



CONCESSIONE SETTALA STOCCAGGIO

Risultati del monitoraggio durante l'esercizio in sovrappressione
(Ciclo di stoccaggio 2019-2020)

MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI DEL SUOLO

(aggiornamento dati a Novembre 2019)

		A. Mantegazzi	C. Coti
Aprile 2020	G. Codegone		
DATA DI EMISSIONE	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO



SOMMARIO

1. INTRODUZIONE	3
2. IL MONITORAGGIO SATELLITARE SAR	5
2.1. LA TECNICA PSP-IFSAR™	6
2.2. INDICI DI PRECISIONE	8
2.3. TIPOLOGIA DI ANALISI PS PROPOSTE	9
3. ANALISI DEL CAMPO DI SETTALA	13
3.1. ANALISI DEL DATO RADARSAT 1 – RADARSAT 2	14
3.1.1. ANALISI DEL DATO GPS	14
3.1.2. CALIBRAZIONE DEL DATO REGIONAL CON GPS DI RIFERIMENTO.....	16
3.1.3. CALIBRAZIONE DEL DATO LOCAL CON IL DATO REGIONAL	19
3.1.4. ANALISI DELLE SERIE STORICHE DEI PUNTI SCOMPOSTI.....	26
3.2. ANALISI DEL DATO SENTINEL 1	32
3.2.1. ANALISI DEI VALORI DI VELOCITÀ MEDIA	32
3.2.2. ANALISI DELLE SERIE STORICHE DEI PUNTI SCOMPOSTI.....	35
4. CONCLUSIONI	41



1. Introduzione

Il giacimento di stoccaggio di Settala (MI), attivo dal 1986, è attualmente gestito in regime di sovrappressione nel Livello SAN P/E, con limite di esercizio non superiore al 107% della pressione statica originaria di scoperta, ossia non superiore a $150,2 \text{ kg/cm}^2_{\text{ass}}$.

Questa relazione tecnica intende riscontrare in particolare le prescrizioni riguardanti le attività di monitoraggio dei movimenti del suolo, ossia:

- Punto 6 del decreto DVA-DEC-0000002 del 27.01.2010: *“si dovrà proseguire il monitoraggio in atto della subsidenza e i relativi risultati dovranno essere inviati con modalità da concordare e con cadenza annuale, al MATTM e all’ARPA della Regione Lombardia”*.
- Punto 1 del Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 25.10.2010: *“effettuare un monitoraggio altimetrico continuo per la valutazione delle variazioni altimetriche del suolo attraverso l’interpretazione di immagini da satellite (SAR)”*.

Lo stoccaggio di gas naturale in giacimenti terrigeni depletati può generare deformazioni di lieve entità e limitate all’area del giacimento, monitorabili attraverso la tecnica dell’interferometria SAR. Per distinguerle da quelle naturali di sito e/o antropiche generate da altre attività (ad esempio l’emungimento di falde acquifere superficiali), è necessario che il monitoraggio dei movimenti del suolo sia esteso ad un’area sufficientemente ampia rispetto alla dimensione del giacimento. Lo scopo è quello di fornire informazioni sia sull’andamento temporale dei movimenti del suolo, sia sulla loro distribuzione spaziale entro l’area di interesse, mettendo in luce le possibili variazioni rispetto allo scenario deformativo di fondo ed eventuali deformazioni cumulate nel tempo.

La presente relazione ha come scopo l’aggiornamento a Novembre 2019 dei dati radar satellitari acquisiti sul campo Stogit di Settala per il monitoraggio delle possibili deformazioni del terreno connesse all’attività di stoccaggio. L’analisi interferometrica si è basata sull’elaborazione congiunta delle immagini radar acquisite in geometria ascendente e discendente dai satelliti Radarsat-1 e Radarsat-2 nel periodo Ottobre 2003 – Novembre 2019.

È stata inoltre eseguita l’analisi Sentinel riferita al periodo Marzo 2015 – Novembre 2019 ed il relativo confronto con il dataset Radarsat. L’utilizzo di entrambi i satelliti permette da un lato di non perdere l’informazione storica che consente di estendere il monitoraggio dei giacimenti Stogit fino al 2003 (Radarsat) e dall’altro lato permette di aumentare la frequenza temporale delle acquisizioni (Sentinel fornisce una misura ogni 6 giorni).

Il dato Radarsat è stato calibrato in termini assoluti utilizzando il CGPS pubblico del Politecnico di Milano (Rete SPINN GNSS) ed è stata analizzata la distribuzione dei valori di velocità media entro l’area di interesse. Successivamente è stato eseguito un confronto tra la curva del volume di gas movimentato del campo e le serie storiche di spostamento di alcuni punti rappresentativi posti



all'interno e all'esterno del limite del giacimento, inteso come proiezione in superficie del contatto gas-acqua originario.

L'analisi con Radarsat evidenzia una velocità verticale media all'interno dei limiti del giacimento pari a +0.67 mm/anno, in linea con gli aggiornamenti precedenti e con quanto evidenziato dal dato del CGPS di Milano (+0.84 mm/anno). Le serie storiche dei punti interni selezionati presentano un'elevata correlazione con la curva cumulativa di stoccaggio, con oscillazioni medie di circa 10-20 millimetri. Tale correlazione non viene riscontrata per i punti esterni, dove le deformazioni verticali analizzate non sono associabili all'attività di stoccaggio, ad eccezione dell'area immediatamente a sud del giacimento in cui l'effetto dello stoccaggio in superficie è ancora visibile ma diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi ad una distanza di circa 1,5 km dal limite del giacimento. Una tale particolare distribuzione delle deformazioni in superficie è riconducibile all'asimmetria del giacimento, che presenta un assetto geologico con rapida chiusura del reservoir verso nord e progressivo ispessimento verso sud, con conseguente riverbero sul baricentro teorico delle deformazioni superficiali associate.

Lo specchio seguente riassume i risultati dell'analisi SAR Radarsat sul campo di Settala.

Variazioni Altimetriche

Trend regionale (valori CGPS Milano)	Relative rispetto al trend regionale
+ 0.84 mm/anno	~ (+0.67 mm/anno)

Correlazione con il ciclo di stoccaggio

Ampiezza media delle curve	SHIFT temporale	Correlazione (con la curva di stoccaggio)
~ 10-20 mm	~ 30 gg	ELEVATA

2. Il monitoraggio satellitare SAR

L'interferometria differenziale SAR (Synthetic Aperture Radar) è uno strumento molto efficace per il monitoraggio ad alta precisione dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'elaborazione di sequenze temporali d'immagini radar satellitari. Il radar ad apertura sintetica è un sensore attivo, montato a bordo di satelliti, che emette radiazioni elettromagnetiche e registra la potenza del segnale riflesso dalla superficie terrestre, calcolando il tempo intercorso fra emissione e ritorno del segnale stesso. L'immagine SAR è pertanto definita dai seguenti parametri:

- l'ampiezza, legata all'energia del segnale riflesso e rilevato dall'antenna del sensore: tutti gli impulsi emessi hanno la stessa energia, quelli riflessi presentano livelli di energia anche molto diversi. I metalli e gli oggetti solidi quali manufatti e rocce esposte, presentano una elevata capacità di riflessione e sono pertanto ben visibili in un'immagine radar, mentre il legno, i campi coltivati e le foreste hanno minore capacità riflettente e, conseguentemente, generano dati SAR di bassa ampiezza;
- la fase è determinata dal tempo di volo dell'impulso radar (cioè il tempo di propagazione tra antenna e terreno e viceversa) ed è perciò legata alla distanza sensore-bersaglio. Il tempo di volo è influenzato anche dal mezzo di propagazione dell'onda elettromagnetica, ovvero l'atmosfera: nubi, pioggia e nebbia influenzano la velocità di propagazione del segnale e introducono, di conseguenza, effetti sulla fase rilevata. Un'errata o comunque imprecisa stima e rimozione del contributo atmosferico può infatti sottostimare gli effetti di moto stagionali e non lineari in quanto parzialmente interpretati come componenti atmosferiche.

Questa tecnologia di telerilevamento sfrutta le acquisizioni disponibili su una stessa area di interesse in tempi successivi, generando una mappa di deformazione del suolo proveniente dalle immagini interferometriche acquisite, individuando così quei bersagli che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. Per ciascuno di essi, nell'intervallo di tempo analizzato, è possibile ricostruire la serie storica di spostamento con precisione sub-centimetrica.

Il radar, ad ogni acquisizione, misura la distanza sensore-bersaglio lungo la linea di vista del satellite (LOS), pertanto le deformazioni rilevate si riferiscono alla componente degli spostamenti superficiali proiettata lungo la LOS del satellite (positiva se si allontana dal satellite, negativa se si avvicina). La stessa area può però essere vista da orbite ascendenti e discendenti, e i dati delle due geometrie di acquisizione possono essere combinati per il calcolo delle componenti verticale ed orizzontale del moto (Fig. 1). È importante sottolineare che, a causa della scarsa sensibilità della geometria di acquisizione del sensore alla componente N-S del moto orizzontale, l'unica componente del moto orizzontale valutata è quella E-W.

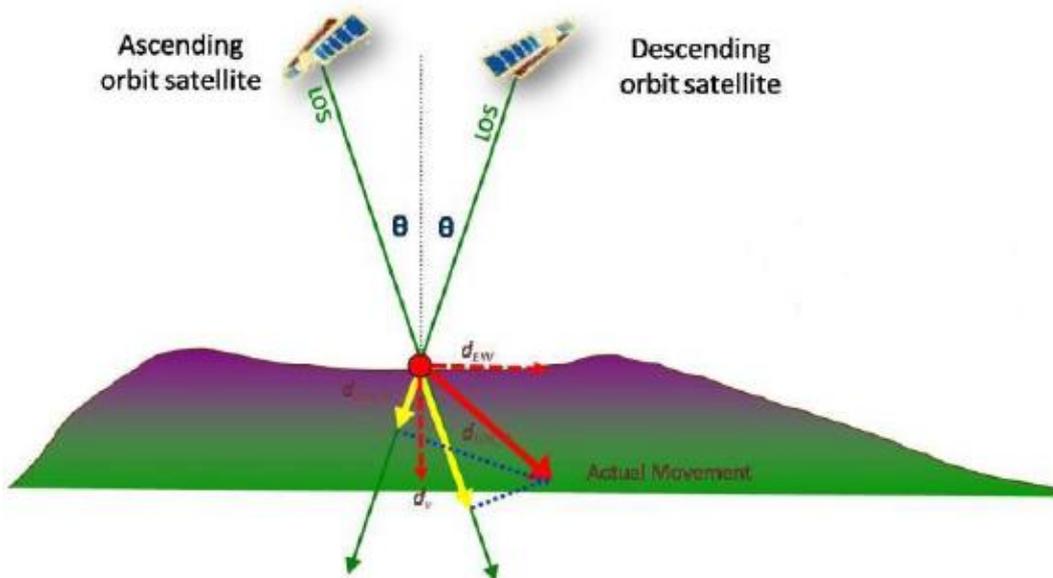


Fig. 1 Scomposizione del moto dalle LOS ascendente e discendente alle componenti orizzontale est-ovest e verticale.

Le immagini SAR vengono acquisite con una frequenza che dipende dal tempo di rivisitazione del satellite utilizzato. Per il monitoraggio del giacimento di Settala, Stogit utilizza i dati dei seguenti satelliti, che lavorano in banda C:

- Radarsat-1 e Radarsat-2 dell’Agenzia Spaziale Canadese, che consentono di monitorare il progresso fino al 2003 ed acquisiscono un’immagine ogni 24 giorni (circa 14-15 immagini disponibili ogni anno per ciascuna geometria di acquisizione).
- Sentinel-1 dell’Agenzia Spaziale Europea, disponibile solo dal 2014 ma che acquisisce con un tempo di rivisitazione di 6 giorni (circa 60 immagini ogni anno per geometria).

