temporale di acquisizione delle immagini. Anche questa analisi ha fornito un valore medio di deviazione standard inferiore a 1 mm/anno, ad indicare un'ottima qualità delle misure ottenute. Le precisioni sono in linea con quelle calcolate per gli aggiornamenti precedenti.

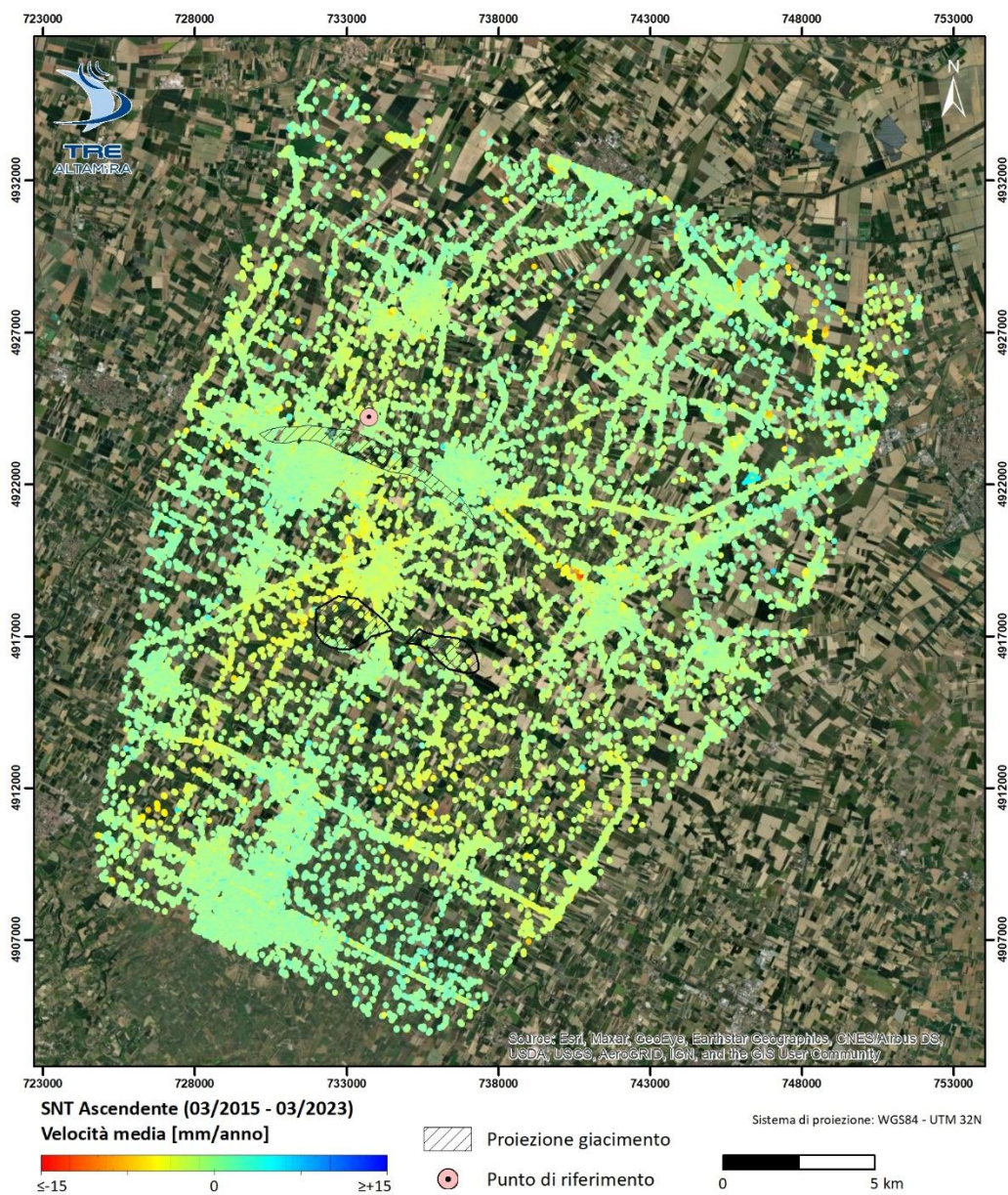


Figura 3: Distribuzione dei valori di velocità media annua di spostamento in geometria ascendente.

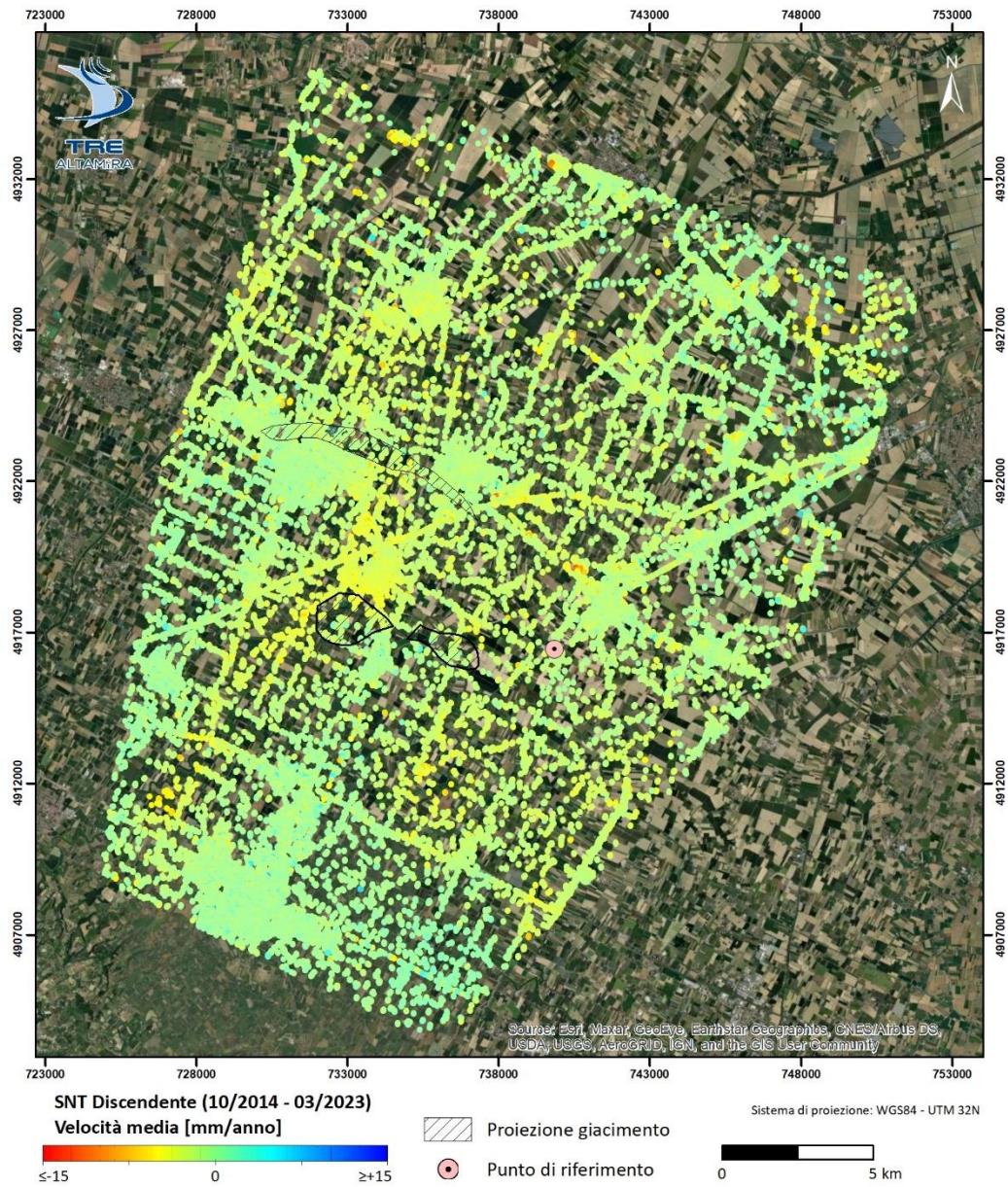


Figura 4: Distribuzione dei valori di velocità media annua di spostamento in geometria discendente.

3.2. Stima delle componenti verticale ed Est-Ovest

I risultati ottenuti dalle due elaborazioni sono stati combinati per il calcolo delle componenti verticale ed orizzontale del moto.

Rimandando ulteriori approfondimenti al manuale tecnico allegato ai dati (TRE ALTAMIRA Handbook), al fine di un uso corretto del dato scomposto si ricorda che:

- Il processo di scomposizione richiede il ri-campionamento dei dati in singola geometria su griglia comune, avente nel caso specifico dimensione pari a 50x50 m, con conseguente perdita di risoluzione spaziale.
- Le misure ottenute dalla scomposizione del moto sono quindi da riferire non a specifici bersagli radar (Measurement Points, MP) a terra ma a ‘pseudo-MP’ posizionati al centro della cella di scomposizione.
- Il processo di scomposizione delle serie temporali di deformazione comporta inevitabili approssimazioni (medie, filtraggi, ri-campionamenti); si invita pertanto a prendere in considerazione innanzitutto le serie storiche dei dati di origine e in un secondo momento le serie storiche dei dati scomposti.
- Moti orizzontali in direzione nord-sud non sono misurabili con questa tecnica, a causa della poca sensibilità della geometria di acquisizione a tale componente di moto.

I risultati della componente verticale di movimento e della componente orizzontale Est-Ovest sono rappresentati rispettivamente in Figura 5 e Figura 6. I valori medi di deviazione standard ottenuti risultano inferiori a 1 mm/anno per entrambe le componenti.

Si ricorda che la sola analisi dei valori di velocità media non permette di evidenziare eventuali fenomeni di deformazione non lineari. Tali fenomeni possono essere individuati analizzando le serie storiche di spostamento fornite per ogni punto di misura individuato.

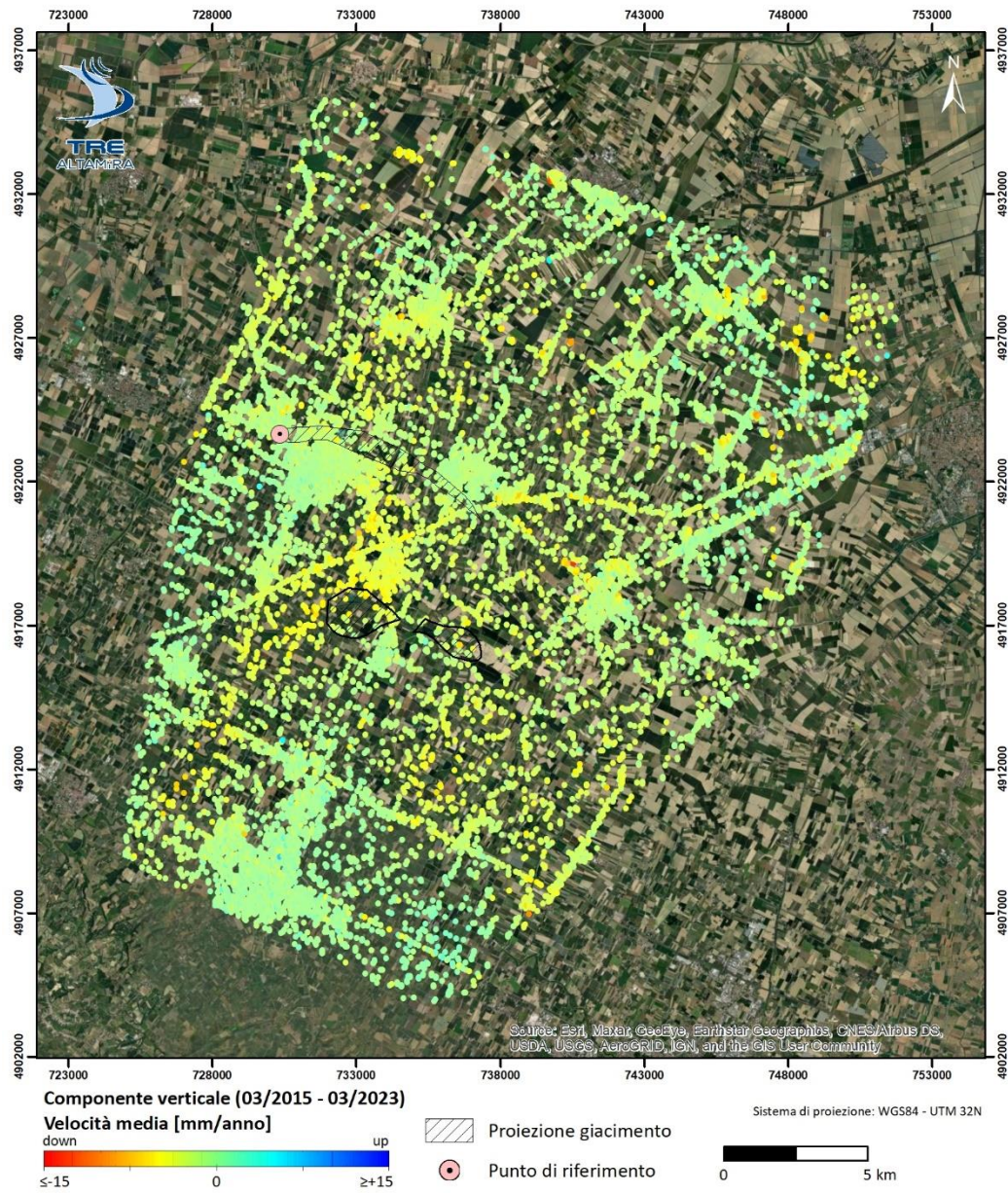


Figura 5: Distribuzione dei valori di velocità media annua di spostamento verticale per i punti di misura individuati dall'analisi.

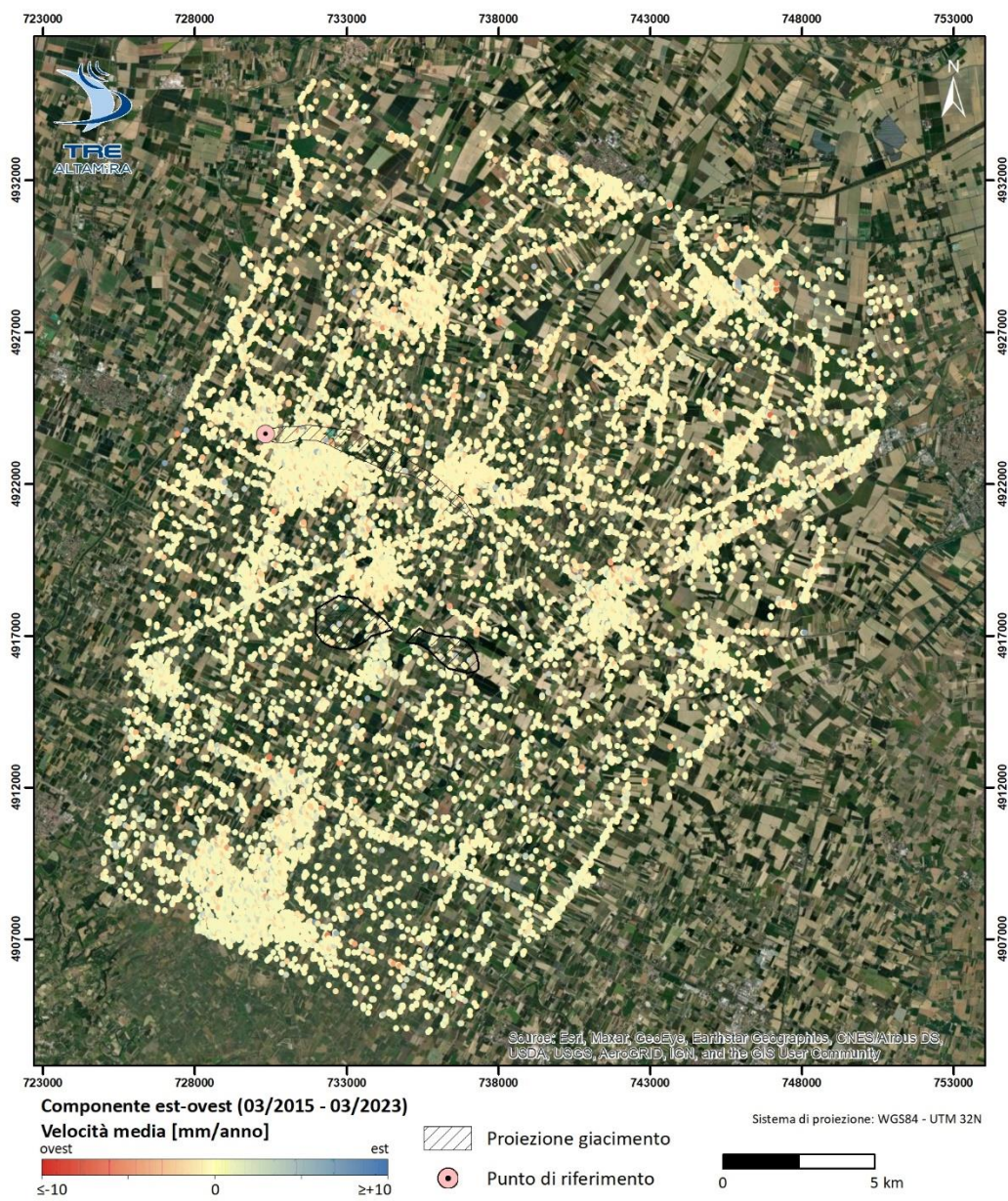


Figura 6: Distribuzione dei valori di velocità media annua di spostamento orizzontale Est-Ovest per i punti di misura individuati dall'analisi.

3.3. Stima della stagionalità

Al fine di evidenziare più facilmente la presenza di deformazioni cicliche, per ogni punto di misura individuato nelle analisi delle singole geometrie, così come per i dati scomposti, è fornito anche il valore medio di semi-ampiezza della stagionalità¹. Tale valore viene calcolato sulla serie storica di deformazione ipotizzando un contributo stagionale del moto del tipo:

$$A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot T + \varphi\right)$$

Dove A è la semi-ampiezza, T è il tempo espresso in giorni e φ è la fase della stagionalità riferita alla prima data di acquisizione. Si noti che il modello utilizzato per stimare questo parametro assume che l'ampiezza sia costante e corrispondente al valore medio nell'intero periodo monitorato. Fornisce quindi solo una indicazione dell'ampiezza media della stagionalità. Solo dall'analisi delle singole serie storiche di deformazione è possibile dedurre informazioni dettagliate sull'andamento delle deformazioni. La Figura 7 mostra un esempio di serie storica di spostamento di un punto affetto da deformazioni stagionali: il valore medio dell'ampiezza A (*seasonal amplitude*) è indicato in rosso, ma si nota chiaramente che il punto di misura mostra una ampiezza della stagionalità variabile di anno in anno.

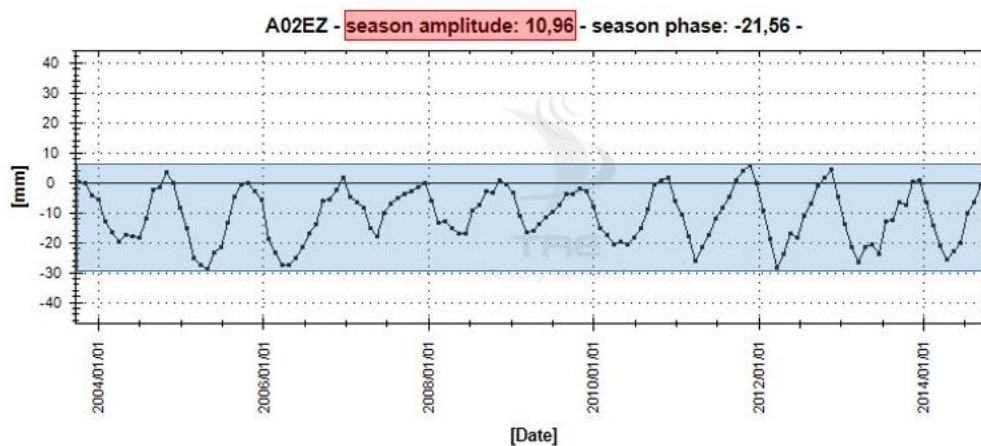


Figura 7: Esempio di serie storica di spostamento per un punto affetto da deformazioni stagionali. Il valore di ampiezza media della stagionalità per l'intero periodo monitorato è indicato in rosso. Il grafico evidenzia comunque una forte variabilità dell'ampiezza dei cicli stagionali durante il periodo monitorato.

¹ Per semplicità in seguito ci riferiremo al valore medio di semi-ampiezza della stagionalità con il solo termine "ampiezza"

L'andamento della stagionalità per la componente verticale del dato analizzato nel presente studio è mostrato in Figura 8.