Il satellite Radarsat-1, lanciato nel 1995 e non più operativo da marzo 2013, è stato sostituito dal satellite Radarsat-2 (lanciato nel dicembre 2007), il quale rappresenta il prosieguo della missione Radarsat-1. Entrambi i satelliti acquisiscono in banda C, ma con lunghezza d’onda del segnale radar lievemente differente, tale da impedire l’utilizzo simultaneo di immagini acquisite da questi due satelliti nelle applicazioni interferometriche standard. Con la tecnica PSP-IFSAR™ è possibile effettuare elaborazioni congiunte di dati acquisiti da satelliti diversi, applicando la procedura detta di “stitching”. I test effettuati hanno stimato un intervallo minimo di sovrapposizione temporale tra i due dataset di almeno 8 immagini, anche se l’elemento più importante per garantirne la qualità è rappresentato dal numero più elevato possibile di immagini a disposizione per ciascun dataset.

2.1. La Tecnica PSP-IFSAR™

La tecnologia interferometrica PSP-IFSAR™ è una tecnica d’interferometria differenziale SAR di tipo Persistent Scatterer Interferometry (PSI) che utilizza una procedura algoritmica proprietaria



per misurare movimenti lenti del terreno dovuti a frane, subsidenza/uplift, fenomeni vulcanici e sismici e spostamenti di singoli edifici.

Il punto di partenza per poter applicare tale metodologia è quello disporre di un elevato numero di immagini acquisite sulla stessa zona di interesse. Tale analisi consente l'individuazione di alcuni elementi al suolo denominati PS (Persistent Scatterers), che presentano una spiccata stabilità nei valori di ampiezza e un'elevata coerenza nella fase in tutte le acquisizioni che compongono il set di dati a disposizione. Si tratta di bersagli radar privilegiati (edifici, strutture metalliche, rocce affioranti, superfici non vegetate dure) che il satellite identifica sul territorio, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente nel tempo.

Avendo a disposizione sequenze di immagini sulla stessa zona e lungo la stessa orbita registrate in tempi successivi, è possibile mettere in evidenza l'evoluzione degli spostamenti nell'area con misure estremamente accurate (nell'ordine del millimetro), dalle quali è possibile ricavare stime di velocità. Per ogni singolo PS si ricavano la posizione (latitudine, longitudine, quota), il trend medio di deformazione (ovvero l'interpolazione lineare dello spostamento misurato nell'intero periodo di monitoraggio) e l'intera serie temporale di deformazione, misurati lungo la LOS per l'intero arco temporale in cui sono state acquisite le immagini.

I valori di velocità media per ciascuna geometria di acquisizione sono di tipo differenziale, ottenuti dopo avere determinato su base statistica un punto ad alta coerenza di fase, di coordinate note e supposto stabile (PS di riferimento con velocità pari a zero), rispetto al quale sono riferite tutte le stime di movimento dei PS: le misure SAR sono pertanto sempre di tipo relativo. La procedura per la selezione del PS di riferimento nella fase di elaborazione consente all'operatore di valutare più opzioni fra i PS che presentano una maggiore stabilità nel tempo, e di scegliere così quella più consona all'applicazione.

L'acquisizione di nuove immagini nel tempo consente di ottenere stime più precise di velocità e di quota dei PS, pertanto ogni aggiornamento annuale implica il reprocessing dell'intero dataset e rappresenta un'elaborazione indipendente. La variazione nella stima di quota può comportare una lieve variazione nella localizzazione geografica dei punti di misura rispetto al dato elaborato in precedenza. In alcuni casi è anche possibile osservare la scomparsa/comparsa di alcuni punti a causa di una modifica della loro risposta radar nelle nuove immagini del dataset (ad esempio un edificio demolito o una nuova costruzione).

L'elevata densità di punti di misura, soprattutto in corrispondenza di centri abitati (densità oltre 500 PS/km²), permette un'elevata applicabilità della tecnologia nell'ambito dei monitoraggi (Fig. 2). Le peculiarità della Tecnica PSI, quali la capacità di analisi di vaste aree in tempi brevi, la dimensione puntuale e quantitativa delle misure e la loro precisione, l'elevata densità spaziale di bersagli radar per i quali ottenere informazioni di spostamento e la possibilità di accedere ad un archivio storico con una notevole mole di dati, mettono in luce la complementarietà del suo utilizzo con tecniche ormai consolidate quali la livellazione geometrica e le misurazioni GPS.

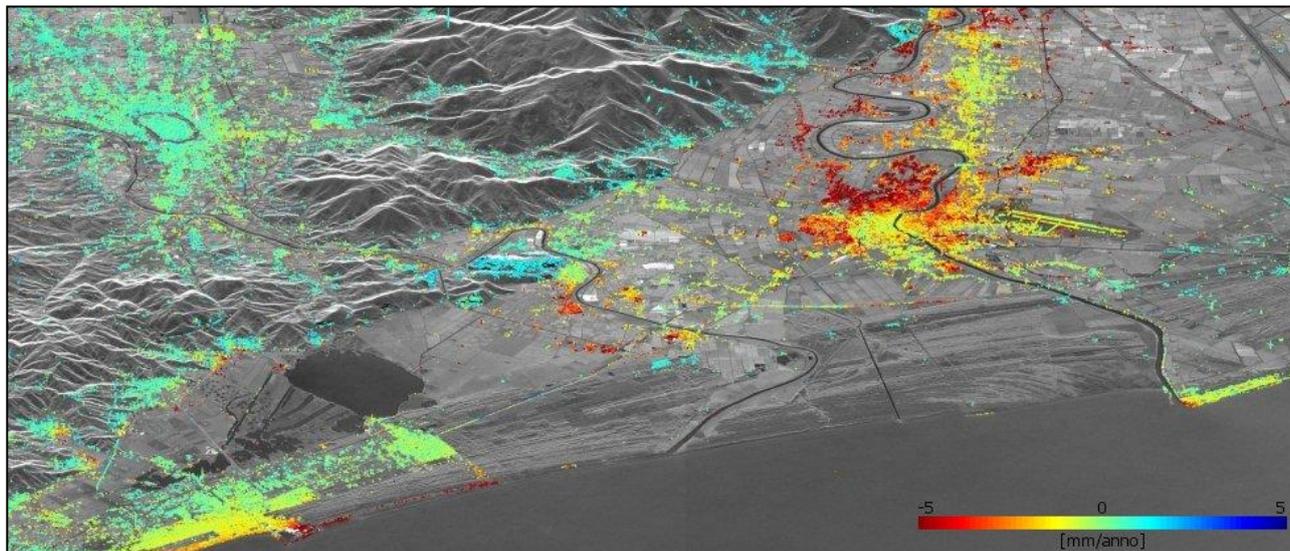


Fig. 2 Esempi di subsidenza nell'area di Pisa. I punti colorati indicano le posizioni dei PS, ed il loro colore indica la velocità media di spostamento lungo la LOS misurata.

2.2. Indici di precisione

Le analisi PSI sono caratterizzate da due indici di precisione importanti:

- la deviazione standard della velocità media;
- la coerenza temporale.

La deviazione standard (STD o σ) è un parametro utilizzato per quantificare il grado di precisione di un insieme di misure rispetto al loro valore medio. In questo caso, si riferisce alla velocità media dei PS rispetto al punto di riferimento e dipende da diversi fattori, quali la distanza fisica tra il PS ed il punto di riferimento (in genere aumenta allontanandosi da esso), dalla qualità del punto di misura (coerenza di fase) e dalla qualità della stima della componente atmosferica.

La coerenza temporale è un indice, compreso tra 0 e 1, che misura quanto bene la serie storica degli spostamenti segue un modello analitico. La scelta del modello deve tener conto del numero di immagini elaborate, dell'intervallo temporale tra la prima e l'ultima acquisizione e di eventuali lacune nell'acquisizione. In fase di elaborazione i PS vengono selezionati mediante test statistici che determinano il livello minimo di coerenza temporale accettabile, eliminando tutte le serie che presentano coerenza troppo bassa per garantire un'interpretazione del risultato. Il valore assoluto di coerenza non assume però una valenza qualitativa a sua volta assoluta, bensì relativa alla combinazione dei fattori che determinano il tipo di modello utilizzato. Questo significa che una serie temporale con, ad esempio, una coerenza temporale pari a 0,5 generata con un certo set di dati, può risultare qualitativamente diversa da una serie temporale con la stessa coerenza, ma generata da un set di dati diverso (ad esempio contenente un numero diverso di immagini).

2.3. Tipologia di analisi PS proposte

Scomposizione del moto nelle componenti verticale e orizzontale

A seguito delle elaborazioni dei dati ascendenti e discendenti, per ciascun PS è possibile ricavare il tasso di deformazione medio nella componente verticale ed orizzontale del moto: il dato relativo alle due geometrie di acquisizione viene infatti scomposto al fine di ottenere i valori di velocità media nelle due componenti citate.

Data la diversa localizzazione dei bersagli radar osservabili da due diverse LOS, per poter combinare le misure ottenute è necessario il ricampionamento dei dati in singola geometria su una griglia spaziale comune, con conseguente perdita di risoluzione spaziale. Le misure ottenute dalla combinazione dei dati non sono quindi da riferire a specifici bersagli radar sul terreno, ma ad una griglia ordinata di PS fittizi ("pseudo-PS") posizionati al centro della cella di scomposizione (Fig. 3). Informazioni sulle due componenti del moto sono quindi fornite per le sole celle contenenti punti di misura di entrambe le geometrie di acquisizione. Come per i dati in singola geometria, anche per i dati scomposti è fornito un valore di deviazione standard delle misure di velocità ottenute.

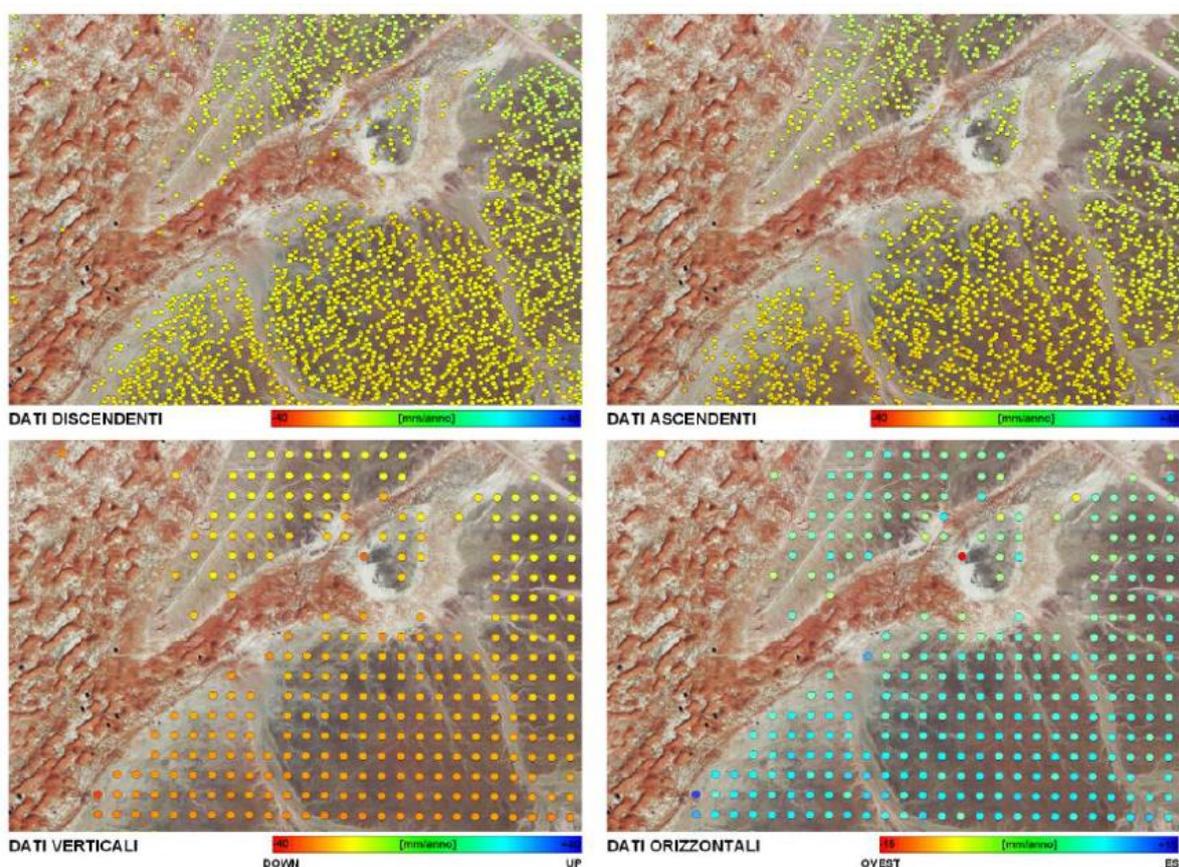


Fig. 3 Trasformazione dei dati di spostamento dei PS su griglia regolare. In alto i risultati ottenuti dai PS, in basso gli stessi ricampionati su griglia regolare per la scomposizione del moto.