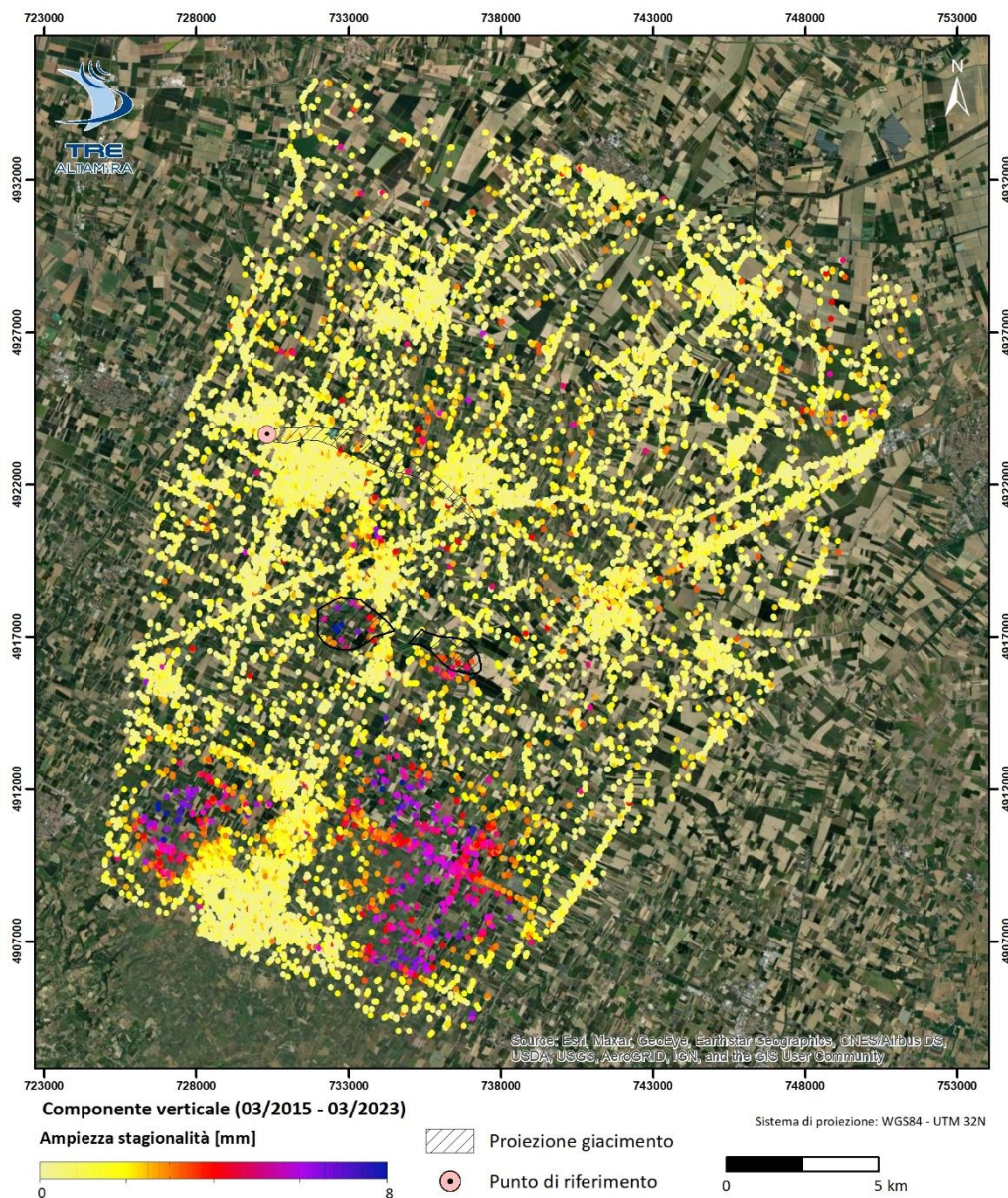


Figura 8: Distribuzione dei valori di ampiezza di picco della stagionalità per la componente verticale.

3.4. Analisi dei risultati

L'area d'interesse s'inserisce in un settore della Pianura Padana notoriamente interessato da fenomeni di subsidenza naturale ed indotta e si osservano infatti movimenti differenziali che interessano sia l'area di stoccaggio che le aree limitrofe.

Il dato SNT conferma la presenza di fenomeni a spiccata stagionalità riscontrati sia nell'area settentrionale a NO di Bagnacavallo, che nelle aree sud-orientale, tra Faenza e Birandola, e sud-occidentale di San Pietro in Laguna (Figura 8). Tali fenomeni sono presumibilmente indotti da emungimenti di acqua dal sottosuolo, presentando un massimo sollevamento nelle stagioni piovose ed un minimo spostamento nelle stagioni più secche.

L'analisi delle serie storiche di spostamento sulle aree del giacimento di Cotignola conferma la presenza di deformazioni a carattere ciclico che sono in accordo con le curve di carico scarico fornite dal Committente (3.4.4). Qui gli spostamenti massimi si osservano nei periodi di carico mentre gli abbassamenti massimi si misurano nei periodi invernali di scarico.

3.4.1. Pool A – San Potito

I dati SNT confermano la presenza di movimenti superficiali differenziali nell'area del giacimento di San Potito, seppure con tassi di spostamento contenuti entro pochi mm/anno. I risultati della componente verticale sull'area del Pool A, visualizzati rispettivamente per velocità media annua e ampiezza media della stagionalità sono mostrati in Figura 9 e Figura 13.

All'interno del Pool A sono presenti aree stabili o caratterizzate da blandi trend negativi lineari, con velocità annue basse <2 mm/anno, come mostrato in Area 1, Area 2 e Area 3 di Figura 9 e Figura 10.

La porzione a NE del Pool A è caratterizzata invece dalla presenza di MP che mostrano un andamento stagionale per la componente verticale (Figura 13). Tale fenomeno, non interessa i punti posti all'interno del Pool A. La ciclicità individuata è probabilmente connessa alle variazioni stagionali della falda acquifera in quanto non è correlata ad altre aree del giacimento (Figura 13 e Figura 14).

Un maggior dettaglio che include un confronto con i dati di carico e scarico forniti dal Committente è mostrato al paragrafo 3.4.4.

La velocità media di spostamento riscontrata nella componente orizzontale ha una tendenza pressoché stabile (Figura 11 e Figura 12).

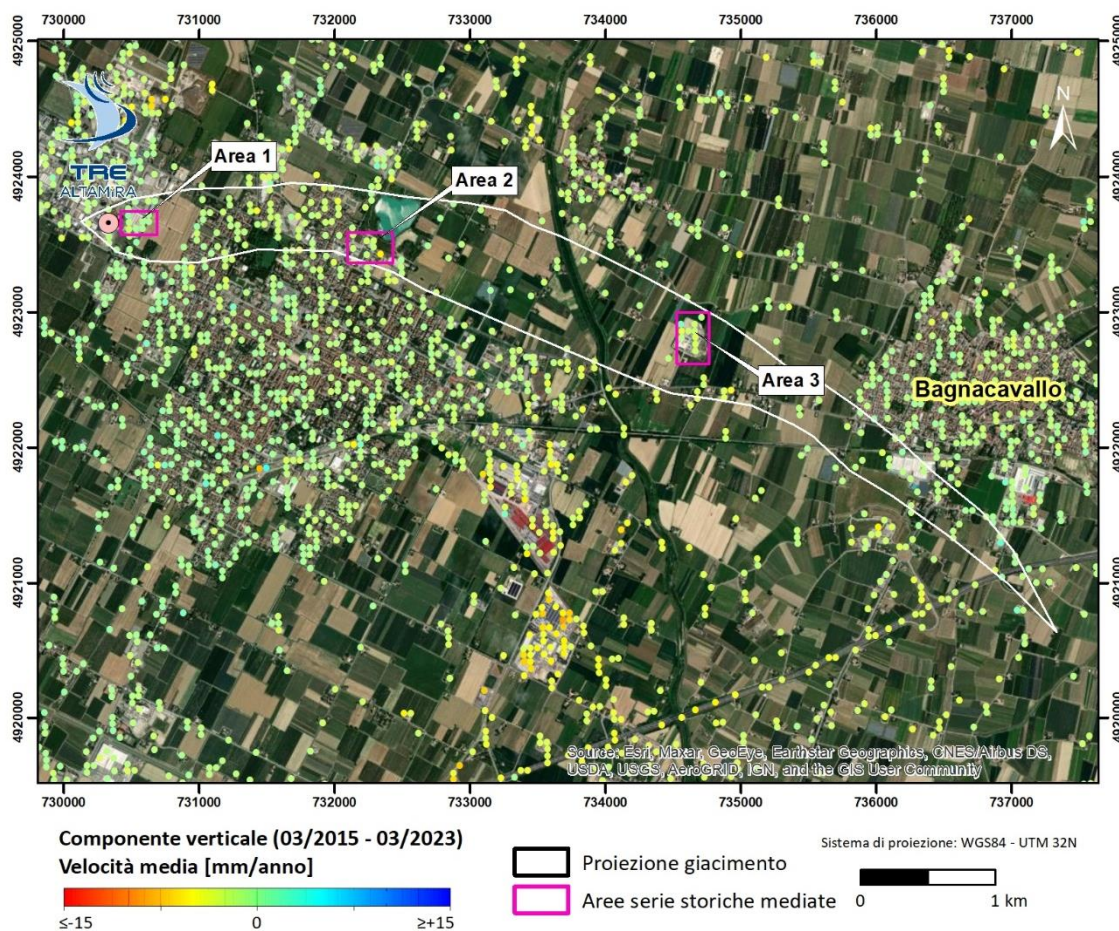


Figura 9: Dettaglio della velocità media verticale nell'area del giacimento di San Potito. Le serie storiche dei punti evidenziati sono mostrate in Figura 10.

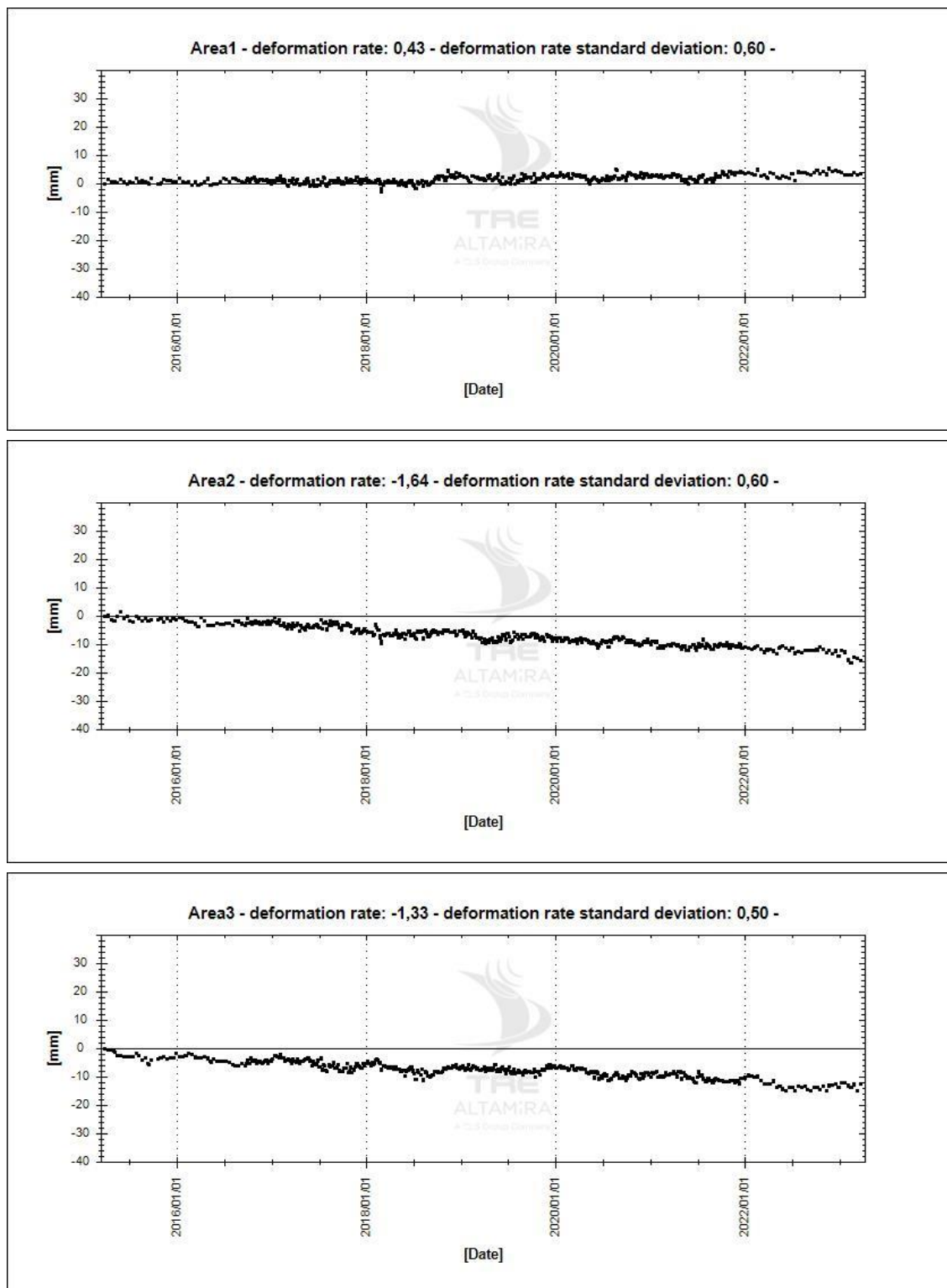


Figura 10: Serie storica di spostamento verticale dei punti di misura indicati in Figura 9.

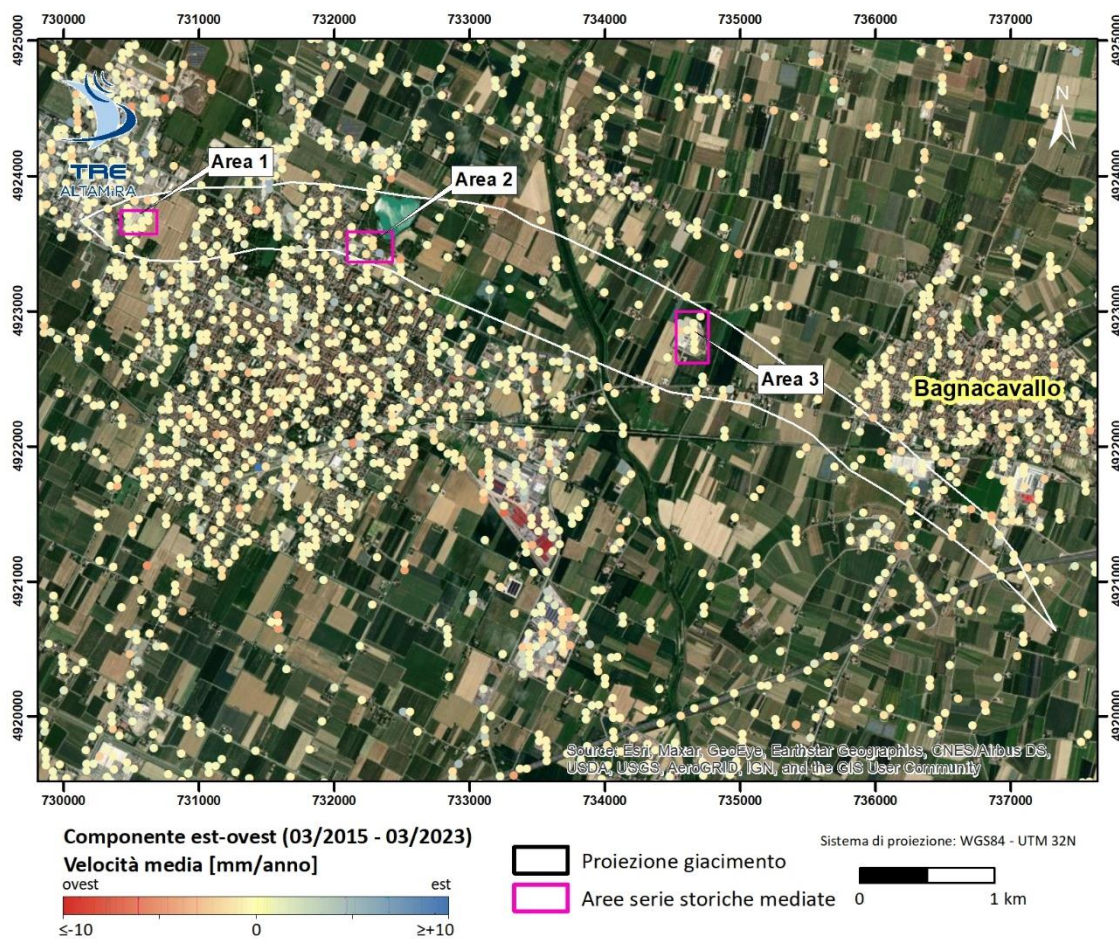


Figura 11: Dettaglio della velocità media est-ovest nell'area del giacimento di San Potito. Le serie storiche dei punti evidenziati sono mostrate in Figura 12

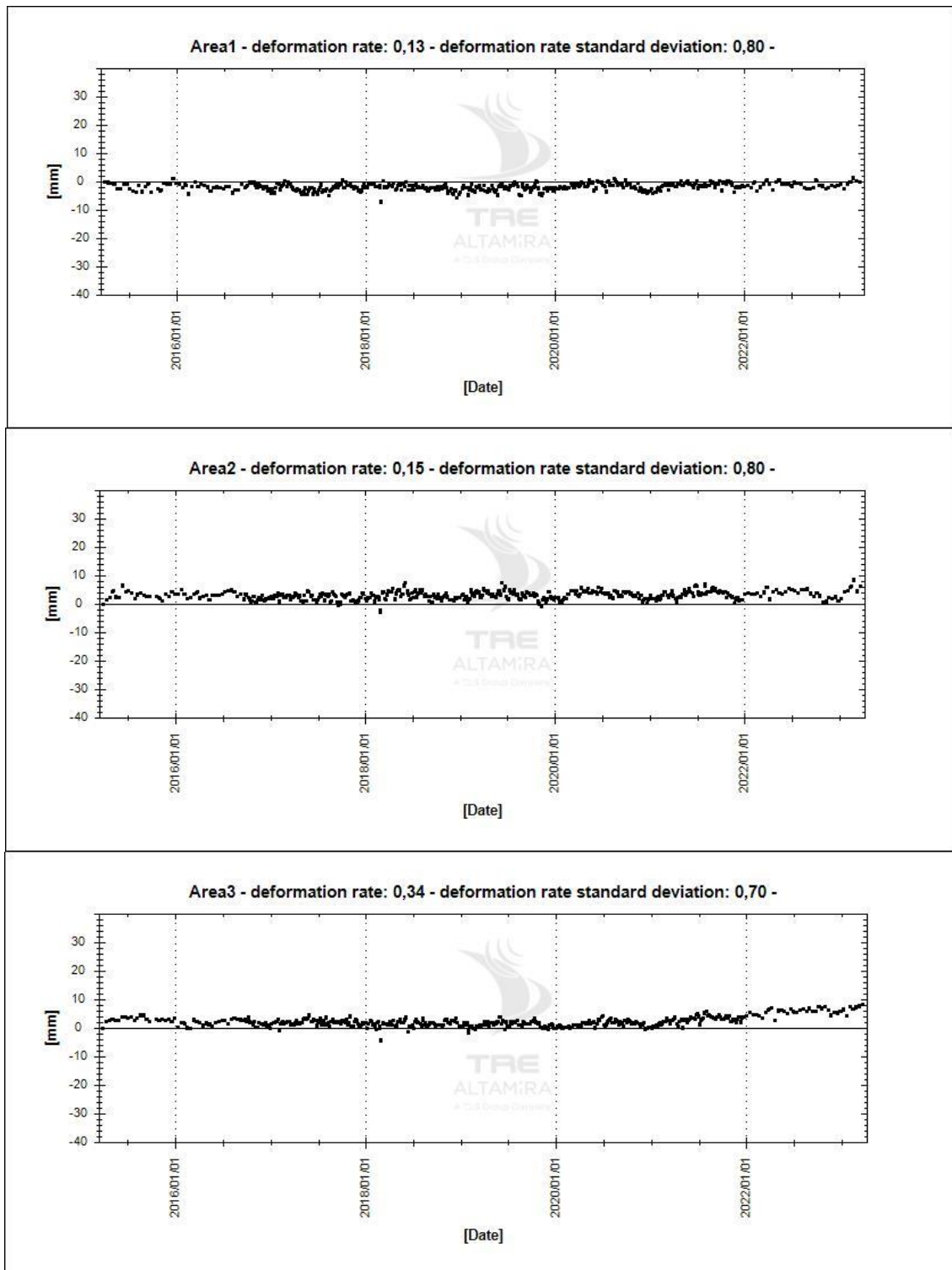


Figura 12: Serie storica di spostamento orizzontale dei punti di misura indicati in Figura 11

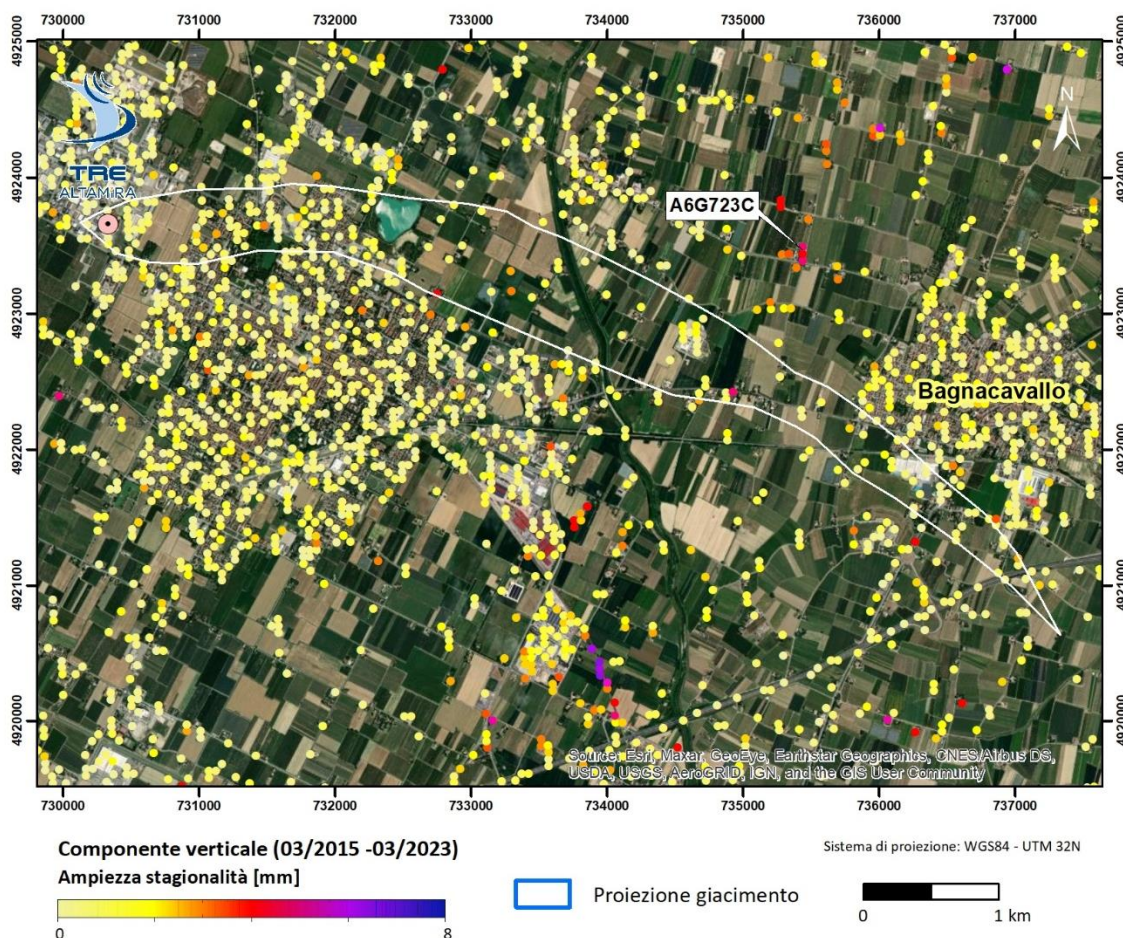


Figura 13: Dettaglio della stagionalità media per la componente verticale nell'area del giacimento di San Potito. La serie storica del punto evidenziato è mostrata in Figura 14

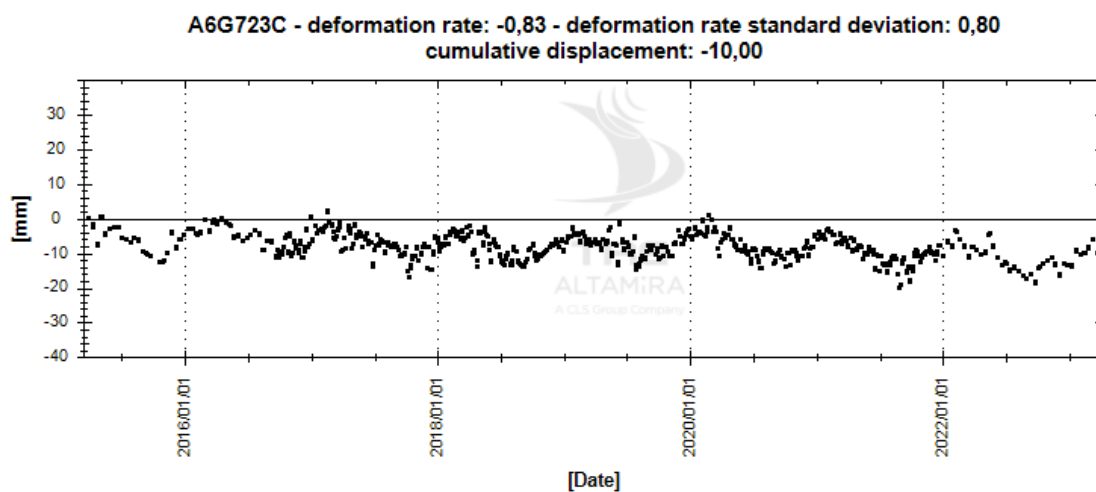


Figura 14: Serie storica di spostamento verticale del punto di misura indicato in Figura 13

3.4.2. Pool B - Cotignola

La Figura 15 e la Figura 16 mostrano nel dettaglio i risultati della componente verticale sull'area del Pool B, visualizzati rispettivamente per velocità media annua e ampiezza media della stagionalità. L'analisi delle serie storiche mediate (Figura 17) conferma gli andamenti ciclici già osservati nei precedenti dati di monitoraggio, con una ampiezza massima della stagionalità che per la componente verticale non supera i 10 mm.

Un confronto con i dati di carico e scarico forniti dal Committente è mostrato al paragrafo 3.4.4.

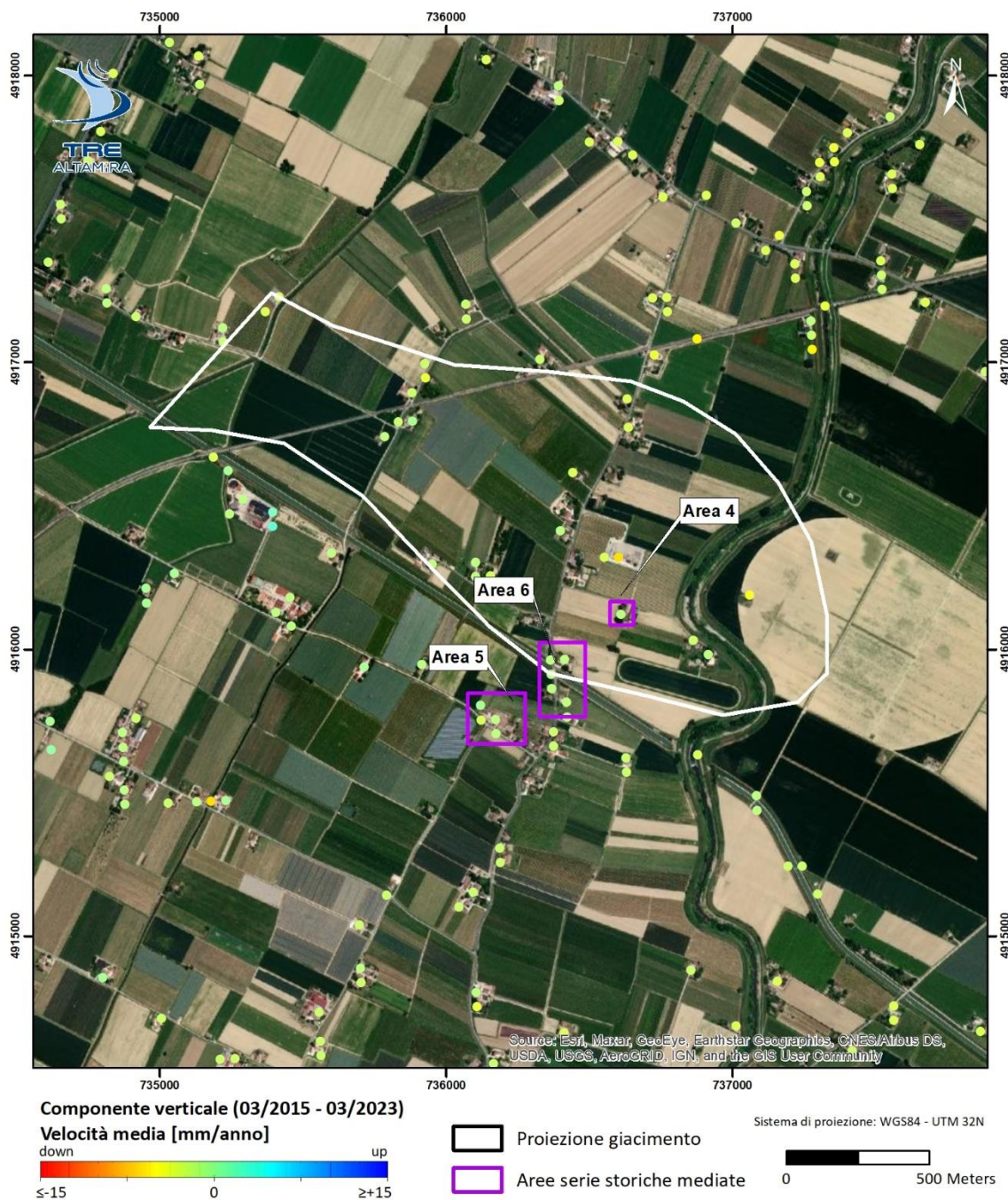


Figura 15: Dettaglio della componente verticale nell'area del Pool B. Le serie storiche dei punti all'interno delle aree viola sono stati mediate per ottenere le serie storiche medie mostrate in Figura 17



Figura 16: Dettaglio della stagionalità media per la componente verticale nell'area del Cluster B di Cotignola

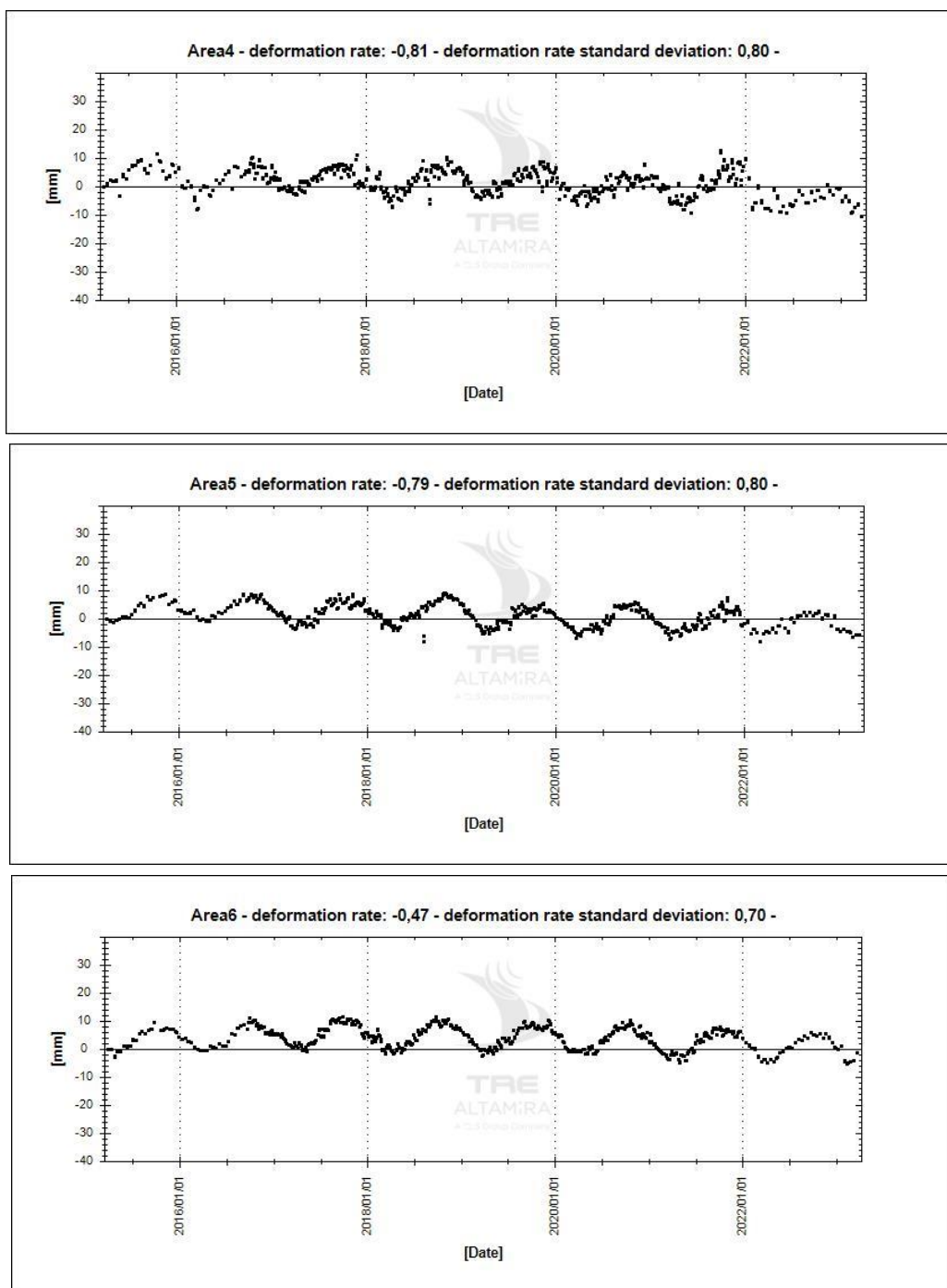


Figura 17: Serie storiche medie (componente verticale) dei punti di misura indicati in Figura 15 e Figura 16

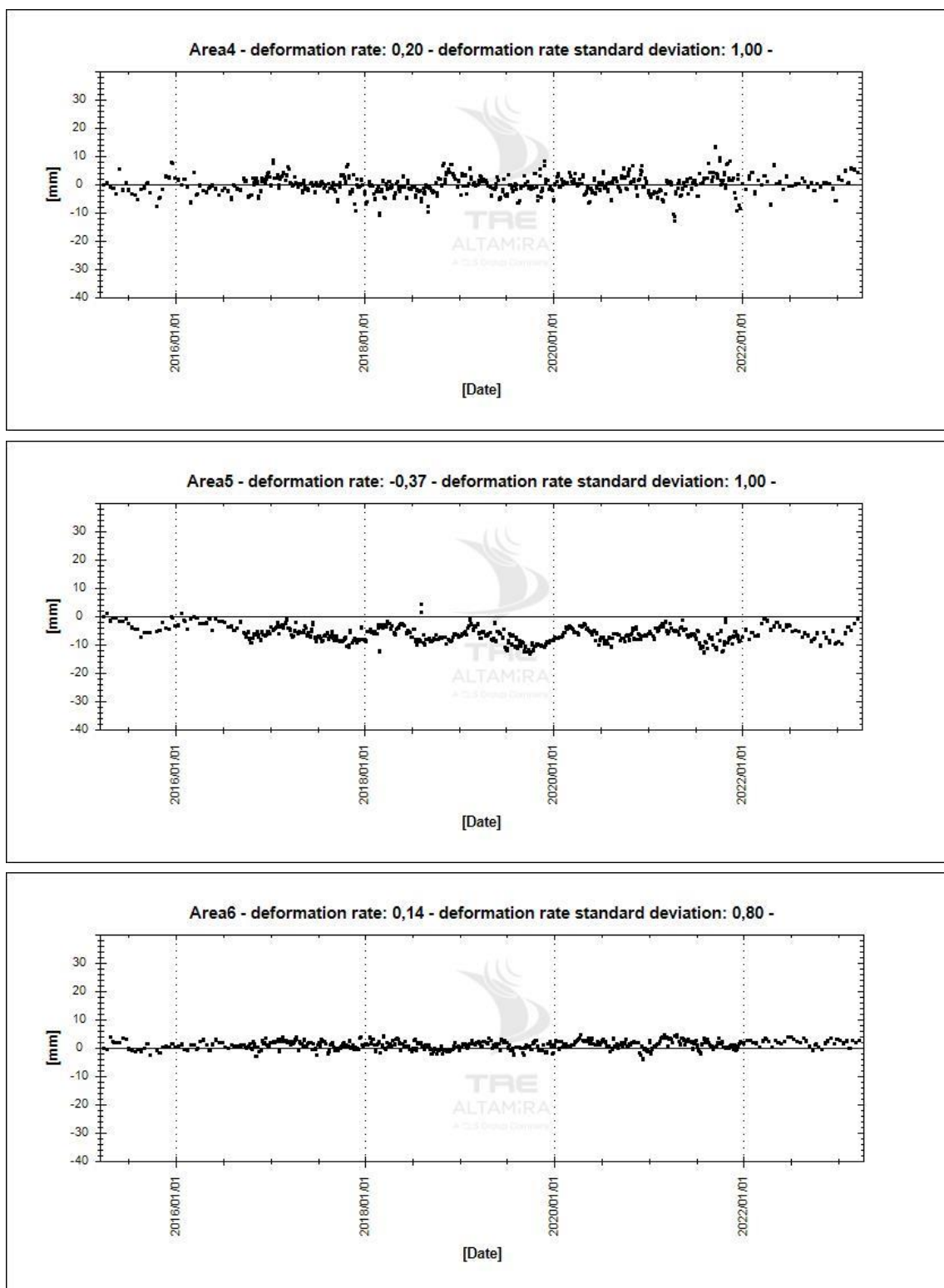


Figura 19: Serie storiche medie (componente orizzontale) dei punti di misura indicati in Figura 18

3.4.3. Pool C - Cotignola

La Figura 20 e la Figura 21 mostrano nel dettaglio i risultati della componente verticale sull'area del Pool C, visualizzati rispettivamente per velocità media annua e ampiezza media della stagionalità. L'analisi delle serie storiche mediate mostra che l'ampiezza massima della stagionalità per la componente verticale ed orizzontale risulta essere compresa entro i 15 mm (Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25). Contestualmente si osserva un trend negativo nella componente verticale, con velocità inferiori ai 2 mm/anno.

Un confronto con i dati di carico e scarico forniti dal Committente è mostrato al paragrafo 3.4.4.

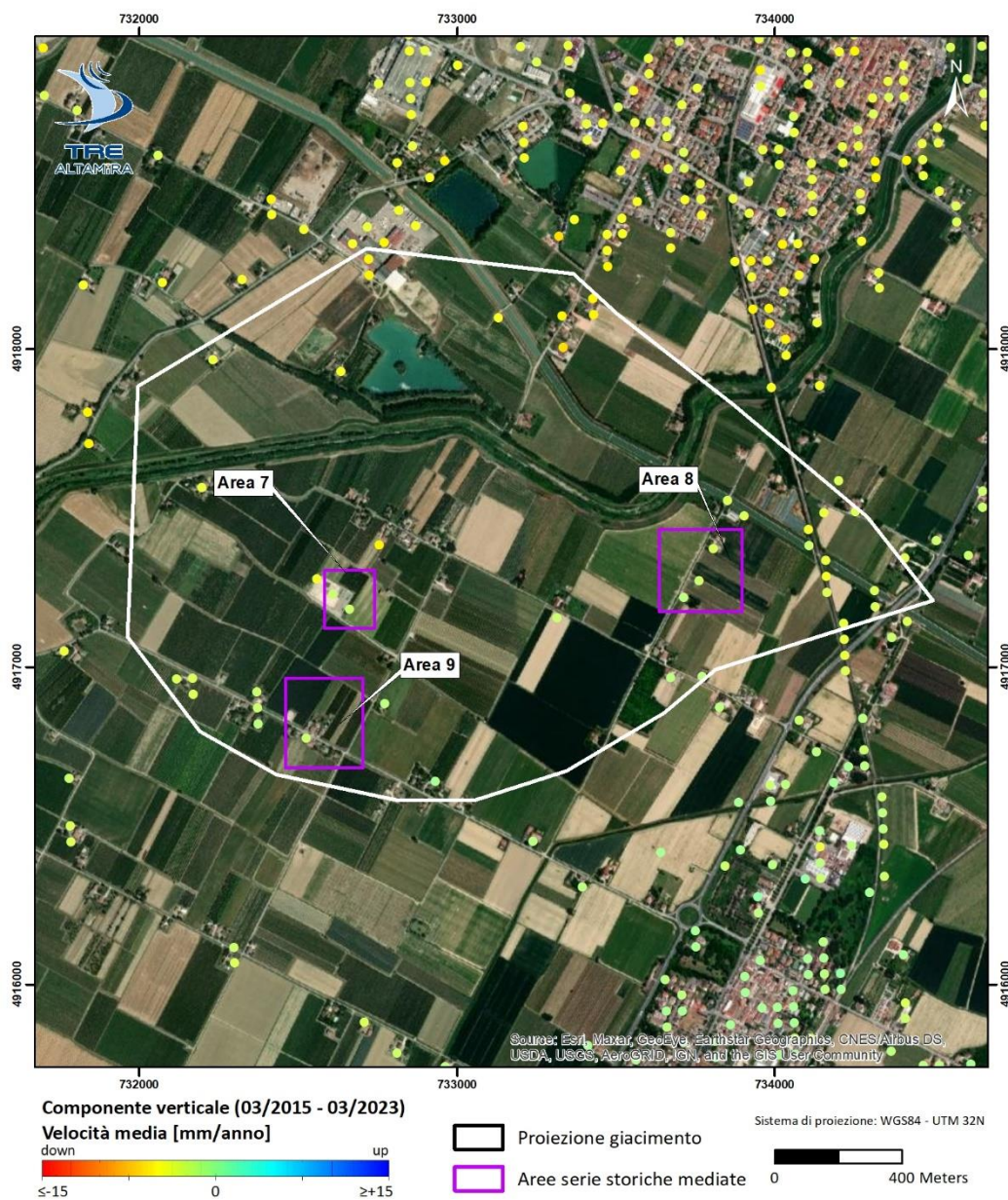


Figura 20: Dettaglio della componente verticale (velocità media) sull'area del Pool C. Le serie storiche dei punti all'interno delle aree viola sono stati mediati per ottenere le serie storiche mediate mostrate in Figura 22