Analisi Regional e Local con calibrazione in termini assoluti della velocità media di spostamento

Le analisi eseguite sul campo di Settala sono di due tipologie che differiscono principalmente per estensione dell'area indagata e, in alcuni casi, per la posizione del punto di riferimento:

- *Analisi Regional*: effettuata su un'area molto più estesa che racchiude più Concessioni di Stoccaggio (Settala e Brugherio), con una griglia di campionamento di 100x100 m e per la quale è disponibile un GPS pubblico di riferimento grazie al quale è possibile calibrare in termini assoluti il dato SAR (GPS di Milano).
- *Analisi Local*, effettuata su un'area di dimensioni paragonabili a quella della Concessione di Stoccaggio, con una griglia di campionamento di dimensioni 50x50 m, e caratterizzata da elaborazioni aggiuntive di maggior dettaglio.

I valori di velocità ottenuti per ogni singolo PS sono di tipo differenziale e vengono riferiti ad un punto di riferimento al quale viene assegnata una velocità pari a zero. I dati delle analisi Regional vengono calibrati in termini assoluti tramite l'integrazione con i dati provenienti da reti di stazioni GPS in continuo, che permettono di ottenere informazioni sulle tre componenti degli spostamenti assoluti rilevati in corrispondenza delle stazioni riceventi. Per la calibrazione, che viene applicata al dataset Radarsat, vengono utilizzate stazioni GPS pubbliche ubicate in aree esterne al giacimento, considerate stabili e non influenzate dall'attività di stoccaggio (nel caso di Settala si utilizza il GPS di Milano). Una volta calibrato il dato Regional, è così possibile calibrare in termini assoluti anche i dati delle singole analisi Local contenute al suo interno.

La distribuzione dei valori di velocità media entro l'area di interesse è stata analizzata con particolare attenzione rivolta alla componente verticale.

Analisi delle serie storiche

La sola analisi dei valori di velocità verticale media non consente di rilevare l'eventuale presenza di fenomeni di deformazione non lineari, come ad esempio i movimenti ciclici riconducibili all'attività di stoccaggio, che possono essere invece individuati analizzando le serie storiche di spostamento relative ad ogni singolo PS. Le serie storiche rappresentano l'andamento nel tempo di un singolo punto scomposto attraverso la variazione altimetrica registrata da ogni singola immagine radar acquisita (nel caso di Radarsat-1 e Radarsat-2 ogni 24 giorni, nel caso di Sentinel 1 ogni 6 giorni). È così possibile ottenere, oltre alle variazioni altimetriche relative per quel punto rispetto al punto di riferimento, anche gli spostamenti mensili di quel singolo punto nell'intero periodo considerato.

Oltre ai valori di velocità sono state pertanto scomposte anche le serie storiche di spostamento dei punti. Per ogni cella di risoluzione 50x50 m dell'analisi Local, si avrà quindi l'andamento della variazione altimetrica nel tempo e la velocità verticale media, già calcolata in mm/anno, ottenuta dalla retta di regressione lineare (si vedano ad esempio le Fig. 4 e Fig. 5).

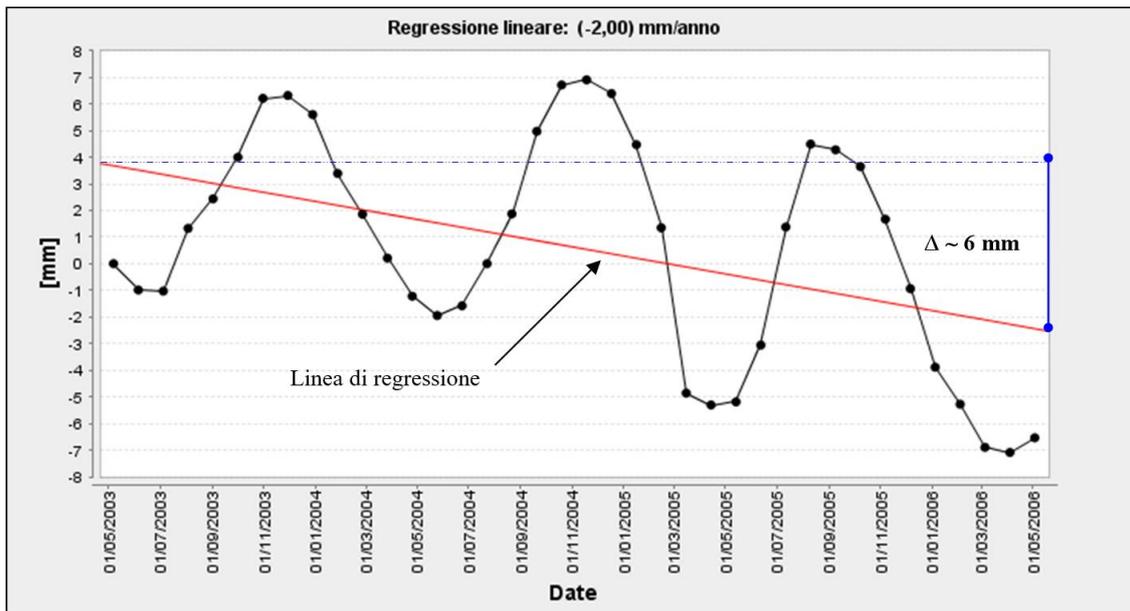


Fig. 4 Esempio di serie storica con valori di subsidenza di circa 2 mm/anno.

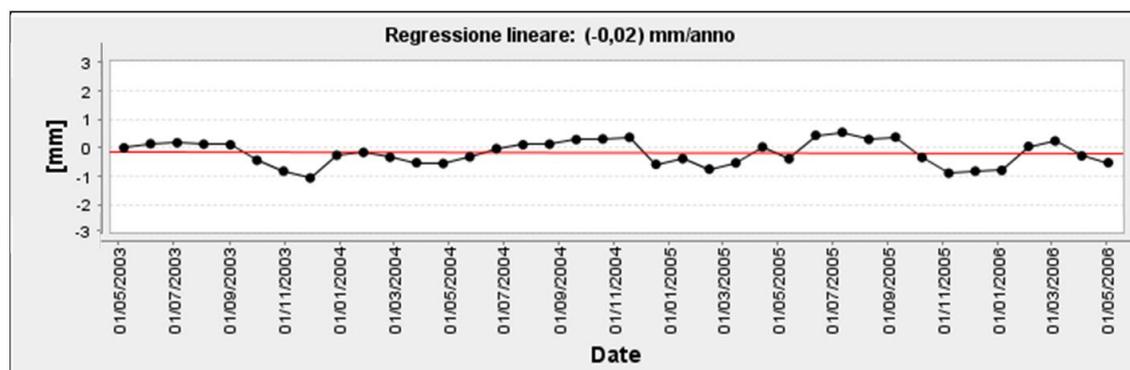


Fig. 5 Esempio di serie storica con valori di regressione lineare nulla.

Per individuare eventuali correlazioni tra le deformazioni del suolo e l'attività di stoccaggio, viene pertanto eseguito un confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Settala (Fig. 6) e le serie storiche di alcuni punti rappresentativi posti sia all'interno che all'esterno della proiezione in superficie dell'area originariamente mineralizzata.

La curva cumulativa del gas movimentato è stata ottenuta riportando, mese per mese, i volumi di gas iniettati ed erogati e calcolando la sommatoria cumulativa del bilancio dei volumi a fine mese; in questo modo è stato possibile comparare analiticamente le misure di spostamento verticale dei punti e i volumi di gas erogati o immessi nel giacimento.

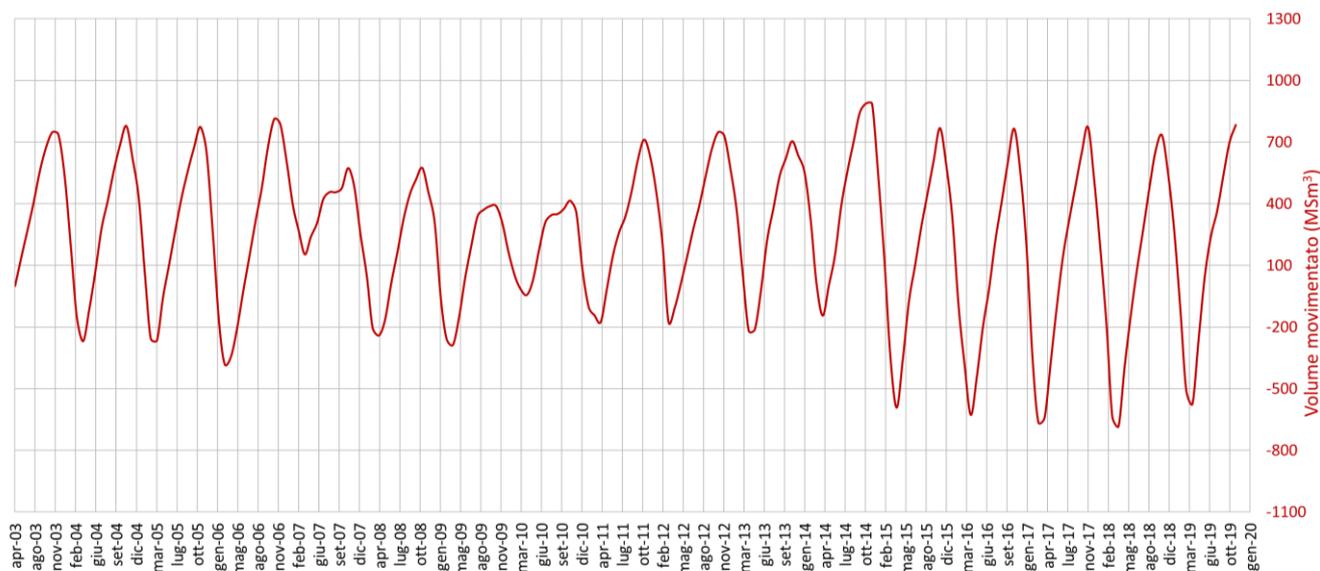


Fig. 6 Curva cumulativa di stoccaggio del campo di Settala (volumi in Milioni di Standard m³ o MSm³).

Ampiezza media della stagionalità

Al fine di evidenziare più facilmente la presenza di deformazioni cicliche riconducibili all'attività di stoccaggio, per ogni punto di misura individuato nelle analisi in singola geometria, così come per il dato scomposto, è fornito anche il valore di ampiezza media della stagionalità, calcolato sull'intera serie storica di deformazione.

Tale valore fornisce un'indicazione dell'ampiezza media nell'intero periodo considerato, pertanto consente solo di individuare i PS che presentano un'evidente oscillazione stagionale, in genere concentrati entro i limiti del giacimento. Informazioni dettagliate sull'andamento delle deformazioni si possono ricavare esclusivamente dall'analisi delle singole serie storiche di deformazione.