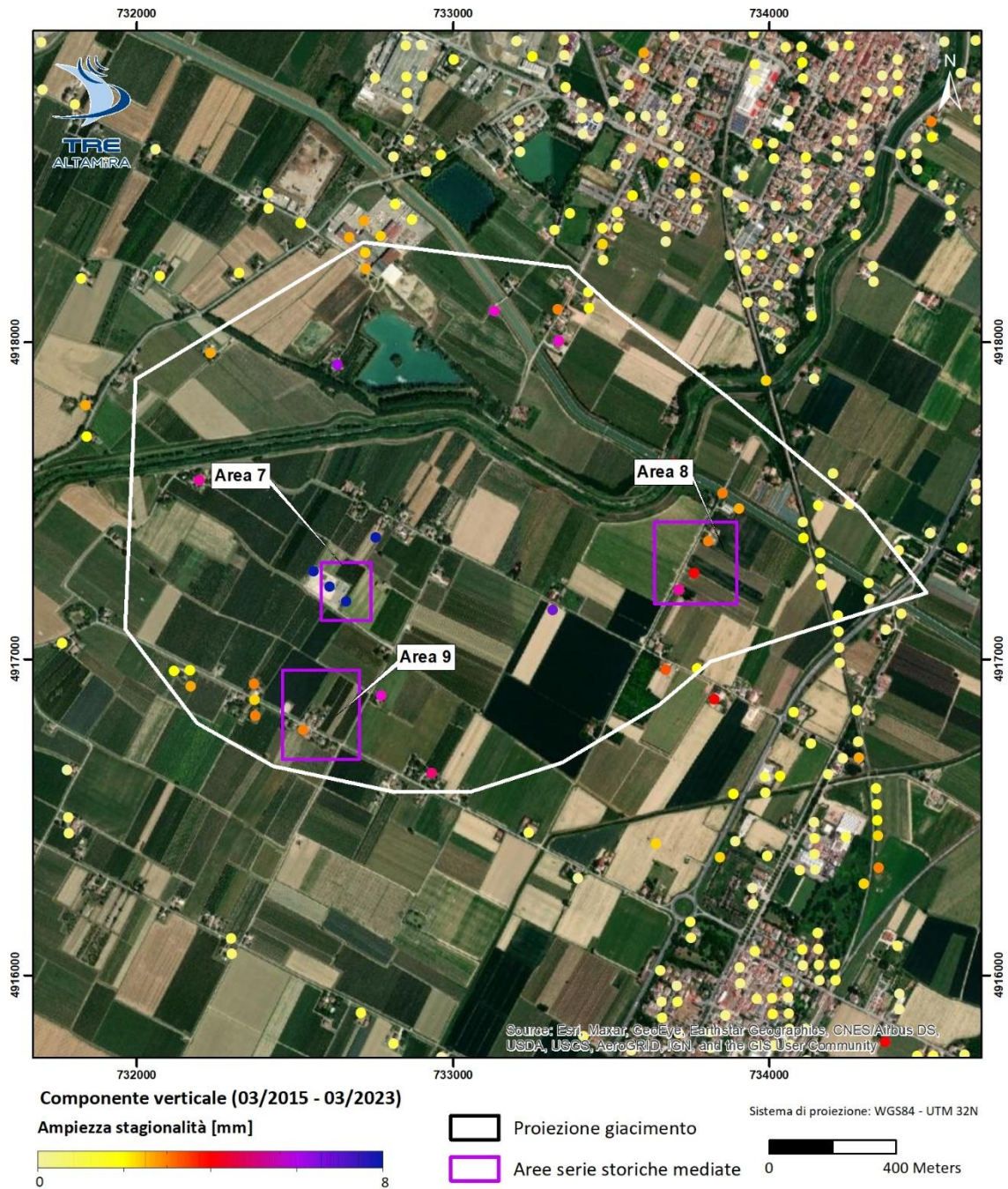


Figura 21: Dettaglio della ampiezza media della stagionalità per la componente verticale sull'area del Pool C. Le serie storiche dei punti all'interno delle aree viola sono stati mediati per ottenere le serie storiche medie mostrate in Figura 22

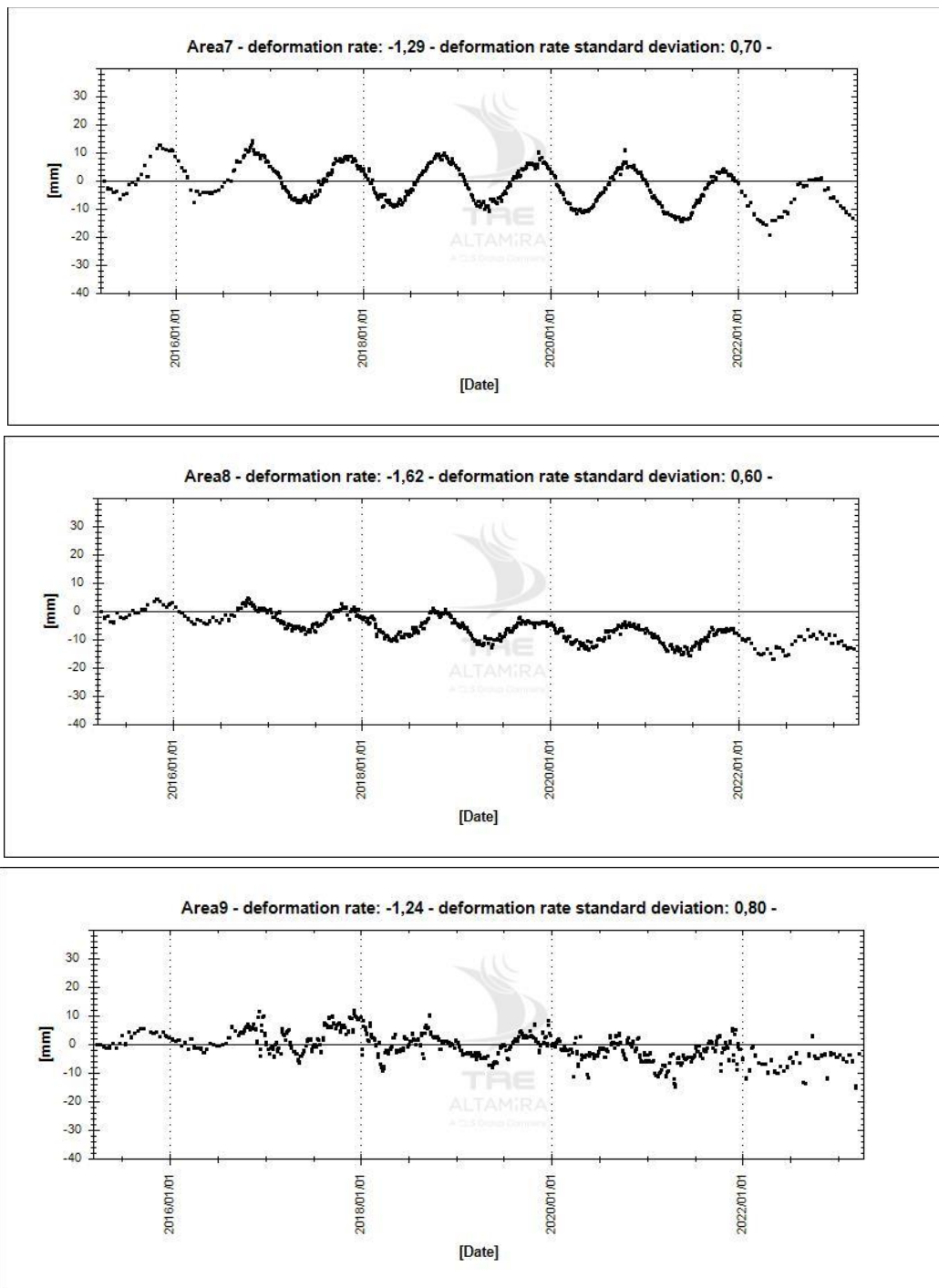


Figura 22: Serie storiche medie (componente verticale) dei punti di misura indicati nei riquadri viola in Figura 20 e Figura 21.

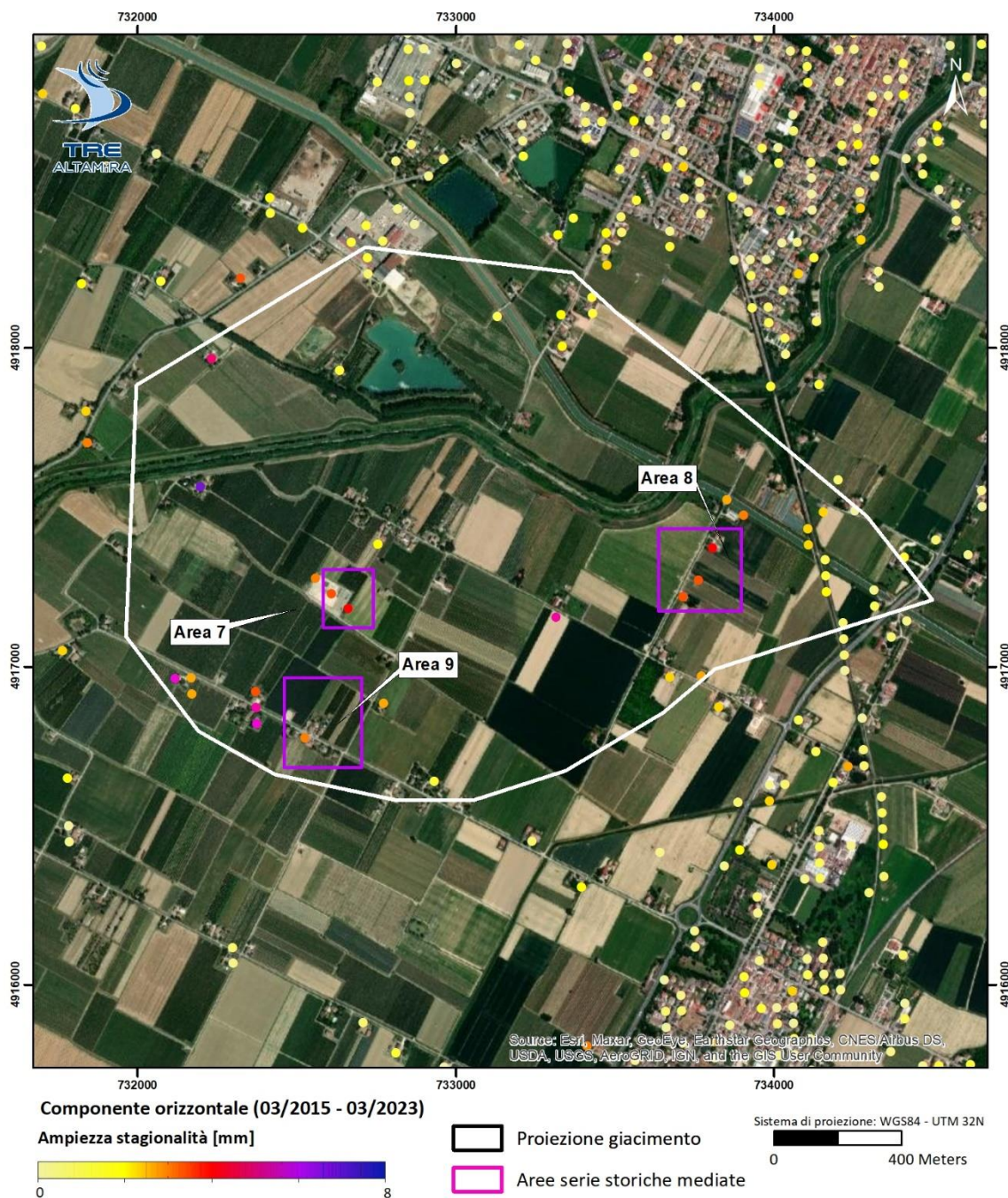


Figura 24: Dettaglio dei risultati della componente orizzontale sull'area del Pool C, visualizzati per ampiezza media della stagionalità. La serie storica media dei punti compresi nell'area 7 è mostrata in Figura 25.

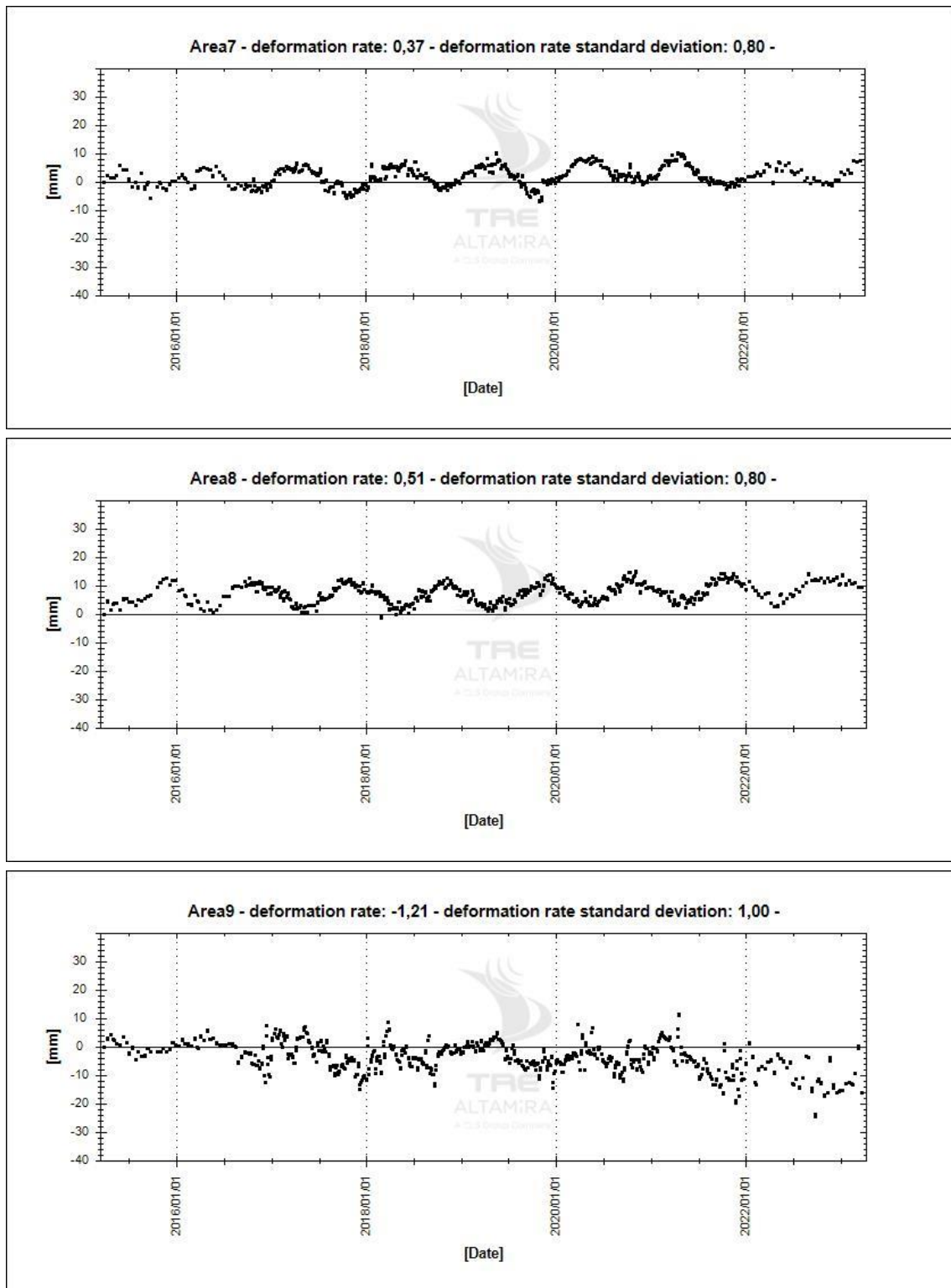


Figura 25: Serie storica media (componente orizzontale) dei punti di misura evidenziati in Figura 23 e Figura 24.

3.4.4. Confronto movimenti superficiali e curva di carico-scarico

In questo paragrafo vengono confrontati i volumi di gas movimentati nei giacimenti di San Potito e Cotignola con le deformazioni superficiali misurate.

La Figura 26 mostra le curve di Carico-Scarico sulle aree di S. Potito (Pool A) e Cotignola (Pool B e C), forniti dal Committente. Il grafico evidenzia che in questo ciclo di carico i volumi iniettati nel in linea con gli anni precedenti.

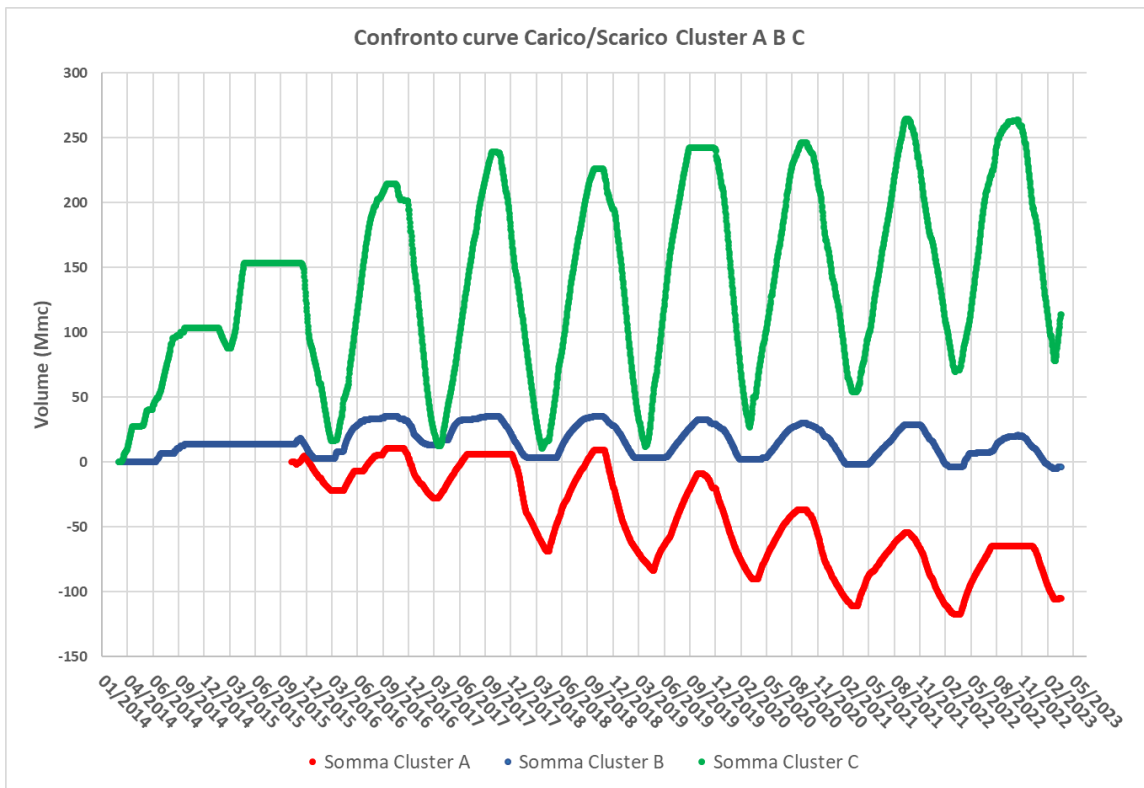
Nell'area di San Potito (Pool A) è stata confrontata la media delle serie storiche ricadenti in Area 3 sia per la componente verticale che orizzontale, con i volumi movimentati. Il grafico mostra chiaramente come le curve di carico e scarico non siano in fase con le deformazioni osservate in superficie. La blanda ciclicità della componente verticale media non è in fase con la curva di carico e scarico (Figura 9 e Figura 27) e anche la componente orizzontale media confrontata con i volumi movimentati (Figura 11 e Figura 28) mostra un trend deformativo non correlato con la curva di carico scarico.

La blanda ciclicità riscontrata si ritiene possa essere correlata alle variazioni stagionali della falda acquifera, al pari dell'area posta a Nord della Centrale di Trattamento e Stoccaggio, segnalata in Figura 13 o a qualche moto di tipo regionale.

I dati di spostamento superficiale ottenuti sull'area del giacimento di Cotignola mostrano invece un comportamento differente.

I movimenti ciclici superficiali verticali riscontrati nel Pool B e C mostrano un'evidente correlazione con i cicli di iniezione ed erogazione effettuati a Cotignola (Figura 29 e Figura 31). Gli spostamenti più consistenti si osservano in corrispondenza del Pool C (Figura 31). La componente orizzontale sebbene di entità minore mostra correlazione con la curva di carico scarico sia nel Pool B che nel Pool C (Figura 30, Figura 32).

L'assenza di movimenti superficiali correlabili alle attività di stoccaggio nel Pool A di San Potito potrebbe essere ricondotta alla maggior profondità di questo giacimento, rispetto alle profondità dei Pool B e C dell'adiacente concessione di Cotignola.



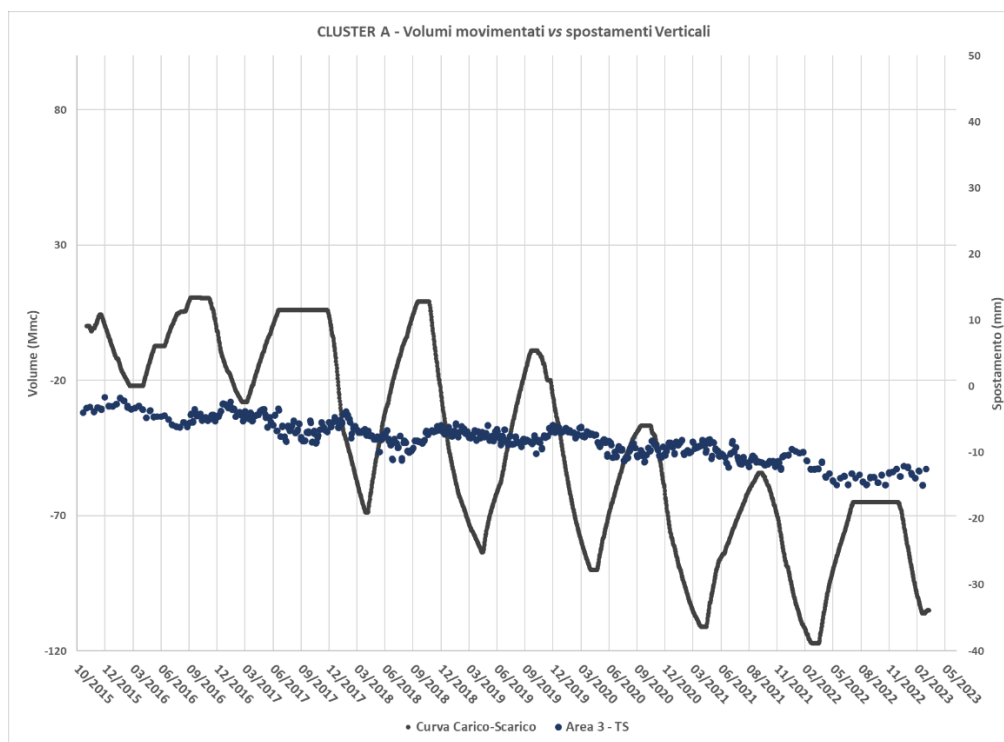


Figura 27: Volumi di gas movimentati per il Pool A e confronto con la serie storica di spostamento media della componente verticale sull'Area 3 in Figura 9

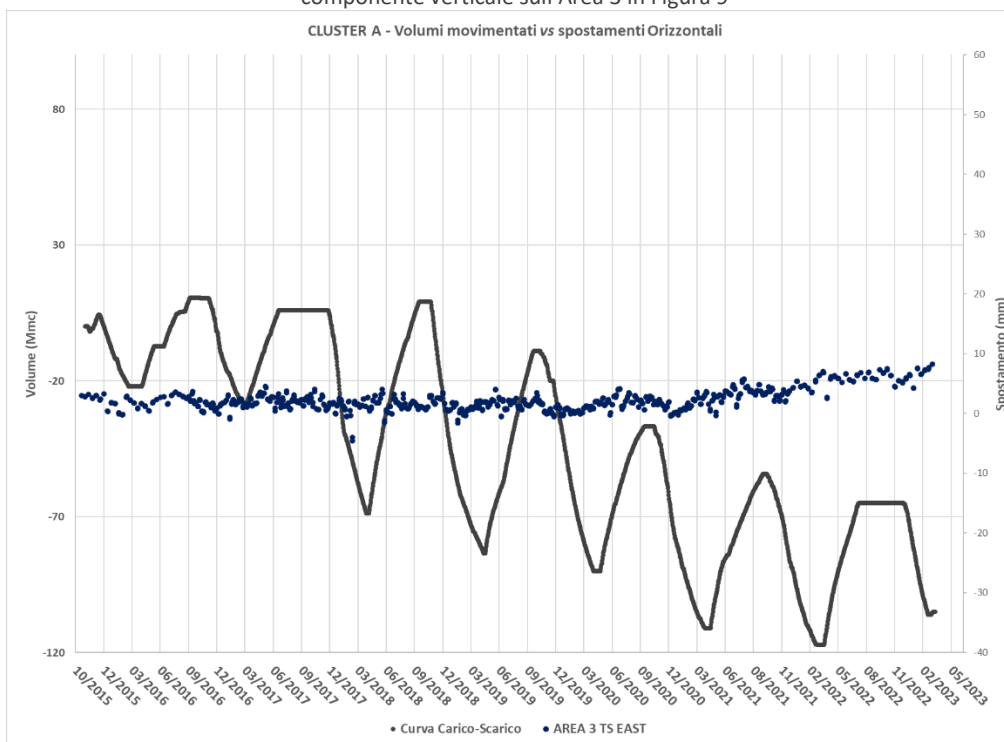


Figura 28: Volumi di gas movimentati per il Pool A e confronto con la serie storica di spostamento media della componente orizzontale sull'Area 3 in Figura 9

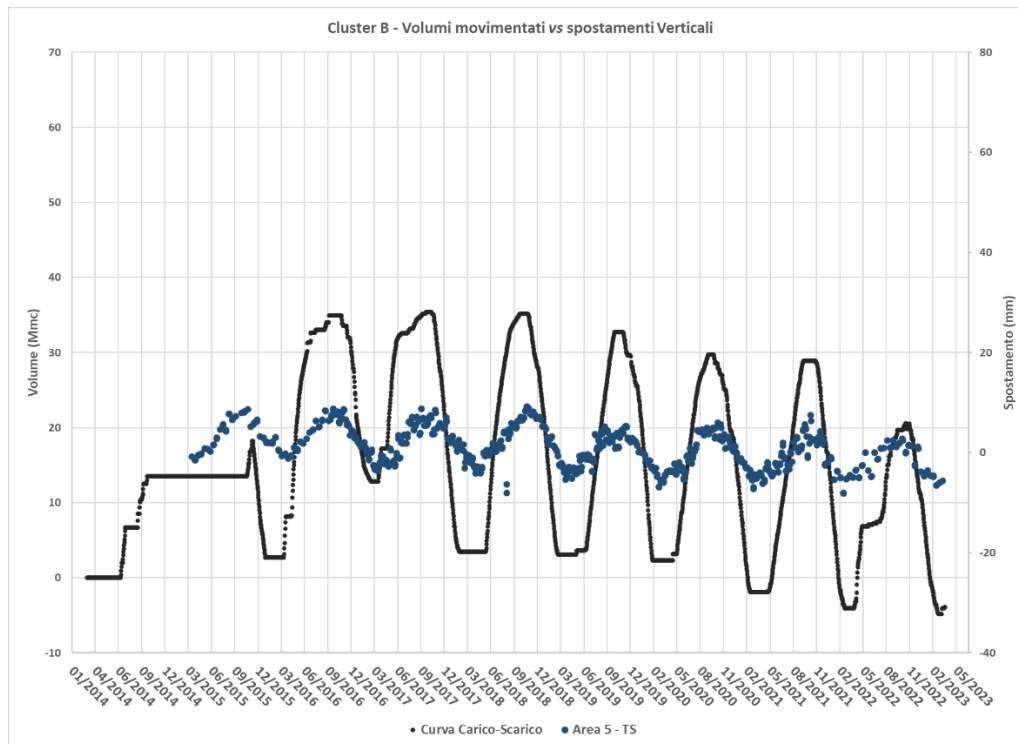


Figura 29: Volumi di gas movimentati per i Cluster B e confronto con la serie storica di spostamento media della componente verticale sull'Area5 per Cluster B di Figura 15

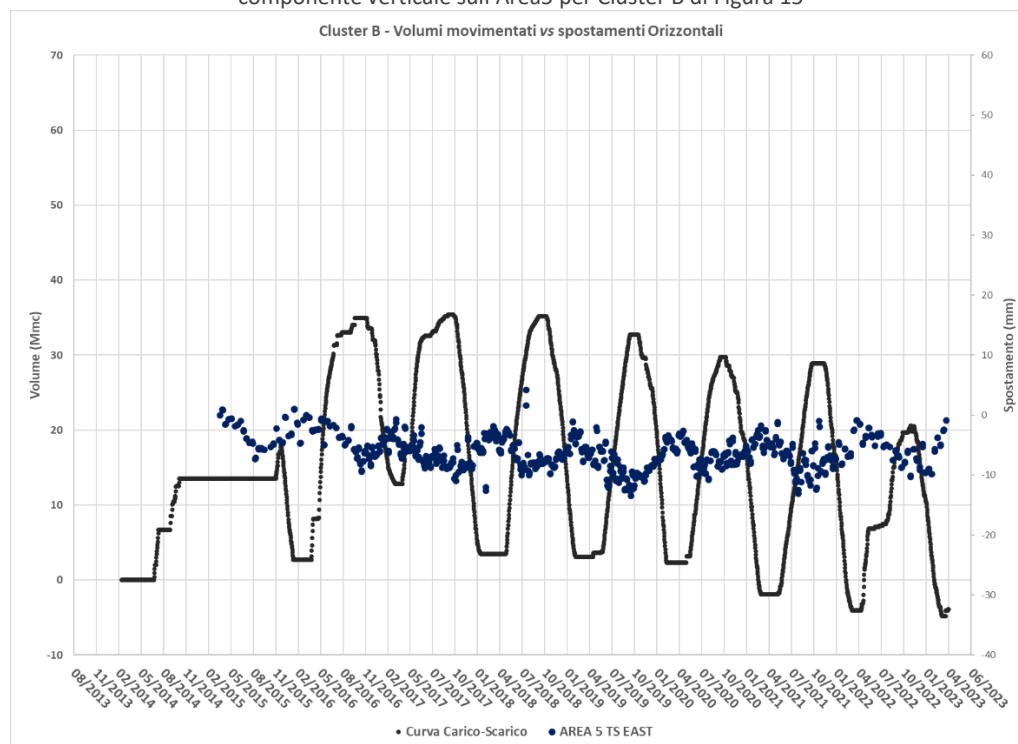


Figura 30: Volumi di gas movimentati per i Cluster B e confronto con la serie storica di spostamento media della componente orizzontale sull'Area5 per Cluster B di Figura 15

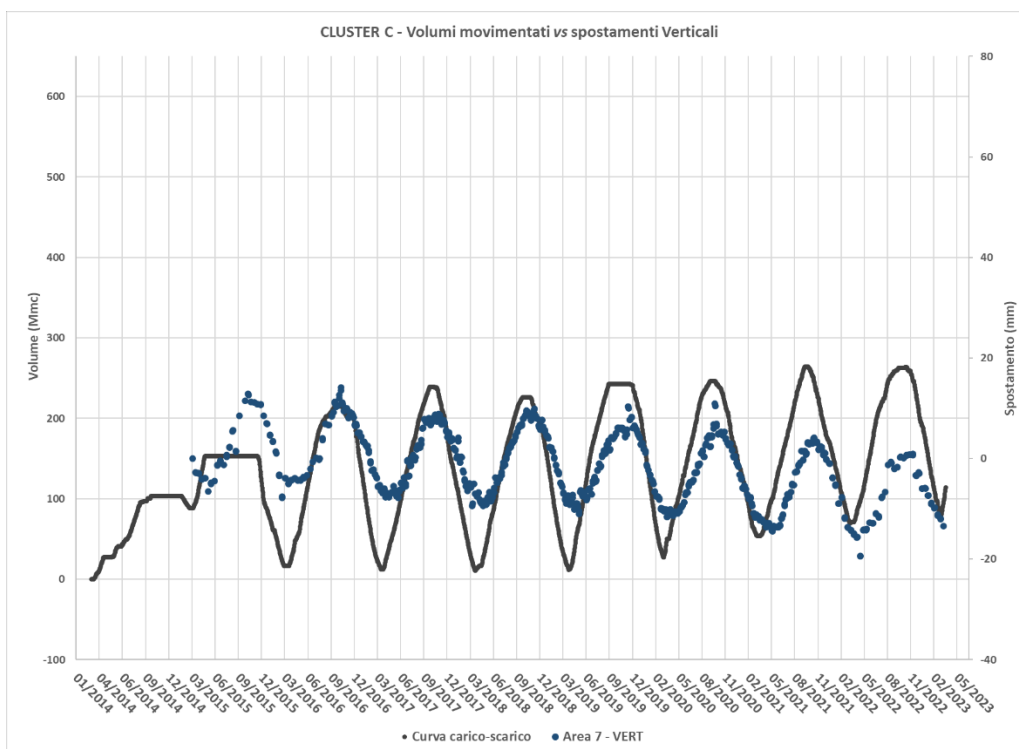


Figura 31: Volumi di gas movimentati per i Cluster C e confronto con la serie storica di spostamento media della componente verticale sull'Area 7 di Figura 20 e Figura 21

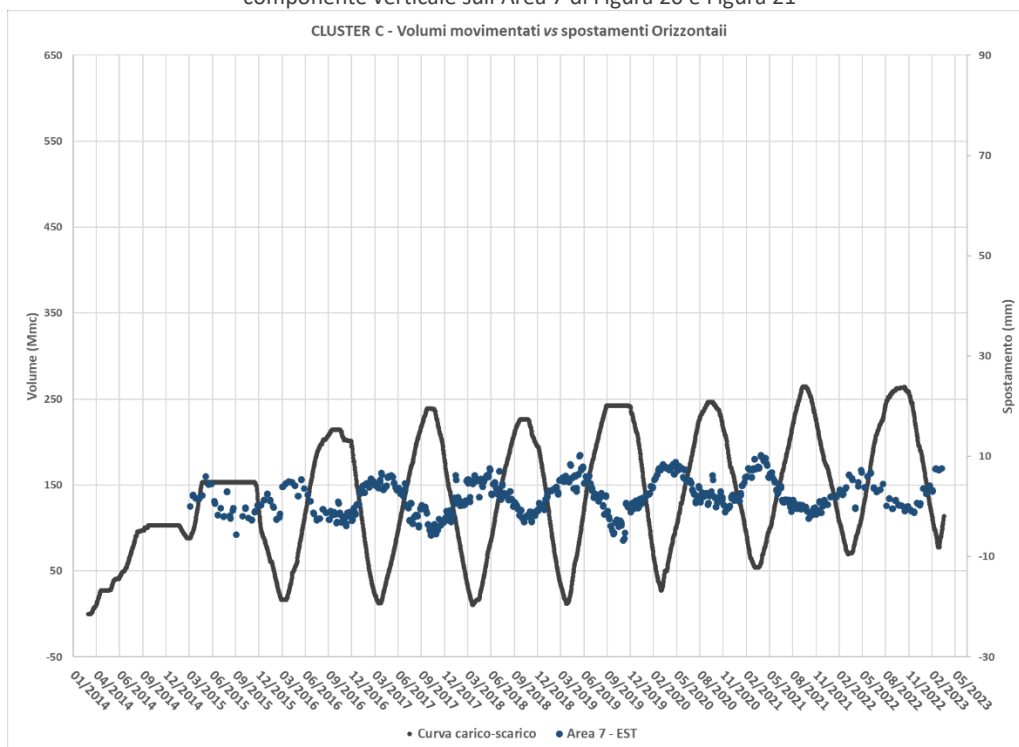


Figura 32: Volumi di gas movimentati per il Cluster C e confronto con la serie storica di spostamento media della componente orizzontale sull'Area 7 (Figura 23 e Figura 24).

3.5. Confronto misure SqueeSAR® e rete GNSS

In continuità con gli aggiornamenti precedenti i dati di spostamento forniti dall'analisi satellitare sono stati confrontati con i dati di spostamento forniti dalla stazione GPS – CLS2 presente nell'area dal gennaio 2014. Inoltre, si prosegue il confronto aggiuntivo richiesto dal Committente con le 11 stazioni della rete geodetica GNSS attive nell'area da dicembre 2018 (Figura 33). In Figura 34 viene riportato un dettaglio sulla localizzazione della stazione SP4 che è posizionata sullo stesso piazzale della stazione CLS2.

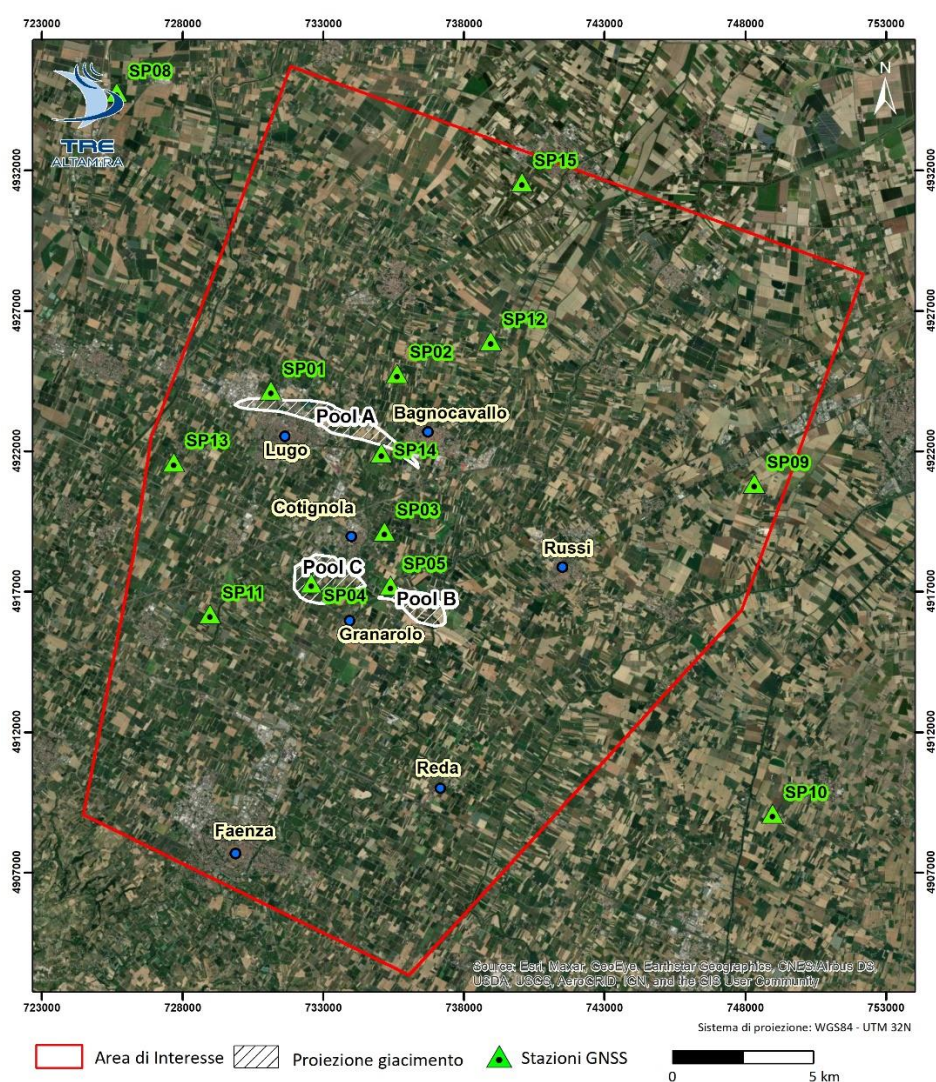


Figura 33: Localizzazione delle stazioni GNSS installate nel 2018.



Figura 34: Posizione della stazione GPS – CLS2 attiva da gennaio 2014 attigua alla stazione GNSS SP4 attiva dal 2018.

Il confronto tra i dati satellitari e le misure GNSS è stato effettuato secondo al seguente procedura:

- Analisi indipendente dei dati satellitari in singola geometria. Per ogni elaborazione è stato selezionato il migliore punto di riferimento dal punto di vista radar, corrispondente cioè a bersaglio radar ad alta coerenza, non affetto da movimenti non lineari e tale da minimizzare la deviazione standard del campo di velocità medie stimato.
- Elaborazione dei dati GNSS forniti nelle tre dimensioni (VERT, NORD ed EST) per il calcolo delle serie storiche di spostamento GNSS lungo le specifiche linee di vista (LOS) ascendente e discendente del satellite SNT.

- Confronto tra le velocità medie lungo LOS calcolate dai dati della stazione GNSS con quelle dei bersagli radar individuati in un intorno di 200 m delle stazioni GNSS al fine di definire il valore medio di subsidenza regionale da rimuovere dai dati SqueeSAR®.

I risultati del confronto sono riportati dalla Figura 35 alla Figura 45. Le stazioni confrontate con il dato SqueeSAR® sono le stesse dell'aggiornamento precedente. Contrariamente al passato i dati delle stazioni GNSS sono stati forniti a TRE-ALTAMIRA senza che sia stata applicata una media mobile a 5 giorni, su scelta del fornitore. Le serie temporali GNSS risultano pertanto più disperse, ma non risentono di effetti causati da medie e filtraggi in fase di elaborazione.