3. Analisi del campo di Settala

Per il monitoraggio del campo di Settala, Stogit effettua un'analisi PSP-IFSAR™ di tipo Local con estensione di circa 75 km² e di tipo Regional estesa all'intera area urbana di Milano (circa 900 km²) che comprende al suo interno le singole analisi Local di Brugherio e di Settala (Fig. 7).

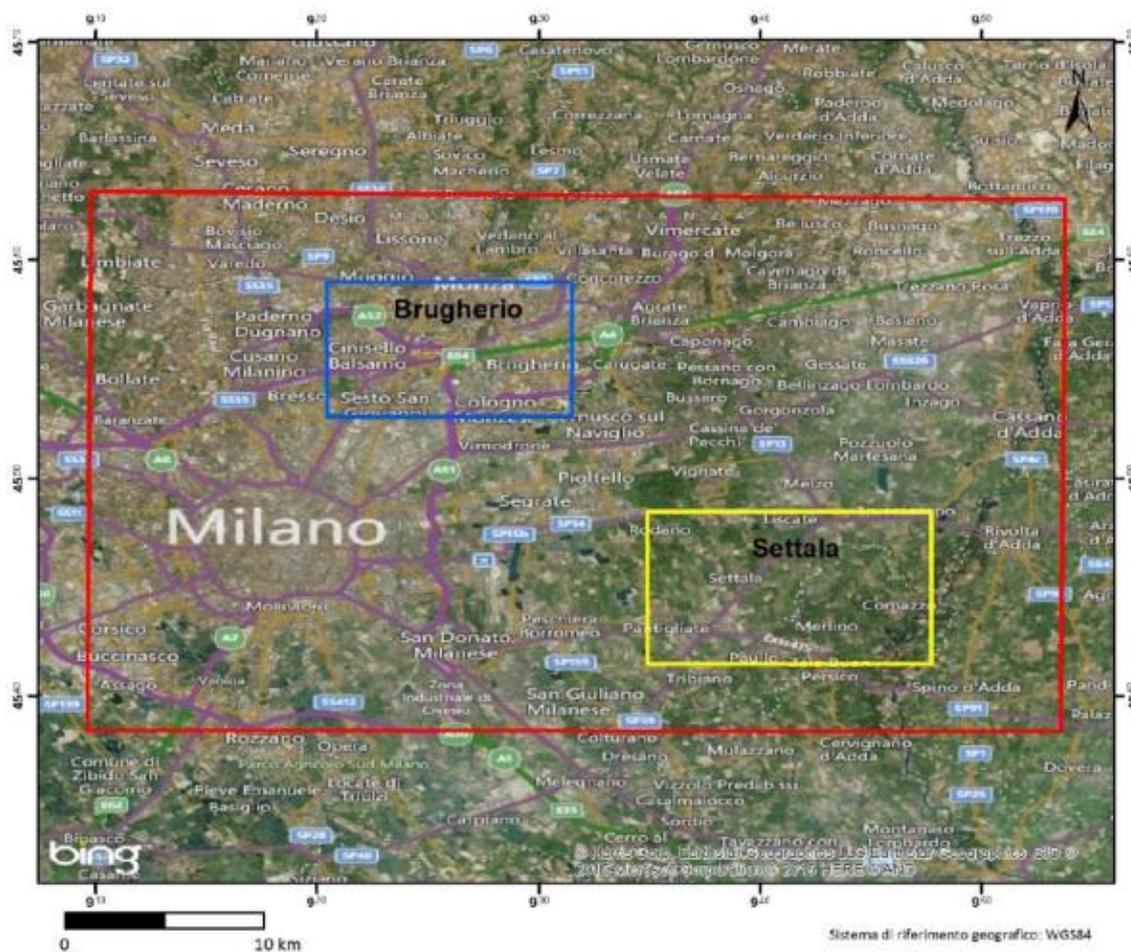


Fig. 7 Estensione dell'area Regional di Milano rispetto alle due aree Local di Brugherio e Settala.

L'analisi ha previsto l'elaborazione di due dataset di immagini acquisite dai satelliti Radarsat-1 e Radarsat-2, sia in geometria ascendente che discendente, nel periodo compreso tra Ottobre 2003 e Novembre 2019. In particolare, per l'elaborazione ascendente sono state processate le immagini Radarsat-1 disponibili fino alla dismissione del satellite (ultima immagine ascendente 26/03/2013) insieme ad ulteriori 94 immagini Radarsat-2. Per l'elaborazione discendente sono state processate le immagini Radarsat-1 disponibili fino alla dismissione del satellite (ultima immagine discendente 10/02/2013) insieme ad ulteriori 119 immagini Radarsat-2.

Nel presente rapporto sono stati analizzati anche i risultati dell'elaborazione delle immagini acquisite dal satellite Sentinel-1 nel periodo compreso tra Marzo 2015 e Ottobre 2019, sia in

geometria ascendente che discendente. In Tab. 1 è riportato il dettaglio dei dataset, con il numero totale di immagini elaborate ed i relativi periodi di acquisizione: essi si presentano ben strutturati e quindi affidabili per una corretta analisi e interpretazione dei risultati.

Parziali lacune interessano il dataset Radarsat-1 nell'area lombarda, in particolare negli anni 2008 e 2009 per la geometria ascendente, a causa delle difficoltà riscontrate dal nuovo contrattista nel recupero di alcune immagini storiche.

	Geometria	Track	N° immagini	Periodo
Radarsat 1-2	Ascendente	147-66	194	09/10/2003-09/10/2019
Radarsat 1-2	Discendente	197-116	228	13/10/2003-13/10/2019
Sentinel 1	Ascendente	15	208	23/03/2015-28/10/2019
Sentinel 1	Discendente	168	214	22/03/2015-27/10/2019

Tab. 1 Dataset elaborati per il presente aggiornamento.

3.1. Analisi del dato Radarsat 1 – Radarsat 2

Di seguito vengono illustrati i risultati dell'analisi del dato Radarsat sia in termini di velocità media di spostamento dei PS, con particolare riferimento alla componente verticale, sia in merito all'andamento delle serie storiche dei punti scomposti. I valori di velocità verticale dei PS Regional sono stati dapprima calibrati con i valori di velocità verticale assoluti di una stazione GPS pubblica di riferimento, esterna all'area del giacimento e sicuramente non influenzata dallo stoccaggio.

3.1.1. Analisi del dato GPS

Ai fini della calibrazione, fino al 2013 venivano acquistati da ERSAF (Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e Foreste della Regione Lombardia) i dati relativi a due stazioni GNSS appartenenti alla rete presente sul territorio regionale lombardo, situate in prossimità di edifici pubblici nei centri urbani di Milano e Crema (Fig. 8). Tali stazioni sono state formalmente spente il 31 ottobre 2013 ma, a seguito di un accordo tra Regione Piemonte e Regione Lombardia, sono state riattivate e conglobate all'interno della Rete SPINN GNSS (Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia) a partire dal 1 luglio 2015. Non essendo state effettuate manutenzioni o sostituzioni delle antenne GNSS, è stato possibile ottenere un set di dati coerente e in continuità col pregresso, pur essendo caratterizzato dalla mancanza di circa un anno e mezzo di dati.

Il GPS di Milano, utilizzato per la calibrazione del dato Regional, è installato con monumentazione a palo presso il tetto del Politecnico di Milano (Fig. 9). Di tale CGPS sono stati stimati i movimenti di lungo periodo, dal 14/05/2005 al 31/10/2019, ed i dati sono stati analizzati nell'ambito di una rete di riferimento costituita da 9 stazioni IGS/EPN (Fig. 10). Il CGPS di Milano misura un valore medio di velocità assoluta pari a +0.84 mm/anno nella componente verticale.

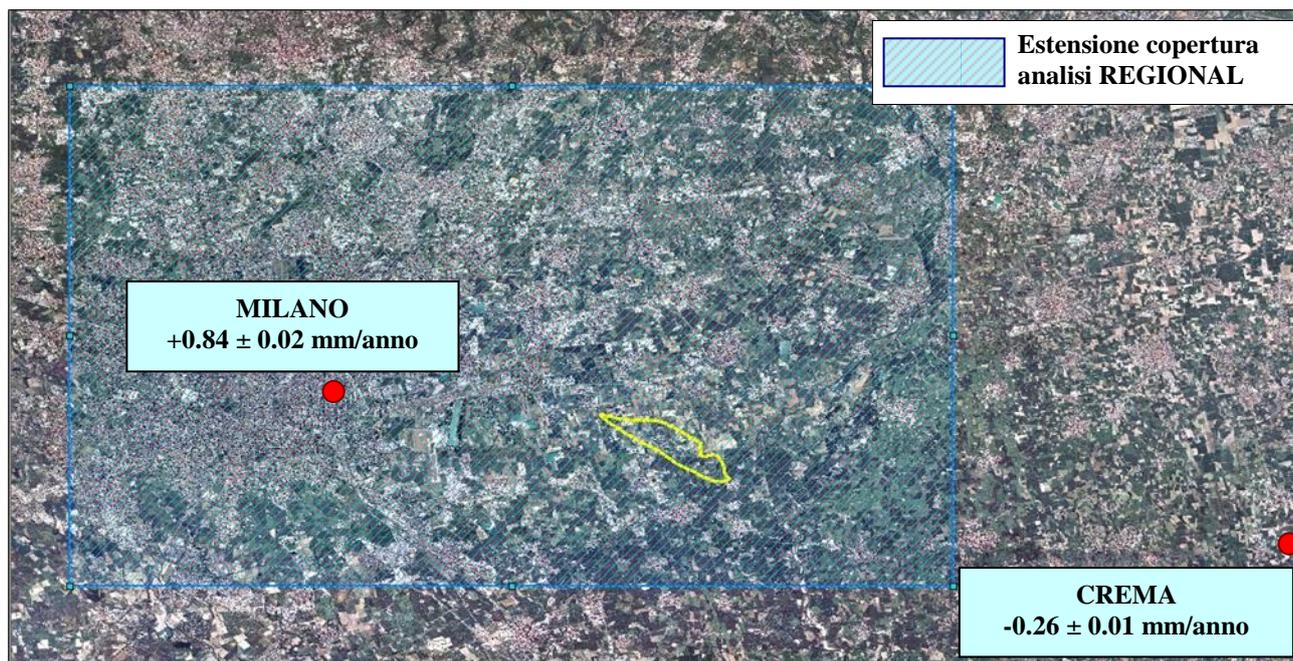


Fig. 8 Ubicazione GPS Milano e Crema ed estensione dell'analisi Regional (in giallo il campo di Settala).



Fig. 9 Ubicazione del GPS di Milano e particolare dell'antenna.

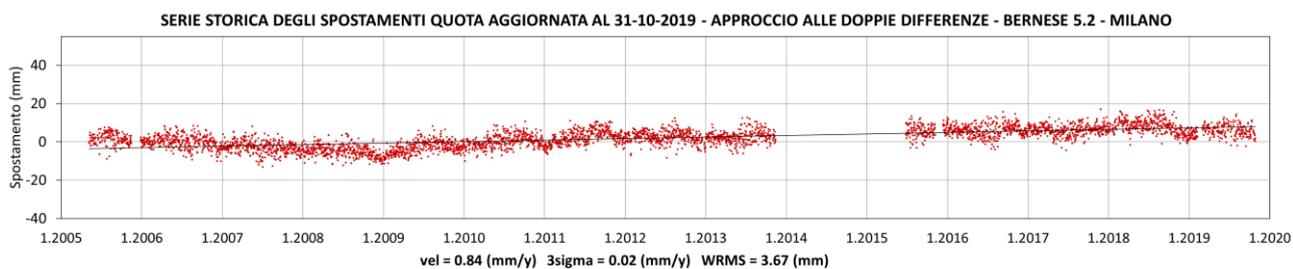


Fig. 10 Stima di velocità della componente verticale per il GPS di Milano.

3.1.2. Calibrazione del dato Regional con GPS di riferimento

Si può notare come l'intera area di Milano sia caratterizzata da una sostanziale stabilità (Fig. 11 e Fig. 12), con valori di velocità verticale quasi uniformemente positivi e mediamente compresi tra -1 e +1 mm/anno.

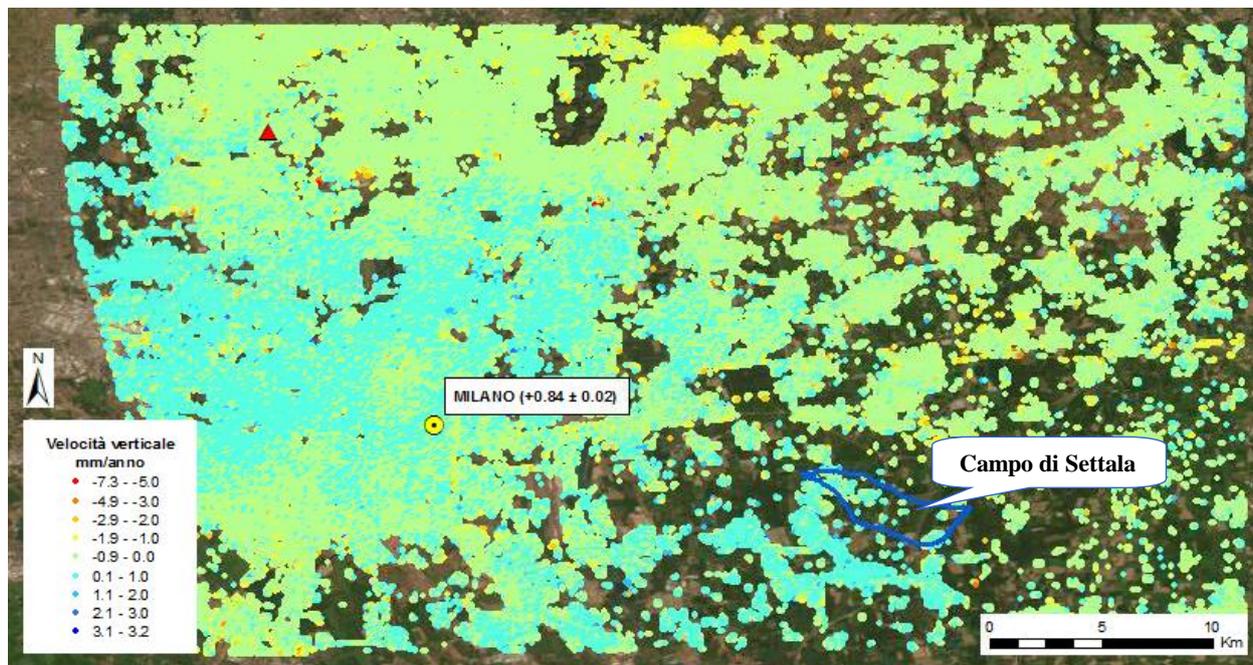


Fig. 11 Dati dell'analisi Regional in scala di colori. I valori si riferiscono al solo vettore verticale risultato dalla scomposizione dei dati originali. Il triangolo rosso indica la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione; in giallo il CGPS di Milano utilizzato per la calibrazione del dataset.

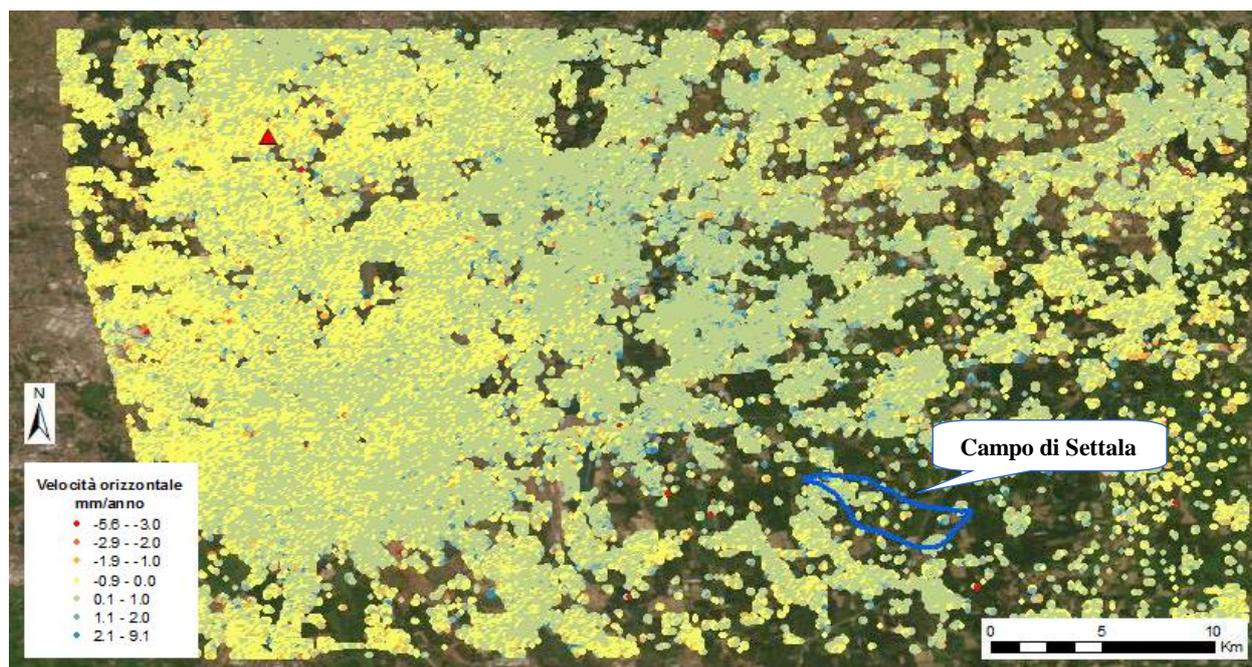


Fig. 12 Dati Regional scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento (triangolino rosso) e il limite del giacimento di Settala.

Il valore medio di velocità verticale dei PS Regional ricadenti in un'area di raggio pari a circa 200 m nell'intorno del CGPS di Milano è pari a $+0.11$ mm/anno.

Considerato che il CGPS di Milano misura un valore medio di velocità assoluta di $+0.84$ mm/anno nella componente verticale, la correzione da apportare ai valori scomposti Regional per riportarli al piano assoluto rilevato dal CGPS risulta essere di $+0.73$ mm/anno (Fig. 13). Tale metodologia, già elaborata nelle precedenti relazioni, consente di calibrare il dato Regional (originariamente relativo al punto di riferimento utilizzato per la scomposizione) riportandolo ad un piano assoluto.

Il dataset di velocità verticale dell'analisi Regional di Milano calibrato con il CGPS di riferimento è riportato in Fig. 14.



Fig. 13 Punti scomposti dell'analisi Regional: in giallo i valori originali e in rosa quelli calibrati.

L'analisi a scala regionale, effettuata considerando la media dei valori calibrati di velocità verticale dei PS Regional ubicati entro l'area definita dalla proiezione in superficie del limite del giacimento, ha permesso di evidenziare le variazioni altimetriche medie dell'area del giacimento rispetto al trend regionale individuato dalla stazione GPS. L'analisi evidenzia una velocità verticale media all'interno dei limiti del giacimento pari a $+0.67$ mm/anno, coerente con quanto evidenziato dal CGPS di Milano ed in linea con il report precedente. L'attività di stoccaggio non influenza il trend di velocità media dei punti interni al giacimento, che risulta assolutamente in continuità con le aree circostanti.

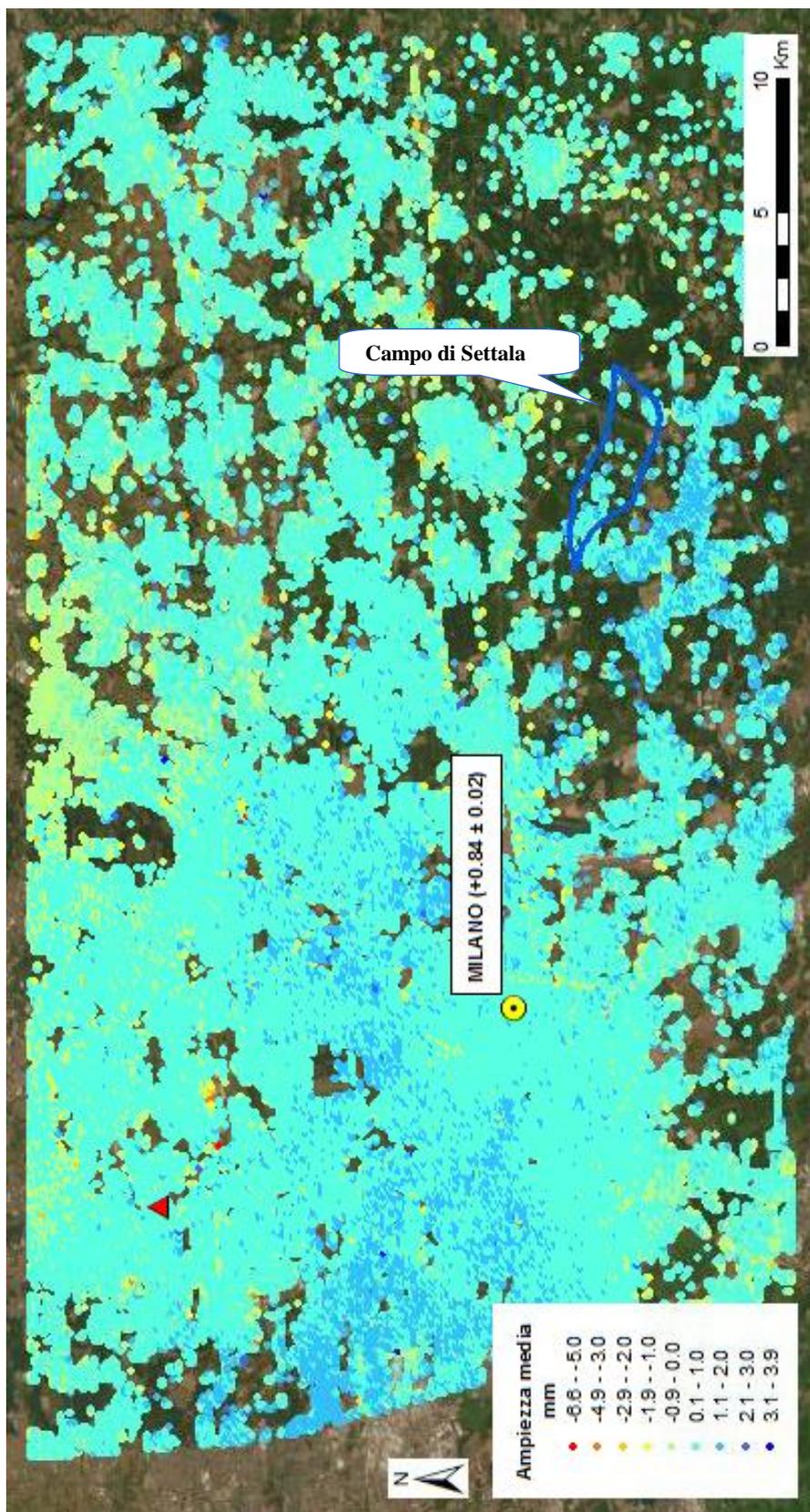


Fig. 14 Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati. In evidenza l'ubicazione del CGPS usato per la calibrazione, il punto di riferimento (triangolino rosso) e il limite del giacimento di Settala.