I risultati del confronto con la stazione GPS – CLS2 (Figura 35), mostrano come per i precedenti aggiornamenti un'ottima corrispondenza con il dato satellitare.

Non è stato possibile confrontare le serie temporali del GNSS SP12 in quanto nel suo intorno non sono stati individuati MP SqueeSAR®.

Le serie Temporali della Stazione GNSS SP09, SP13 ed SP14 hanno un andamento differente dalle Serie Storiche SqueeSAR® individuate nelle vicinanze; tuttavia, le differenze in velocità medie tra i dati satellitari e i dati GNSS nel periodo di riferimento considerato risultano comprese nella precisione ottenibile da queste due tecniche e pertanto risultano calibrati tra di loro (cfr. Tabella 3 e Tabella 4).

La verifica indipendente effettuata nel presente studio tra la serie di dati GNSS proiettate lungo LOS e le velocità SqueeSAR® ascendenti e discendenti mediate, ha dimostrato che i dati SqueeSAR® non sono affetti da moti regionali, confermando i risultati degli aggiornamenti precedenti. Pertanto, i REF SqueeSAR® scelti sono adeguati a identificare le sole variazioni di moto locali, che costituiscono l'obiettivo principale del presente studio.

| Stazione GNSS | GNSS A LOS VEL [mm/anno] | # MP A | MP A LOS VEL [mm/anno] | GNSS D LOS VEL [mm/anno] | # MP D | MP D LOS VEL [mm/anno] |
|---------------|--------------------------|--------|------------------------|--------------------------|--------|------------------------|
| SP01 | -5.15 | 5 | 1.33 | -3.24 | 4 | -1.96 |
| SP02 | -3.96 | 13 | 0.01 | -3.10 | 13 | -3.28 |
| SP03 | -2.93 | 4 | -0.09 | -1.94 | 12 | -0.75 |
| SP04 | -4.64 | 10 | -0.05 | -2.75 | 10 | -1.38 |
| SP05 | -5.12 | 4 | -1.65 | -1.61 | 6 | -2.45 |
| SP09 | -3.88 | 10 | 1.32 | -2.15 | 13 | 0.21 |
| SP11 | -6.29 | 9 | -2.04 | -3.63 | 13 | -3.12 |
| SP13 | -3.93 | 15 | 1.37 | -1.34 | 17 | 0.46 |
| SP14 | -3.29 | 1 | -2.14 | -11.83 | 5 | -2.97 |
| SP15 | -2.58 | 3 | 1.18 | -3.12 | 1 | -0.02 |

Tabella 3: Valori di confronto tra le misure GNSS proiettate lungo le LOS Ascendente (A) e discendente (D) e le misure SqueeSAR® in un intorno di 200 metri dalla stazione GNSS. I valori sono riferiti all'intervallo di sovrapposizione inizio dicembre 2018 – fine settembre 2022.

| Stazione GNSS | Differenze in LOS A [mm/anno] | Differenze in LOS D [mm/anno] |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| SP01 | -6.47 | -1.28 |
| SP02 | -3.97 | 0.18 |
| SP03 | -2.85 | -1.19 |
| SP04 | -4.59 | -1.37 |
| SP05 | -3.47 | 0.85 |
| SP09 | -5.20 | -2.35 |
| SP11 | -4.25 | -0.51 |
| SP13 | -5.30 | -1.80 |
| SP14 | -1.15 | -8.86 |
| SP15 | -3.76 | -3.10 |

Tabella 4: Differenze tra le velocità di riferimento GNSS e le velocità medie SqueeSAR® riportate per ogni geometria nella Tabella 3.

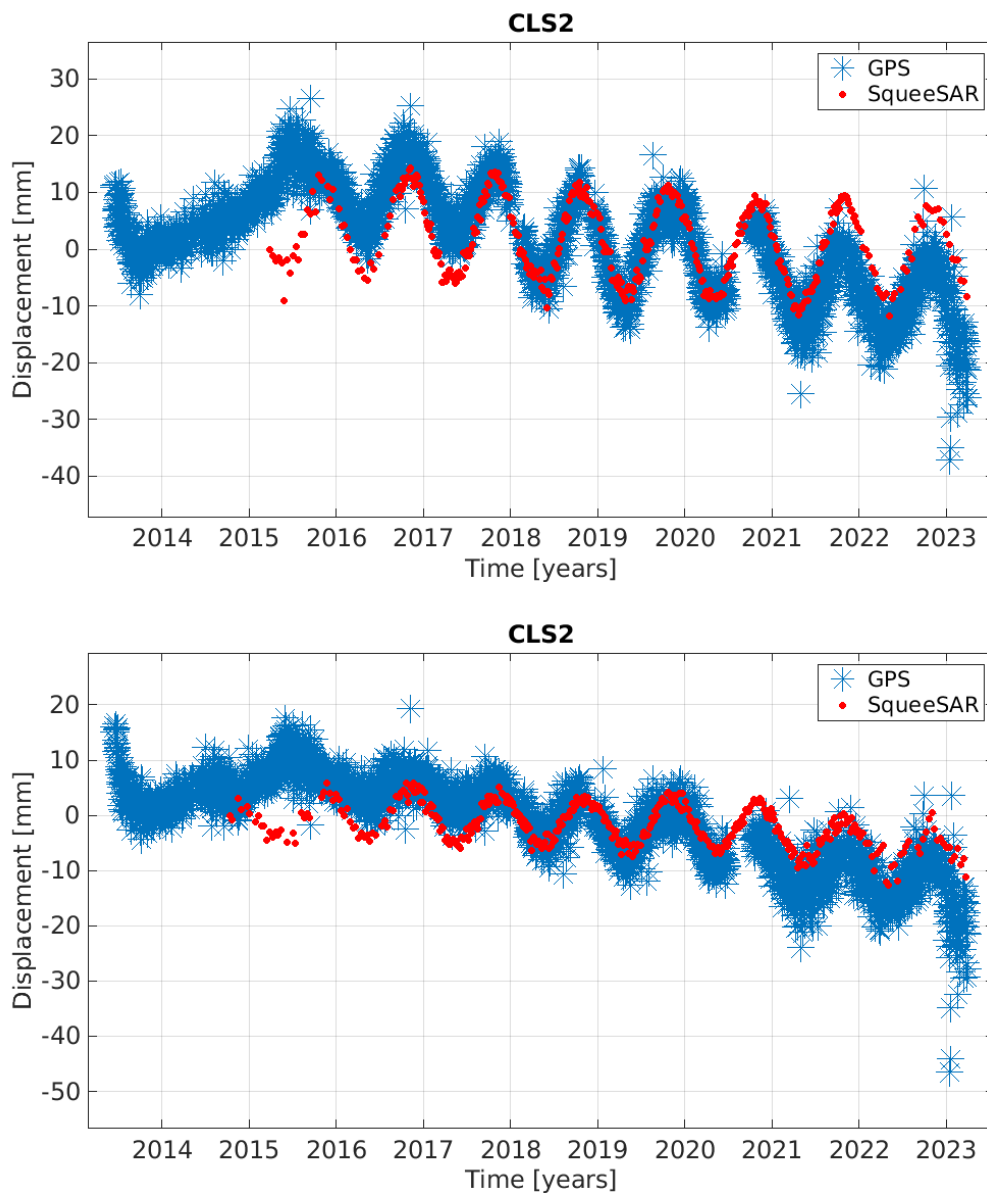


Figura 35: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e la stazione GPS – CLS2 (blu).

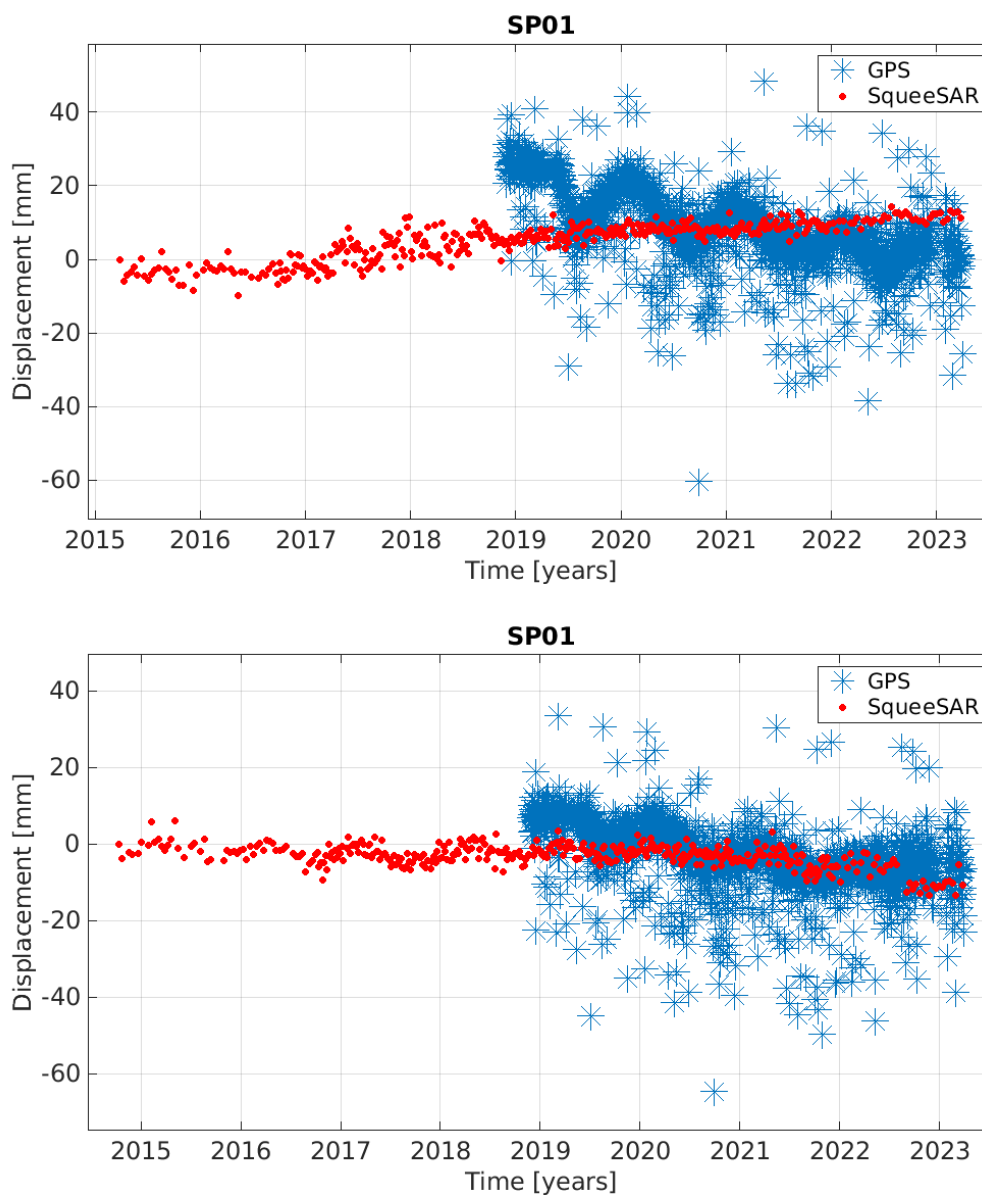


Figura 36: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP01 (blu).

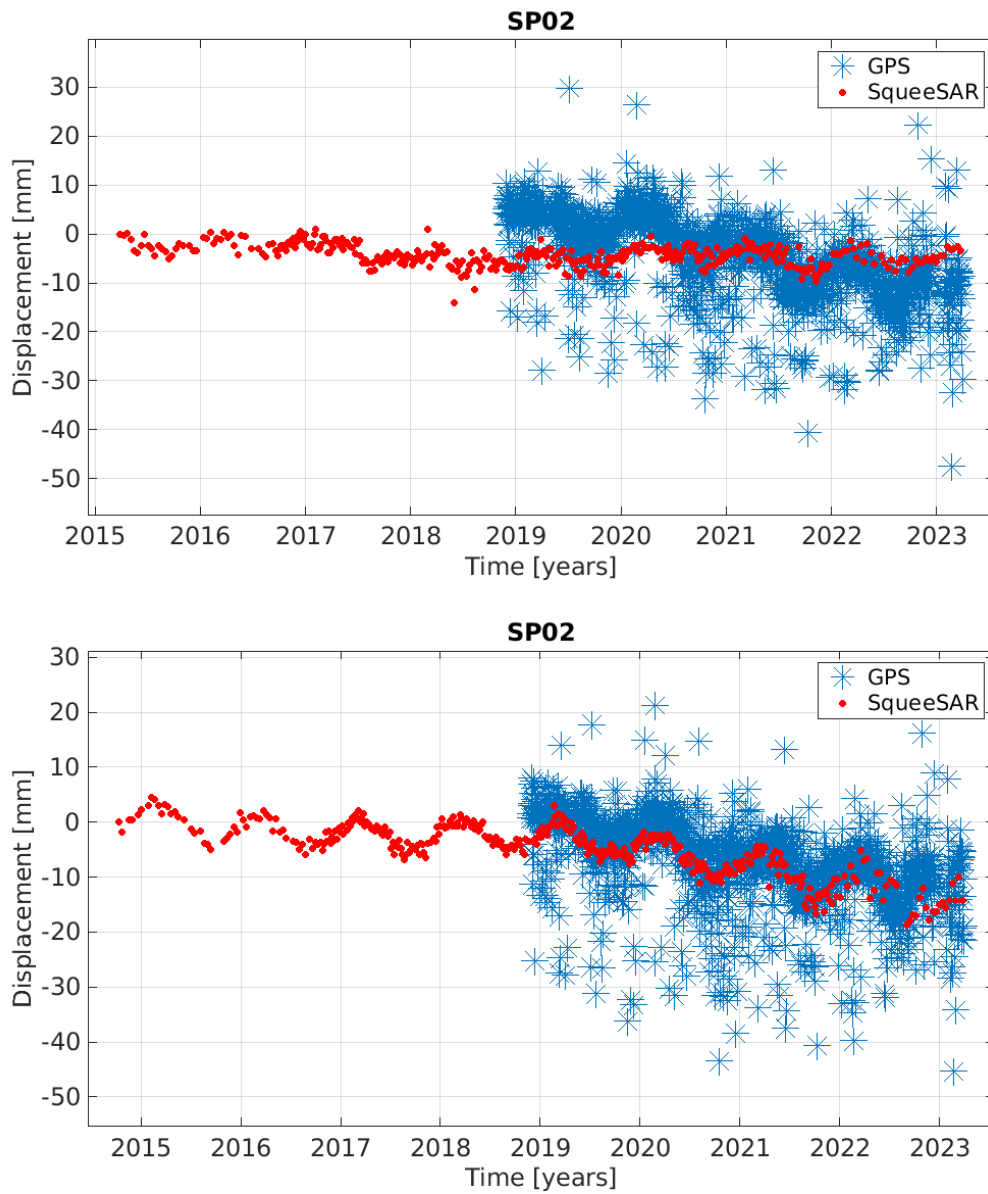


Figura 37: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP02 (blu).

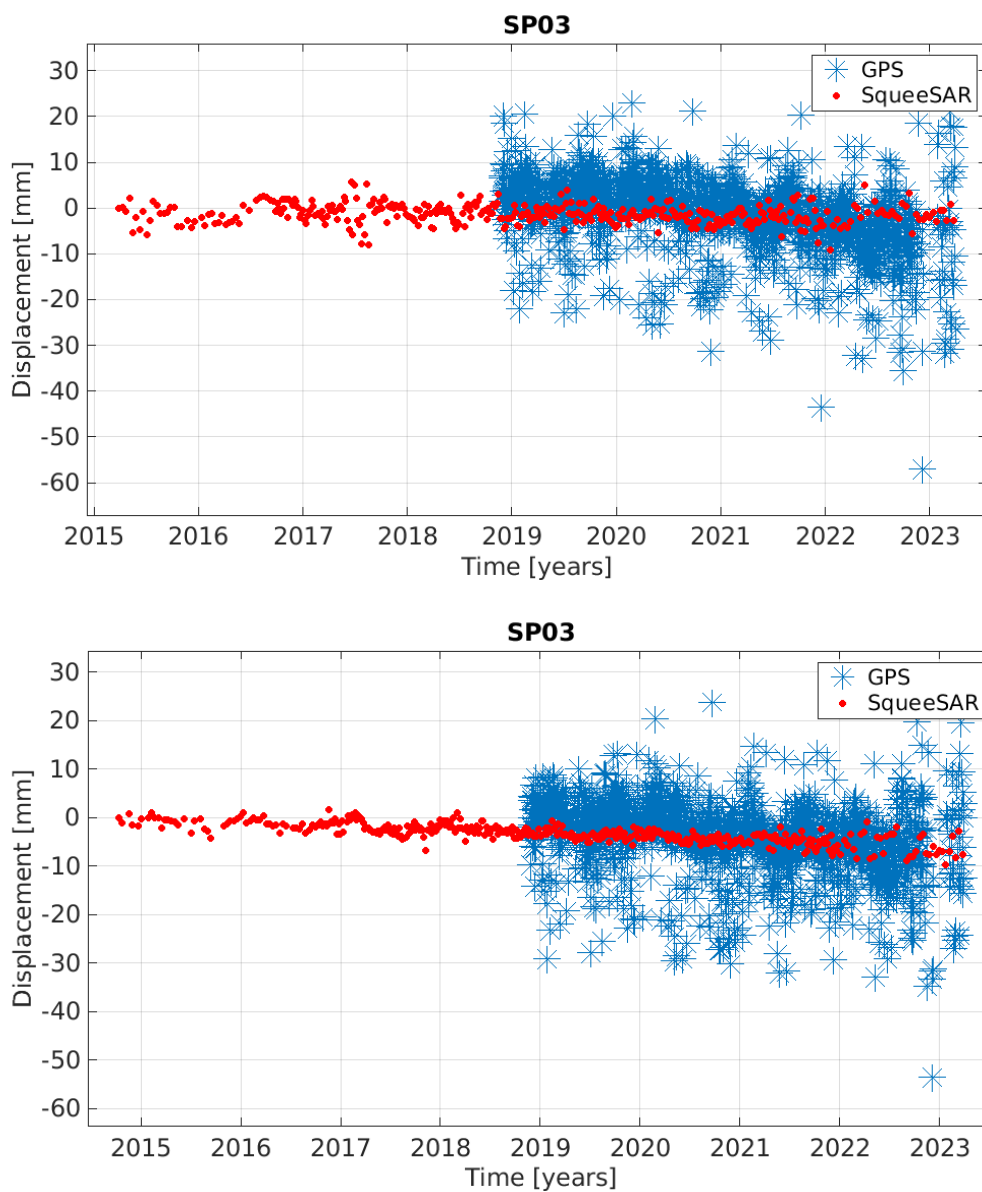


Figura 38: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP03 (blu).

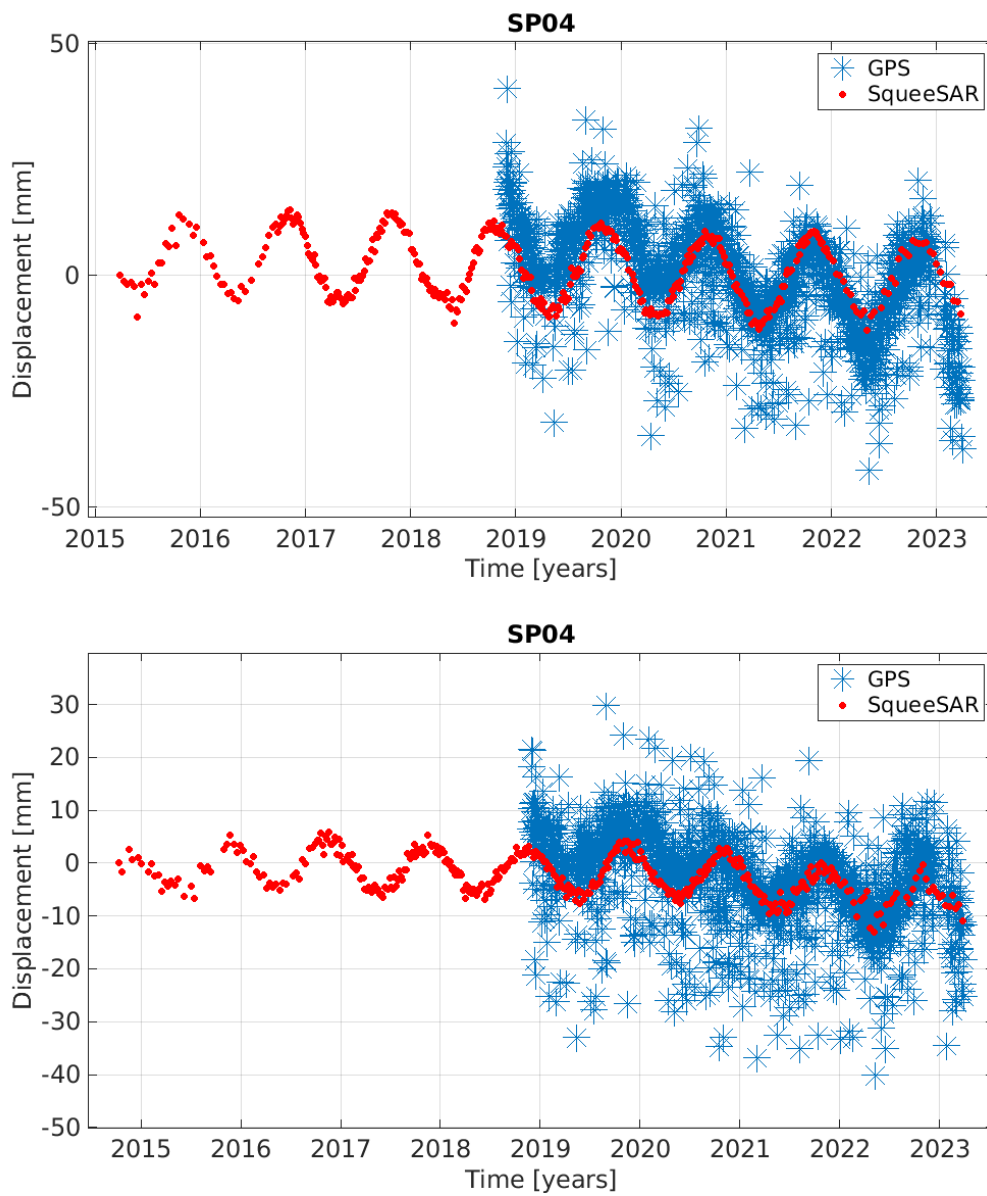


Figura 39: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP04 (blu).