3.1.3. Calibrazione del dato Local con il dato Regional

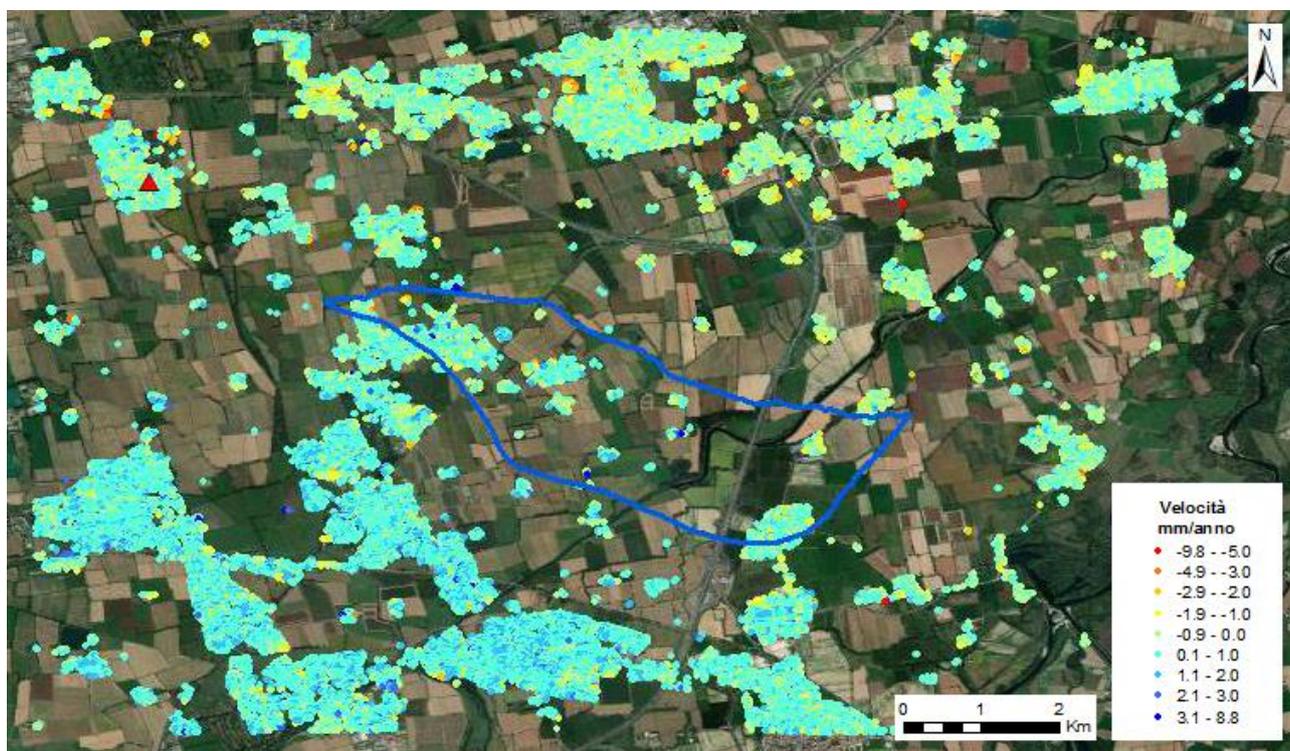
Il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del moto, al quale è assegnata velocità pari a zero, è stato mantenuto distante dalla zona di influenza del giacimento in modo da apprezzare in maniera oggettiva le eventuali anomalie deformative. Come si nota dalle Fig. 15, Fig. 16 e Fig. 17, i valori di velocità dell'area studiata presentano una sostanziale stabilità ed uniformità, sia all'esterno che all'interno dell'area occupata dal giacimento.

I valori di velocità verticale dei PS Local presenti in ogni singola cella dell'analisi si possono correlare ai dati ottenuti dalla scomposizione dei dati dell'analisi Regional, che sono stati a loro volta calibrati con il dato del CGPS di Milano. Per ottenere un'uniformità di valori si è deciso di integrare le due differenti analisi, considerando attendibile il dataset dello studio Regional calibrato per mezzo del valore del CGPS di Milano.

Il valore medio di velocità verticale dei punti dell'analisi Regional calibrati ricadenti in un'area di circa 200 m attorno al PS di riferimento dell'analisi Local (punto supposto per convenzione con velocità pari a zero), risulta essere di circa +0.63 mm/anno (Fig. 18). Per effettuare l'integrazione tra le due analisi, tale valore medio di velocità è stato sommato a tutti i PS dell'analisi Local, in modo da riportarli ad un piano assoluto (Fig. 19).

L'analisi a scala locale, eseguita considerando la media dei valori calibrati di velocità verticale dei PS Local entro l'area definita dai limiti del giacimento, ha evidenziato velocità verticali medie di +0.73 mm/anno, perfettamente in linea con l'analisi a scala regionale. Tale valore è in accordo con la velocità di deformazione registrata dal CGPS di Milano e con la distribuzione media delle velocità verticali dell'intera area, e risulta altresì coerente con quanto misurato nel corso degli anni precedenti, a dimostrazione della qualità dei dati SAR e CGPS utilizzati. L'analisi evidenzia inoltre che l'attività di stoccaggio non influenza il trend di velocità media dei punti interni al giacimento, che risulta assolutamente in continuità con le aree circostanti (Fig. 20).

L'osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali (Fig. 21) evidenzia anch'essa una sostanziale stabilità dell'area, se analizzata sull'intero periodo.



Satellite info

Satellite	Wavelength	Satellite geometry	Sensor mode	Satellite track
RSAT	5.66 cm	ASCENDING	S3	147
RSAT2	5.55 cm	ASCENDING	S3	66

Acquisition geometry

Line of sight angle	θ :	31.64°	δ :	11.52°		
Line of sight versors	V:	0.851	N:	-0.105	E:	-0.514

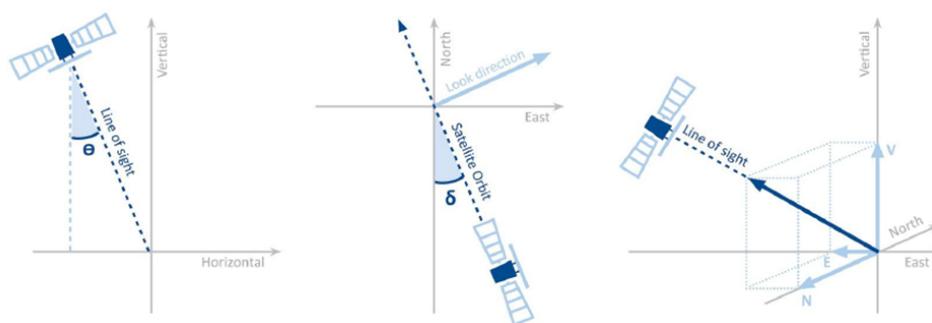
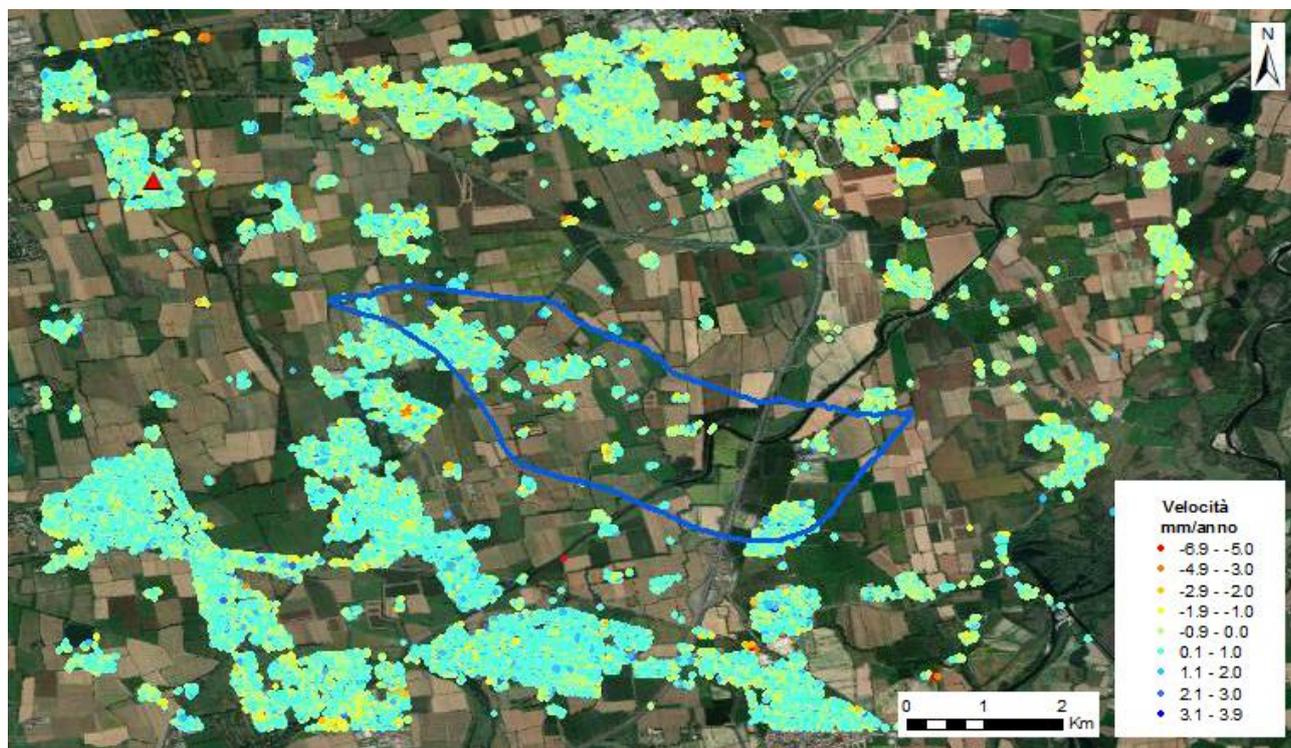


Fig. 15 Visualizzazione in scala di colori delle velocità dell'analisi Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



Satellite info

Satellite	Wavelength	Satellite geometry	Sensor mode	Satellite track
RSAT	5.66 cm	DESCENDING	S3	197
RSAT2	5.55 cm	DESCENDING	S3	116

Acquisition geometry

Line of sight angle	θ : 34.91°	δ : 10.52°		
Line of sight versors	V: 0.82	N: -0.105	E: 0.563	

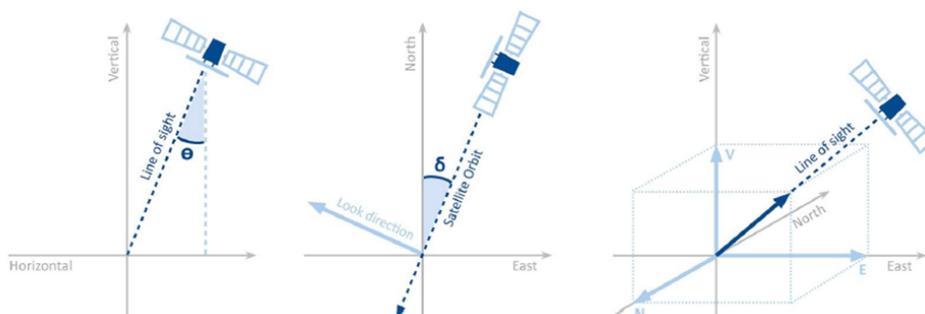


Fig. 16 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità discendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.

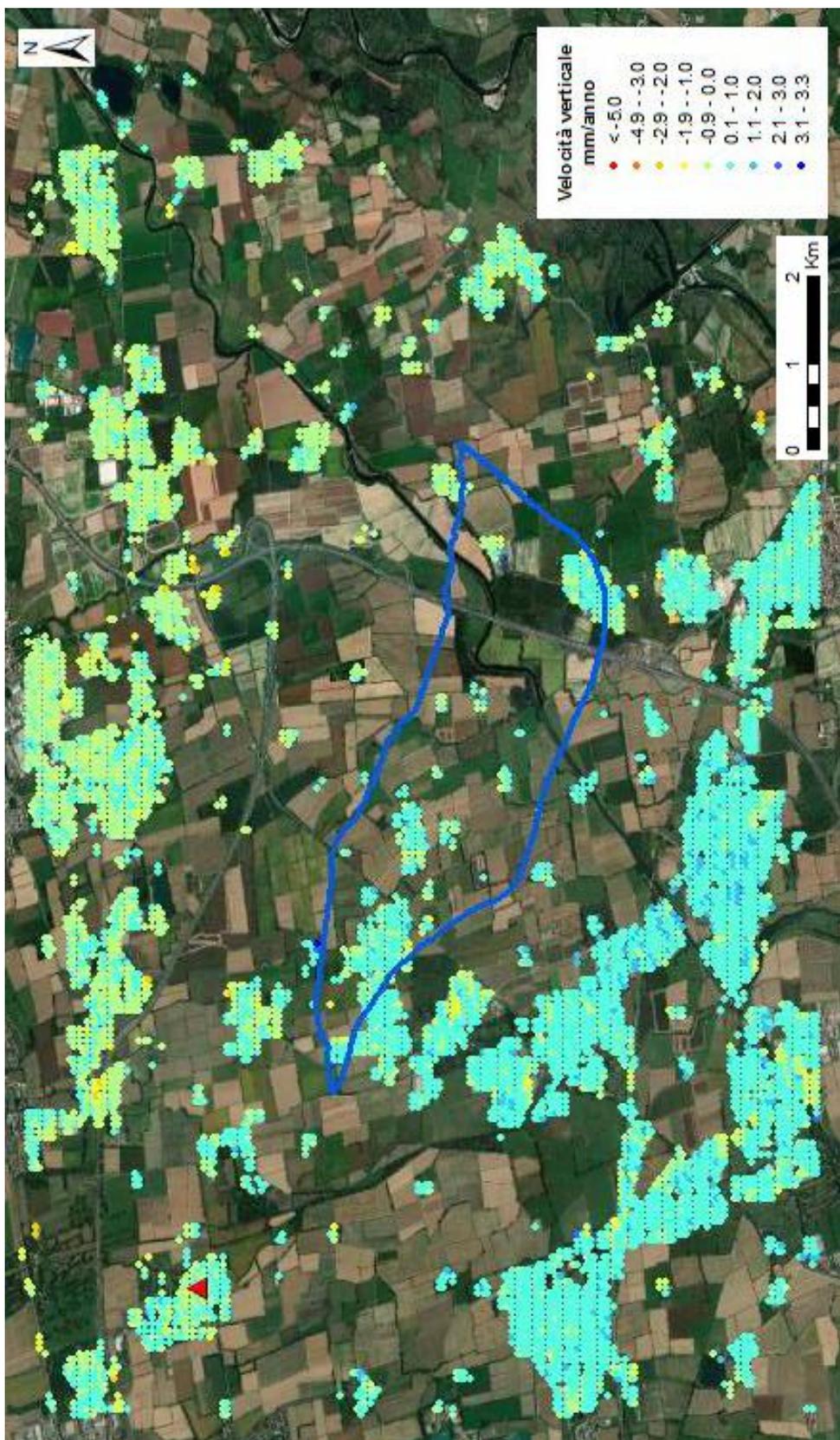


Fig. 17 Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti dell'analisi Local così come registrati dal satellite prima della calibrazione. Il triangolino rosso rappresenta il punto di riferimento.



Fig. 18 Visualizzazione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione Local (triangolo rosso) ed indicazione dei punti Regional più vicini con i rispettivi valori di velocità calibrati. L'area per la quale è stata calcolata la media delle velocità verticali è delimitata da un cerchio avente un raggio di circa 200 metri.



Fig. 19 Dati Local scomposti: in bianco i valori originali ed in verde quelli corretti di +0.63 mm/anno.

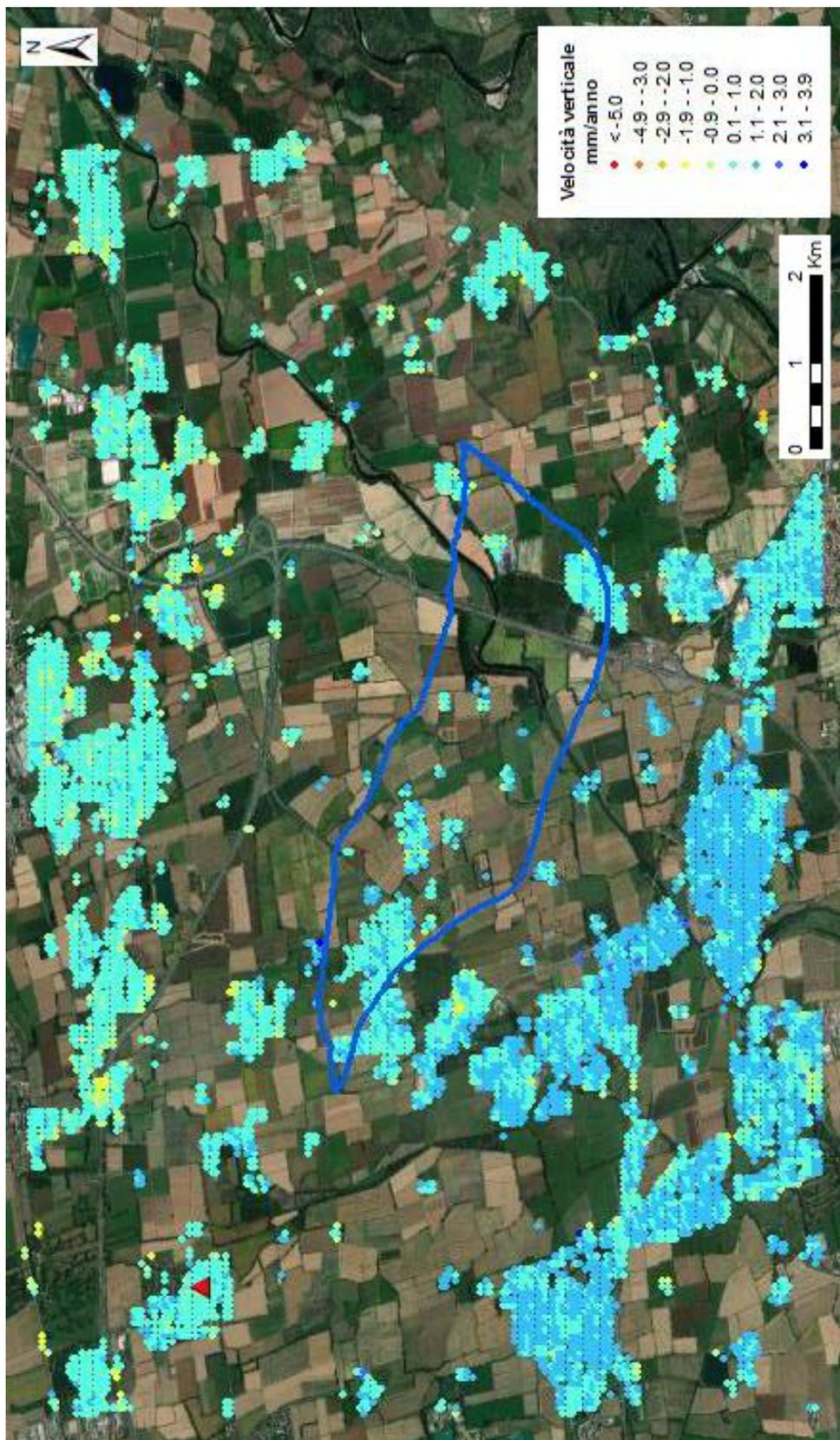


Fig. 20 Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti dell'analisi Local dopo la variazione di $+0.63$ mm/anno effettuata sull'intero dataset. Il triangolo rosso indica la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità.

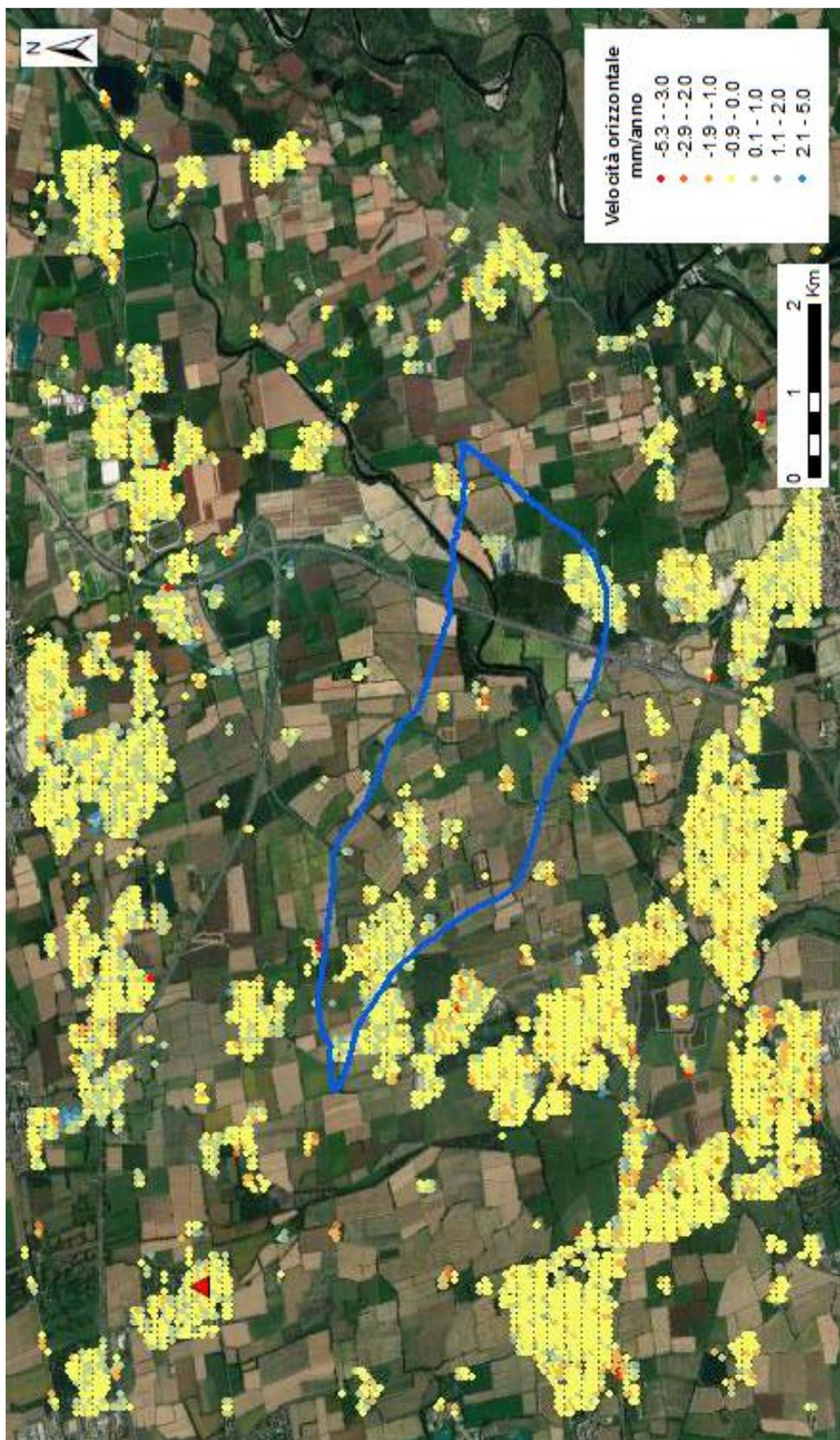


Fig. 21 Visualizzazione in scala di colori delle velocità orizzontali dei punti scomposti dell'analisi Local. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento.