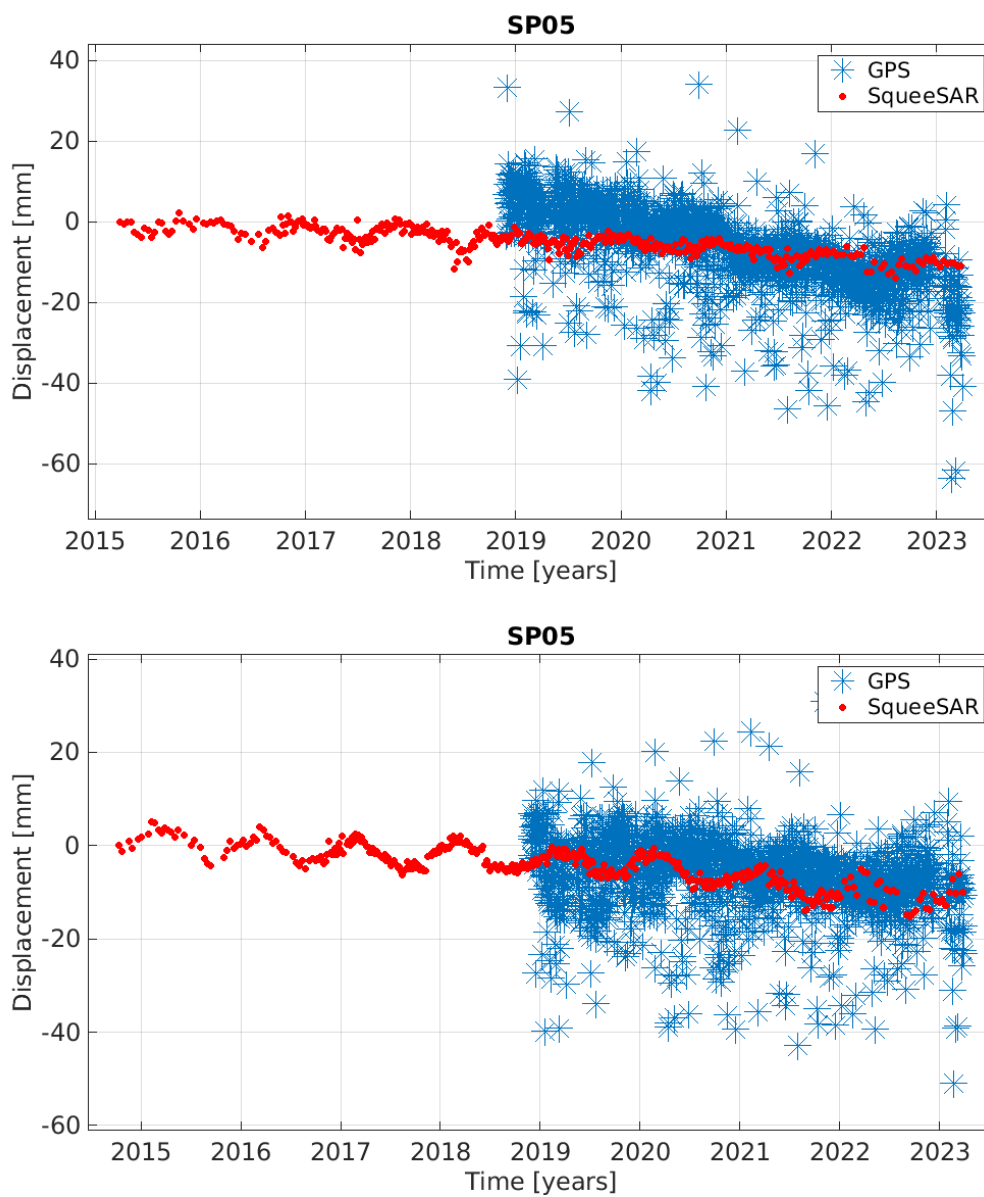


Figura 40: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP05 (blu).

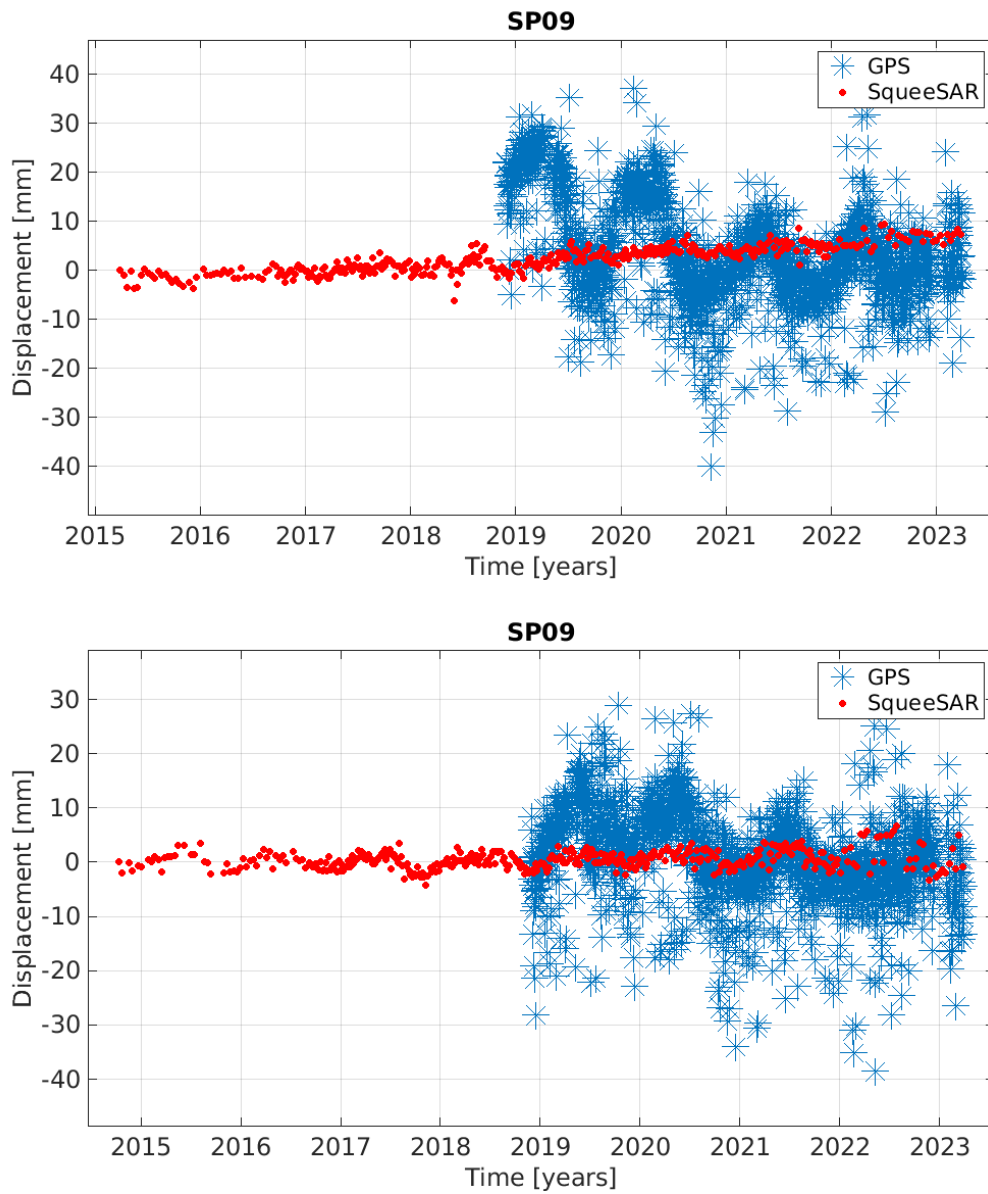


Figura 41: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP09 (blu).

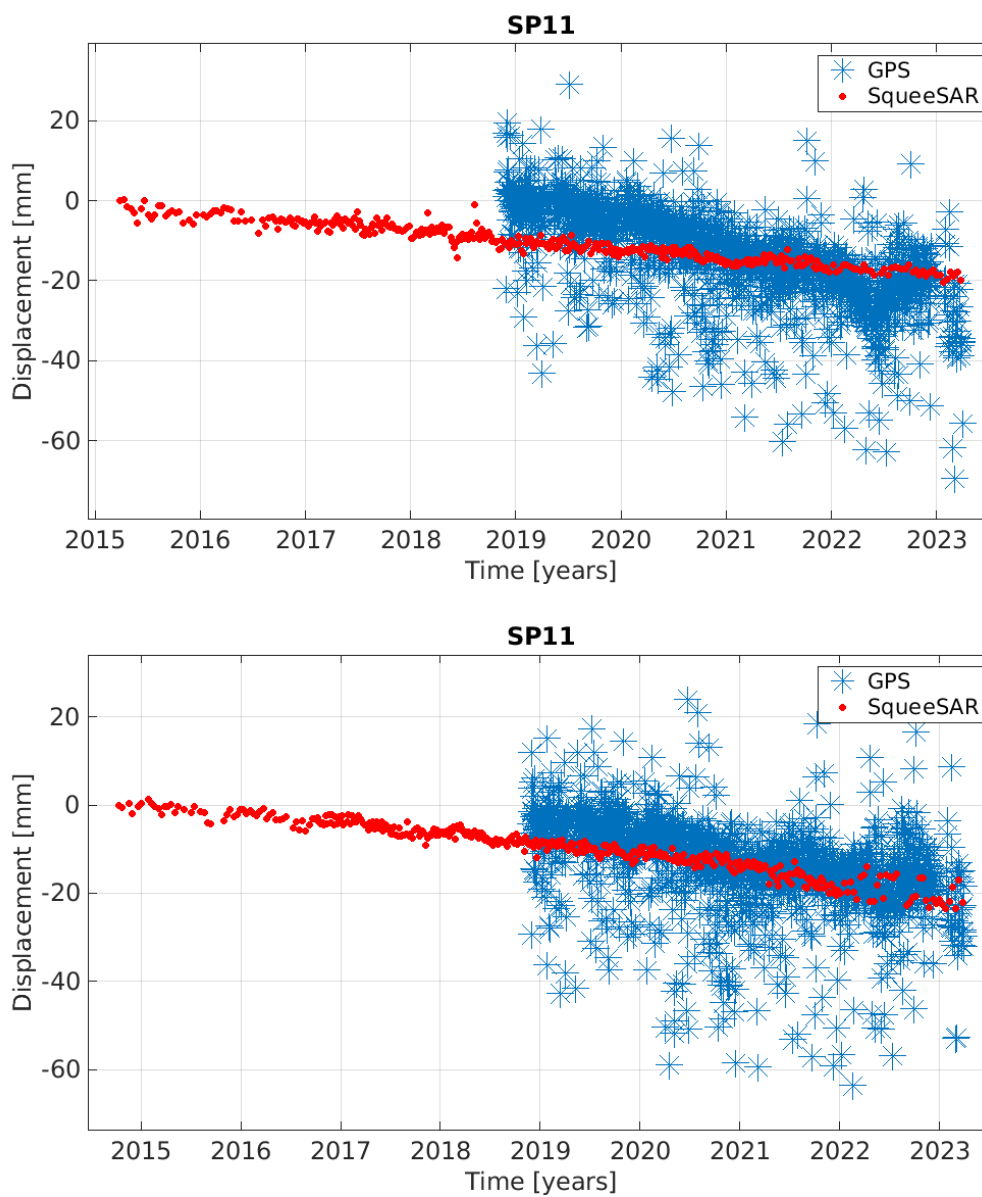


Figura 42: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP11 (blu).

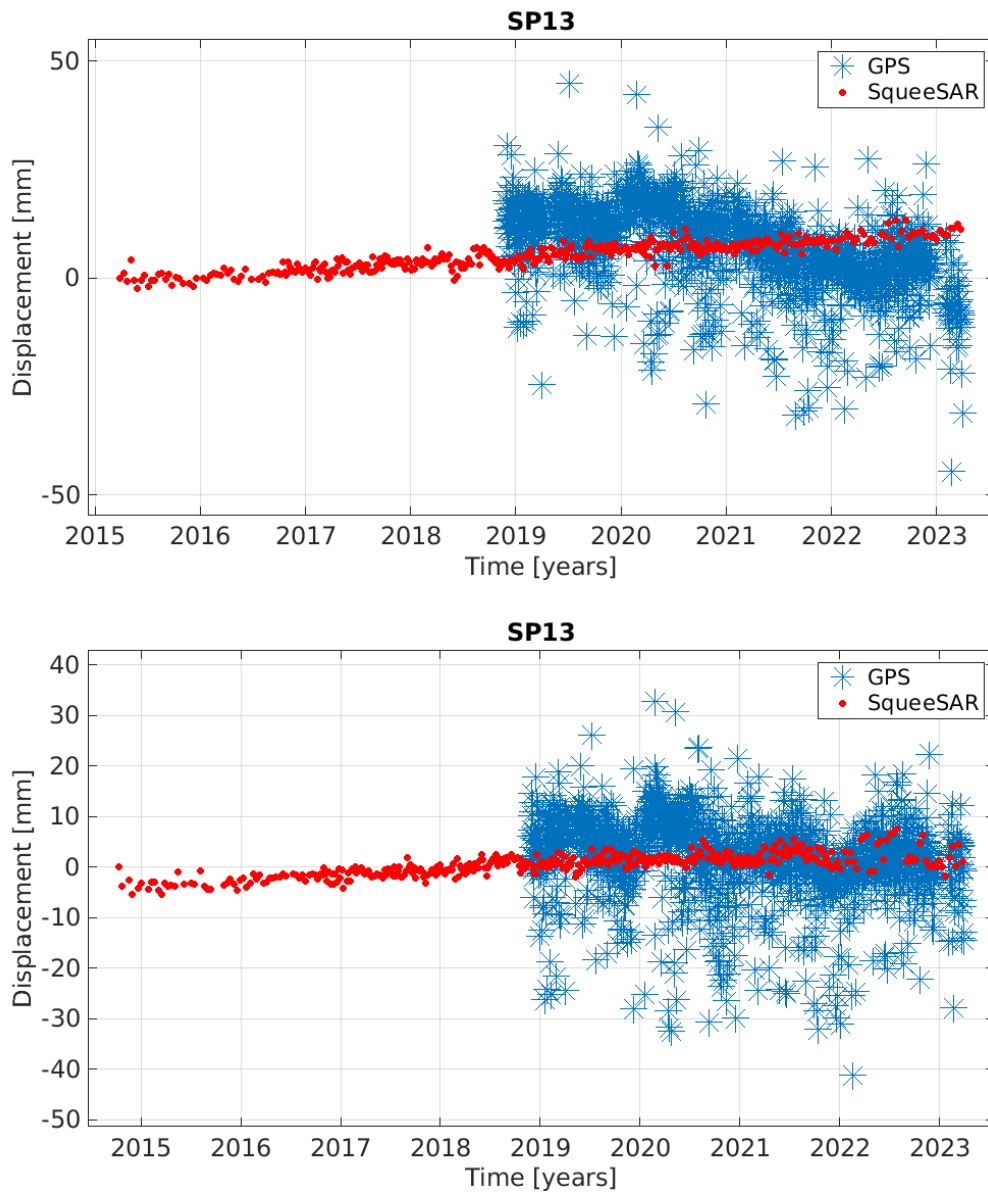


Figura 43. Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP13 (blu).

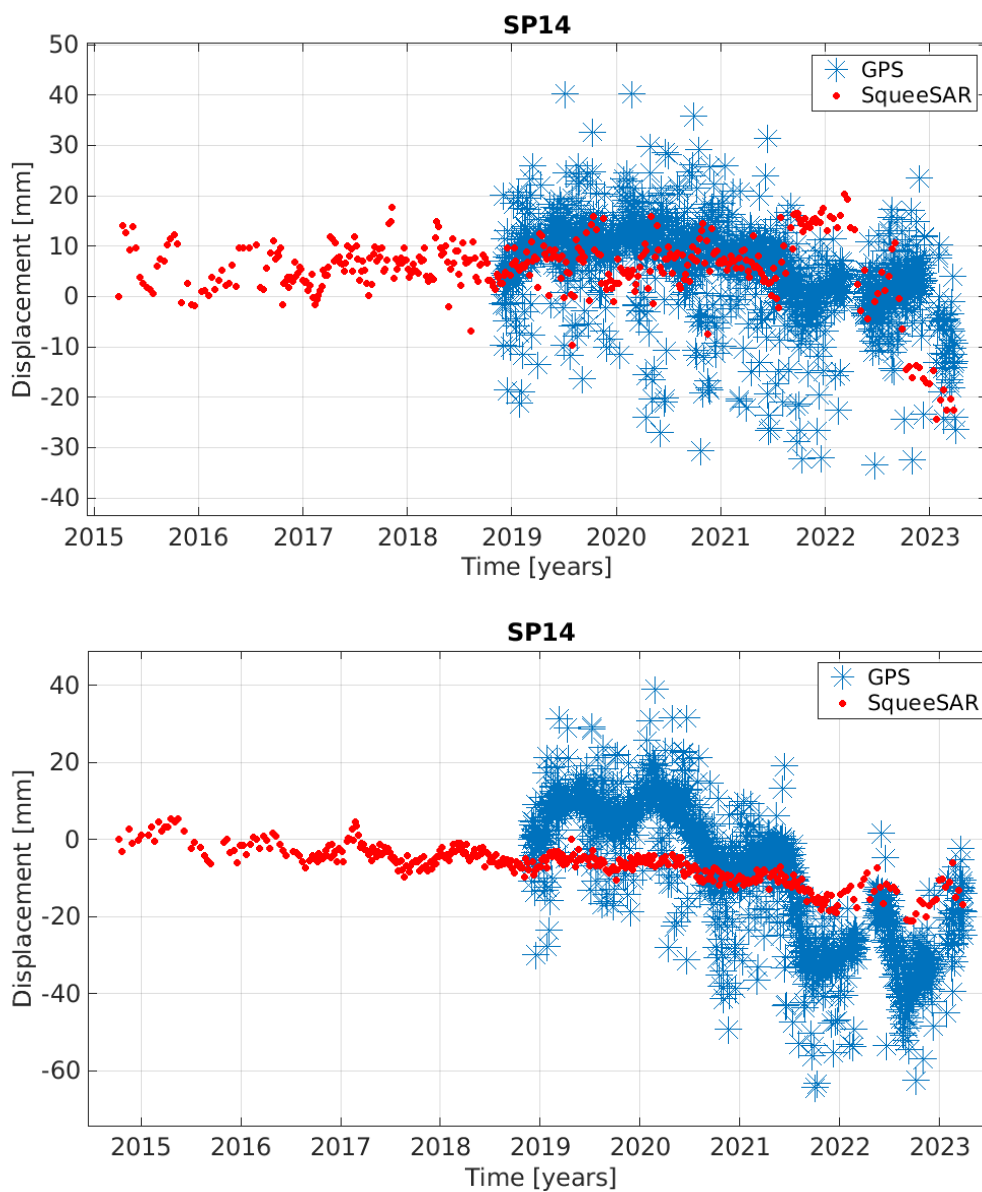


Figura 44: Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP14 (blu).

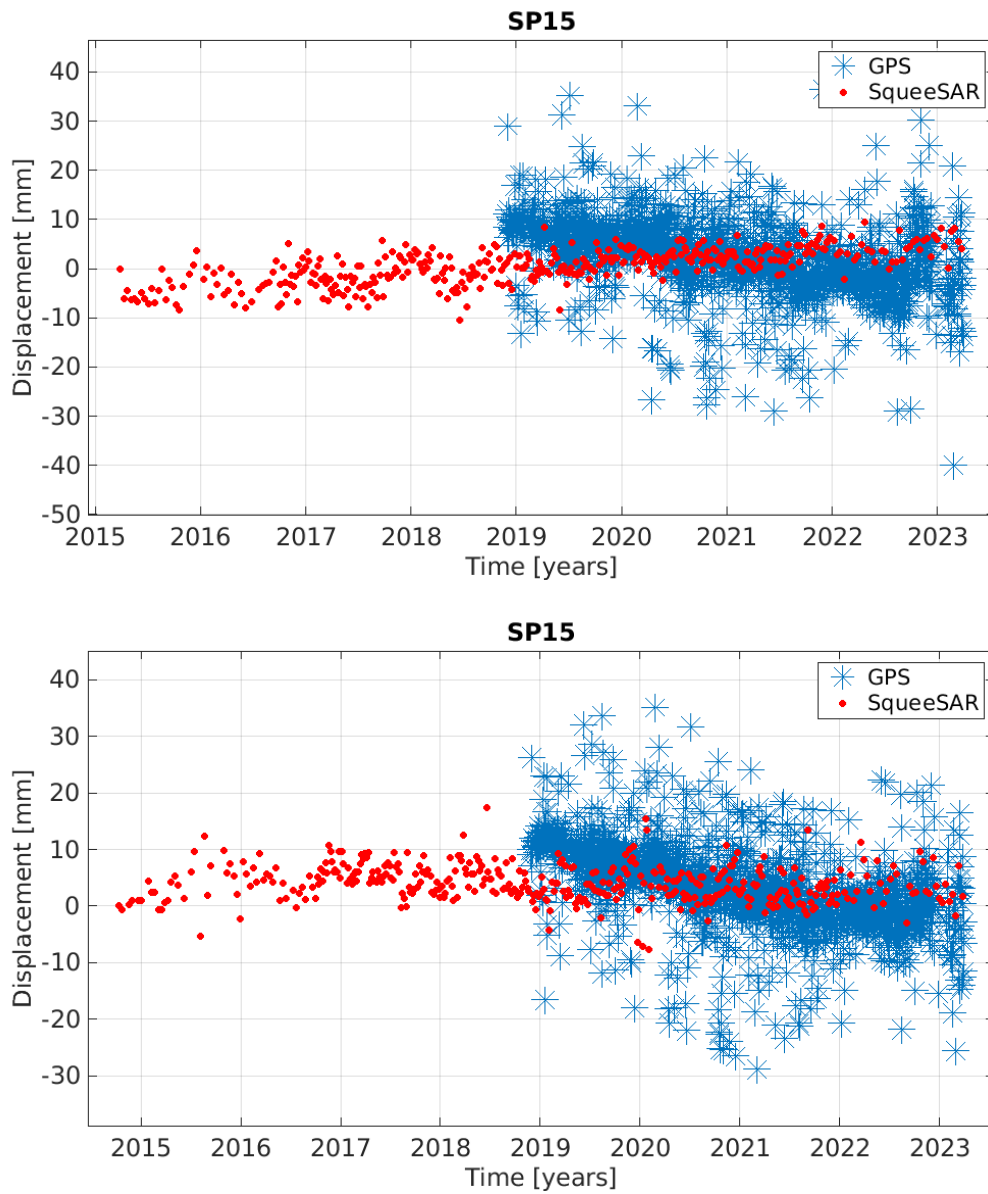


Figura 45:: : Confronto serie storiche di spostamento ascendente (in alto) e discendente (in basso) SqueeSAR® (rosso) e SP15 (blu).

4. Dati consegnati

Insieme alla presente Relazione Tecnica vengono consegnati:

- I risultati delle analisi SqueeSAR® in formato shapefile, visualizzabili in qualsiasi sistema informativo geografico. I file contengono le informazioni di velocità, quota e serie storiche (grafici tempo-spostamento) di tutti i punti di misura individuati nell'analisi (Tabella 5).
- Uno specifico Rapporto di Elaborazione ed un file in formato .xml per ogni elaborazione, contenenti tutti i metadati tecnici relativi all'analisi SqueeSAR® condotta, alle immagini utilizzate, ai versori di LOS (*Line Of Sight*, direzione di vista del satellite) e al codice e localizzazione del punto di riferimento.
 - I risultati ottenuti dalla scomposizione in formato shapefile, uno per ogni componente. In aggiunta, è fornito anche un file in formato .xml, contenenti tutti i metadati tecnici relativi alla scomposizione

Tutti i dati vettoriali sono consegnati nel sistema di proiezione WGS 1984-UTM 32N. La lista completa dei file consegnati è riportata in Tabella 7.

| Campo | Descrizione |
|-------------------|--|
| CODE | Codice identificativo del punto di misura (MP) |
| HEIGHT | Quota del punto [m] calcolata rispetto all'ellissoide di riferimento WGS84 |
| H_STDEV | Deviazione standard del parametro quota [m] |
| VEL | Velocità media annua di spostamento [mm/anno] misurata lungo la linea di vista del sistema (LOS). Valori positivi indicano avvicinamento al satellite, valori negativi indicano allontanamento dal satellite |
| V_STDEV | Deviazione standard del parametro velocità media annua [mm/anno] |
| SEASON_AMP | Valore medio di semi-ampiezza della stagionalità [mm] |
| S_AMP_STD | Deviazione standard del parametro semi-ampiezza della stagionalità [mm] |
| SEASON_PHS | Posizione del valor massimo dell'ampiezza della stagionalità rispetto alla prima acquisizione (fase della stagionalità) [gg]. |
| S_PHS_STD | Deviazione standard del parametro fase della stagionalità [mm] |
| COHERENCE | Indice di qualità, compreso tra zero (min) e 1 (max), funzione di quanto il modello di spostamento scelto si adatta alla serie storica di spostamento di un MP |
| EFF_AREA | Parametro che indica la tipologia del punto di misura (0 = PS, > 0 = DS); nel caso dei DS questo campo indica l'estensione dell'area associata a ciascun DS [m ²]. |
| Daaammgg | Serie di colonne contenenti i valori di spostamento cumulato (lungo LOS) per ogni successiva acquisizione. La data dell'acquisizione è espressa in aaammgg. I valori di spostamento sono espressi in [mm]. |

Tabella 5: Campi contenuti nel database associato al dato vettoriale dia una elaborazione in singola geometria

| Campo | Descrizione |
|---------------------|--|
| CODE | Codice identificativo del punto di misura ottenuto dalla scomposizione (combinazione di dati in singola geometria), posizionato al centro della cella di scomposizione. |
| VEL_V/_E | Velocità media annua di spostamento [mm/anno] verticale/orizzontale est-ovest. Valori positivi indicano spostamenti verso l'alto/spostamenti verso est. |
| V_STDEV_V/_E | Deviazione standard della velocità media verticale/ orizzontale est-ovest [mm/anno]. |
| S_AMP_V/_E | Valore medio di semi-ampiezza della stagionalità [mm] per la componente verticale/ orizzontale est-ovest |
| S_PHS_V/E | Posizione del valor massimo dell'ampiezza della stagionalità rispetto alla prima acquisizione (fase della stagionalità) [gg] per la componente verticale/ orizzontale est-ovest |
| Daaammgg | Serie di colonne contenenti i valori di spostamento cumulato verticale/orizzontale est-ovest per ogni successiva acquisizione. La data dell'acquisizione è espressa in aaammgg. I valori di spostamento sono espressi in [mm]. |

Tabella 6: Contenuti del database associato ai risultati della scomposizione.

| Analisi | Nome file |
|--------------------------|--|
| Singola Geometria | SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_T117_A_MAR2023_IT4668A001S.shp |
| | Asce SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_T117_A_MAR2023_IT4668A001S.xml |
| | SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_T117_A_MAR2023_IT4668A001S.pdf |
| Scomposizione | Desce SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_T95_D_MAR2023_IT4668A002S.shp |
| | SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_T95_D_MAR2023_IT4668A002S.xml |
| | SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_T95_D_MAR2023_IT4668A002S.pdf |
| Scomposizione | Verticale SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_VERT_MAR2023_IT4668A005V.shp |
| | SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_VERT_MAR2023_IT4668A005V.xml |
| | Est- SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_EAST_MAR2023_IT4668A006E.shp |
| | Ovest SAN_POTITO_COTIGNOLA_SNT_EAST_MAR2023_IT4668A006E.xml |
| Relazione Tecnica | Cotignola_SanPotito_Relazione_Tecnica_UpdateAPR2023.pdf |

Tabella 7: Elenco dei file consegnati.

5. Conclusioni

L'analisi condotta ha aggiornato a marzo 2023 i dati di monitoraggio satellitare SqueeSAR® sul sito di stoccaggio di Cotignola e San Potito, con dati provenienti dalla costellazione a media risoluzione SNT. L'analisi ha fornito misure di spostamento in linea con quelle osservate in precedenza, in particolare con l'aggiornamento realizzato con dati SNT di settembre 2022.

Il presente aggiornamento ha evidenziato quanto segue:

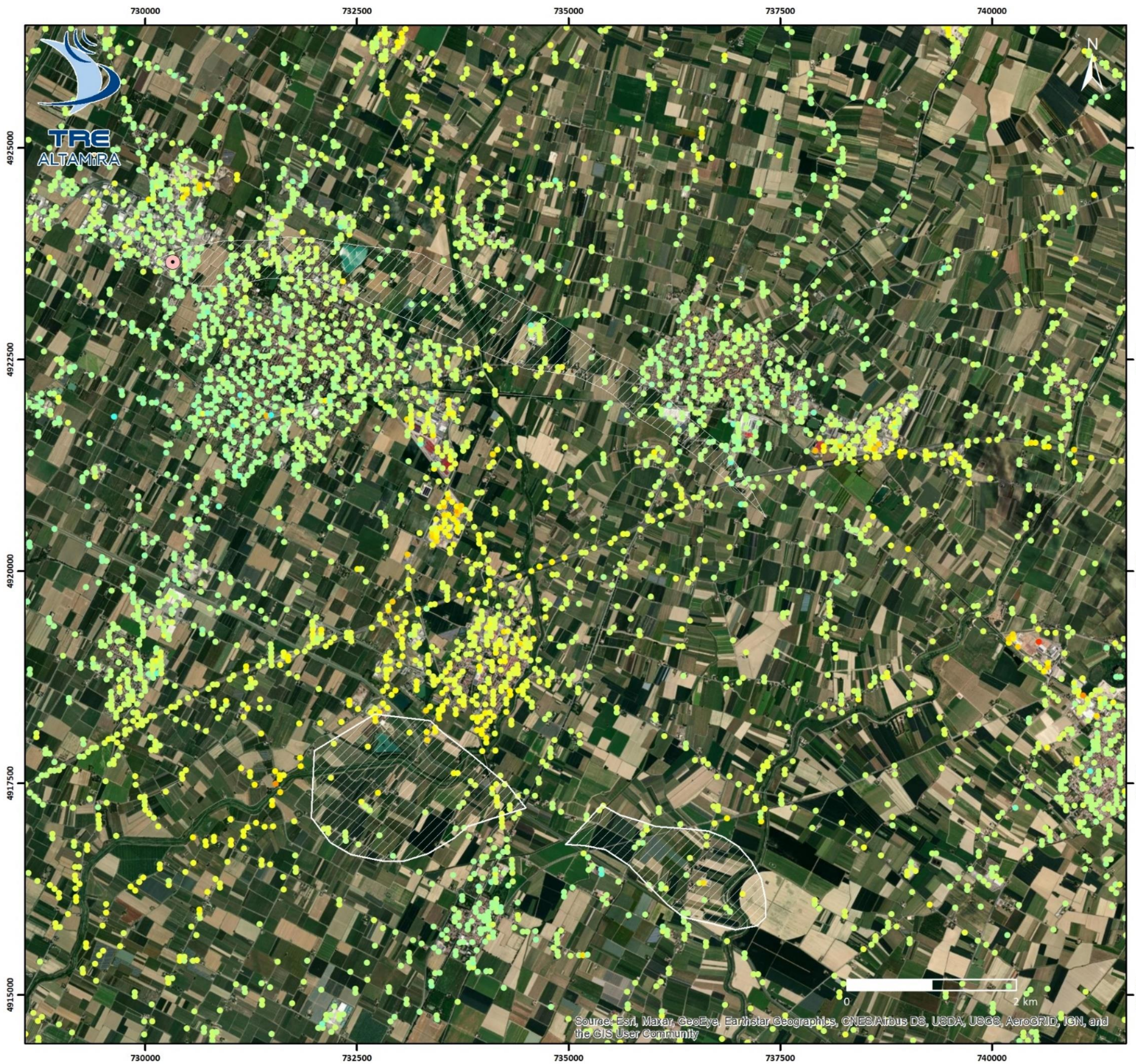
- Nel Pool A i blandi fenomeni ciclici individuati sono probabilmente connessi alle variazioni stagionali della falda acquifera
- La permanenza di un trend ciclico nelle serie storiche osservato sia nel Pool B che nel Pool C
- Nei Pool B e C l'ampiezza massima media della stagionalità misurata per la componente verticale è compresa entro i 15 mm.

Allegati

Si allegano di seguito le seguenti tavole in formato A3 con i risultati ottenuti dallo studio:

- TAVOLA 1 – Velocità media della componente verticale, ottenuta dalla combinazione delle due geometrie.
- TAVOLA 2 – Velocità media della componente orizzontale E-O, ottenuta dalla combinazione delle due geometrie.

TAVOLA 3 – Ampiezza della stagionalità per la componente verticale



Analisi SqueeSAR™

TAVOLA 1
SNT Componente verticale
Velocità media

SITO
 Cotignola e S. Potito

DATI ELABORAZIONE

| | |
|-----------------|-------------------------|
| Satellite | Sentinel |
| Geometria | Ascendente |
| Track | 117 |
| Numero immagini | 392 |
| Periodo | 30/03/2015 - 24/03/2023 |

| | |
|-----------------|-------------------------|
| Satellite | Sentinel |
| Geometria | Discendente |
| Track | 95 |
| Numero immagini | 396 |
| Periodo | 12/10/2014 - 23/03/2023 |

| | |
|--|-------------------------|
| Sovrapposizione temporale per la scomposizione | 30/03/2015 - 23/03/2023 |
|--|-------------------------|

LEGENDA

- Limite giacimento proiettato in superficie
- Punto di riferimento

Velocità media [mm/anno]
 componente verticale

down up

≤-15 0 ≥+15

Supporto cartografico: Esri
 Sistema di proiezione: WGS84-UTM32N (ESRI: WGS_1984_UTM_Zone_32N)
 © TRE ALTAMIRA 2023

Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community



TAVOLA 2

SNT Componente est-ovest

Velocità media

SITO

Cotignola e S. Potito



DATI ELABORAZIONE

| | |
|-----------------|-------------------------|
| Satellite | Sentinel |
| Geometria | Ascendente |
| Track | 117 |
| Numero immagini | 392 |
| Periodo | 30/03/2015 - 24/03/2023 |

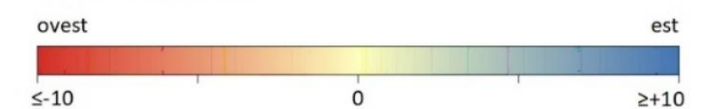
| | |
|-----------------|-------------------------|
| Satellite | Sentinel |
| Geometria | Discendente |
| Track | 95 |
| Numero immagini | 396 |
| Periodo | 12/10/2014 - 23/03/2023 |

| | |
|--|-------------------------|
| Sovrapposizione temporale per la scomposizione | 30/03/2015 - 23/03/2023 |
|--|-------------------------|

LEGENDA

-  Limite giacimento proiettato in superficie
-  Punto di riferimento

Velocità media [mm/anno]
componente orizzontale



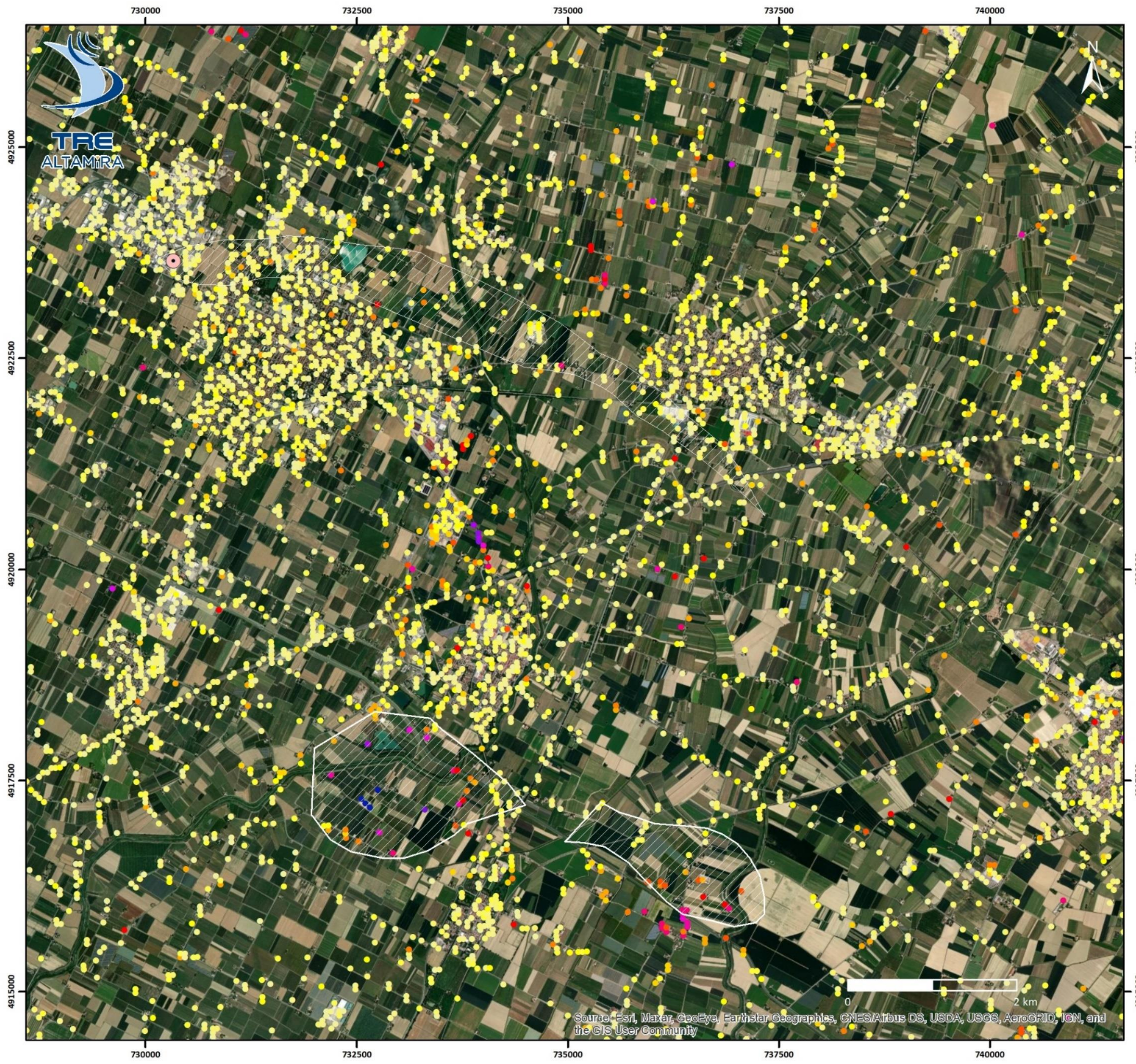


TAVOLA 3

SNT Componente verticale

Ampiezza stagionalità



SITO
Cotignola e S. Potito

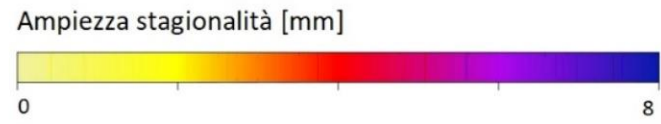
DATI ELABORAZIONE

| | |
|-----------------|-------------------------|
| Satellite | Sentinel |
| Geometria | Ascendente |
| Track | 117 |
| Numero immagini | 392 |
| Periodo | 30/03/2015 - 24/03/2023 |

| | |
|-----------------|-------------------------|
| Satellite | Sentinel |
| Geometria | Discendente |
| Track | 95 |
| Numero immagini | 396 |
| Periodo | 12/10/2014 - 23/03/2023 |

| | |
|--|-------------------------|
| Sovrapposizione temporale per la scomposizione | 30/03/2015 - 23/03/2023 |
|--|-------------------------|

- LEGENDA**
-  Limite giacimento proiettato in superficie
 -  Punto di riferimento



Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community



**TRE
ALTAMIRA**
A CLS Group Company

TRE ALTAMIRA s.r.l.
Ripa di Porta Ticinese, 79
20143 Milan Italy
Tel: +39 02 4343 121

TRE ALTAMIRA S.L.U.
Carrer de Còrsega, 381-387
08037 Barcelona Spain
Tel.: +34 93 183 57 50

TRE ALTAMIRA Inc.
Suite 410, 475 West Georgia Street
Vancouver, BC V6B 4M9 Canada
Tel: +1 604 331 2512

tre-altamira.com