3.1.4. Analisi delle serie storiche dei punti scomposti

L'andamento delle deformazioni cicliche legate all'attività di stoccaggio presenta una distribuzione diversa a seconda che si osservi la componente verticale o la componente orizzontale del moto dei PS. Come si nota nella Fig. 22, che mostra i valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale dei PS, l'oscillazione presenta un picco massimo al centro del giacimento e si attenua lateralmente fino a scomparire in prossimità del limite del giacimento. Nel caso specifico di Settala, si nota come l'effetto dello stoccaggio in superficie diminuisca gradualmente di entità verso sud fino a scomparire ad una distanza di circa 1,5 km dal limite del giacimento, mentre verso nord si interrompe immediatamente in prossimità del limite del giacimento. Tale effetto è riconducibile all'asimmetria del giacimento stesso, che presenta un assetto geologico con rapida chiusura del reservoir verso nord e progressivo ispessimento verso sud, con conseguente riverbero sul baricentro teorico delle deformazioni superficiali associate. La distribuzione dei valori di ampiezza media della stagionalità per la componente orizzontale dei PS (Fig. 23), evidenzia invece la presenza di due picchi localizzati lateralmente rispetto al picco di ampiezza della componente verticale, in linea con quanto atteso nel caso di fenomeni deformativi ciclici.

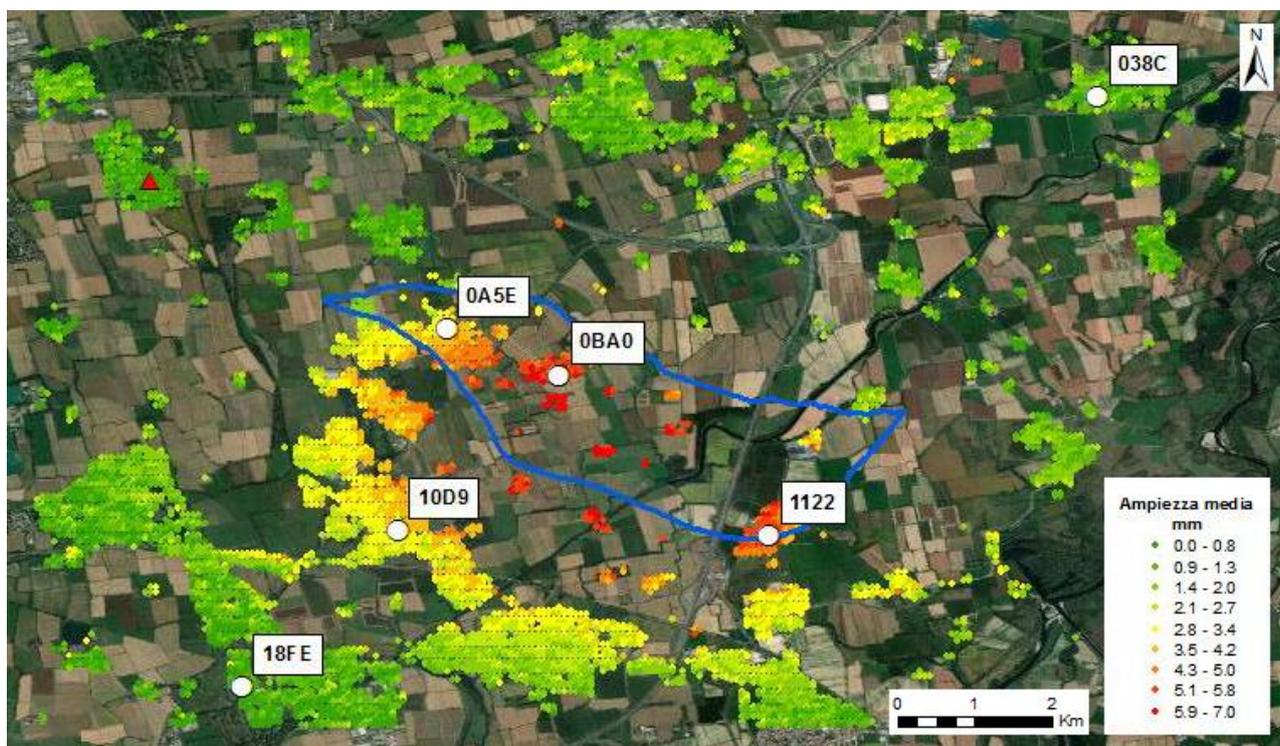


Fig. 22 Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente verticale dei PS Local e ubicazione dei 6 punti scelti rispetto alla proiezione in superficie del limite del giacimento.

Al fine di verificare l'esistenza di eventuali correlazioni tra i fenomeni deformativi superficiali e l'attività di stoccaggio esercitata nel sito in esame, sono state analizzate le serie storiche relative a 6 punti scelti come rappresentativi, la cui ubicazione è riportata in Fig. 22. Dei 6 punti individuati, 3

ricadono entro l'area del giacimento in prossimità del top strutturale, mentre gli altri 3 punti sono ubicati all'esterno del limite del giacimento; dei due punti ubicati a sud, uno si trova in prossimità del giacimento nell'area che risente ancora dell'effetto dello stoccaggio, mentre l'altro si trova ad una distanza in cui tale effetto si è esaurito.

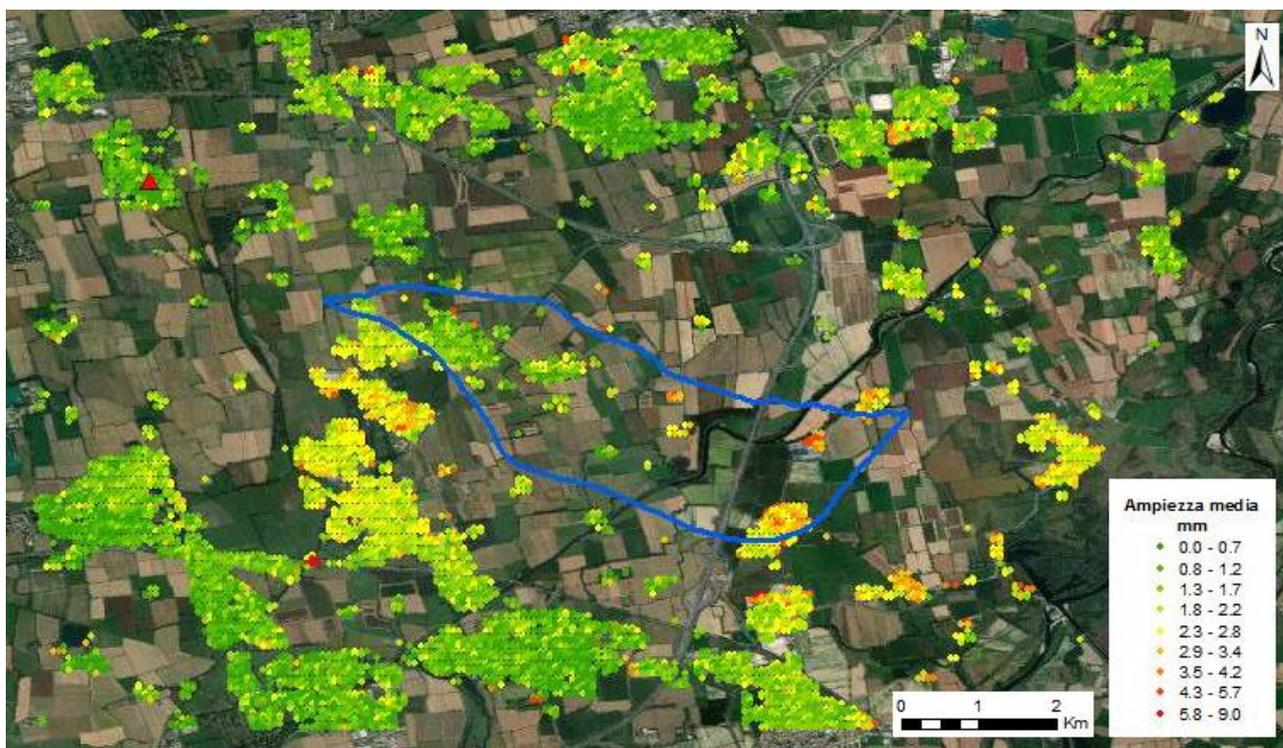


Fig. 23 Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente orizzontale dei PS Local.

Le serie storiche da analizzare sono state scelte sulla base degli "indici di precisione" definiti nel Par. 2.2. Sono stati scelti punti affidabili con bassi valori di deviazione standard e buona coerenza temporale, andando ad analizzare, ove possibile, PS ubicati nella stessa posizione di quelli scelti nei report precedenti. Nelle pagine successive (da Fig. 24 a Fig. 29) è mostrato l'andamento delle serie storiche scomposte dei 6 punti individuati (ottenuti sempre da griglia regolare, risoluzione 50x50 m), ed il relativo confronto con la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Settala, ottenuta riportando, mese per mese, i volumi di gas iniettati ed erogati e calcolando la sommatoria cumulativa del bilancio dei volumi a fine mese. In questo modo è stato possibile comparare analiticamente le misure di spostamento dei punti e i volumi di gas erogati o immessi nel giacimento.

Nel periodo 2012-2014 le serie storiche dei punti scelti risentono dell'effetto della procedura di stitching effettuata con tecnologia PSP-DIFSAR™. Inoltre, nel 2008-2009 è presente una lacuna di immagini nel dataset Radarsat-1 ascendente e l'andamento della serie storiche in quel periodo non è pertanto da riferire ad un reale movimento del suolo: le valutazioni relative a tale periodo sono comunque disponibili nei report degli anni precedenti e non evidenziano anomalie.

Punto interno – 0A5E

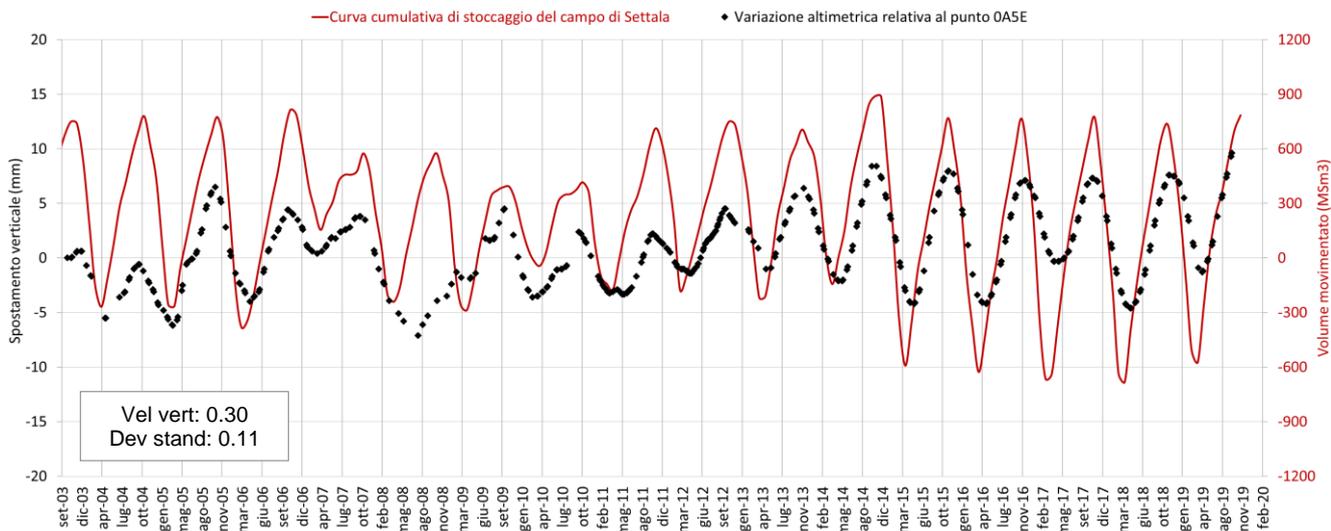


Fig. 24 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 0A5E e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto interno – 0BA0

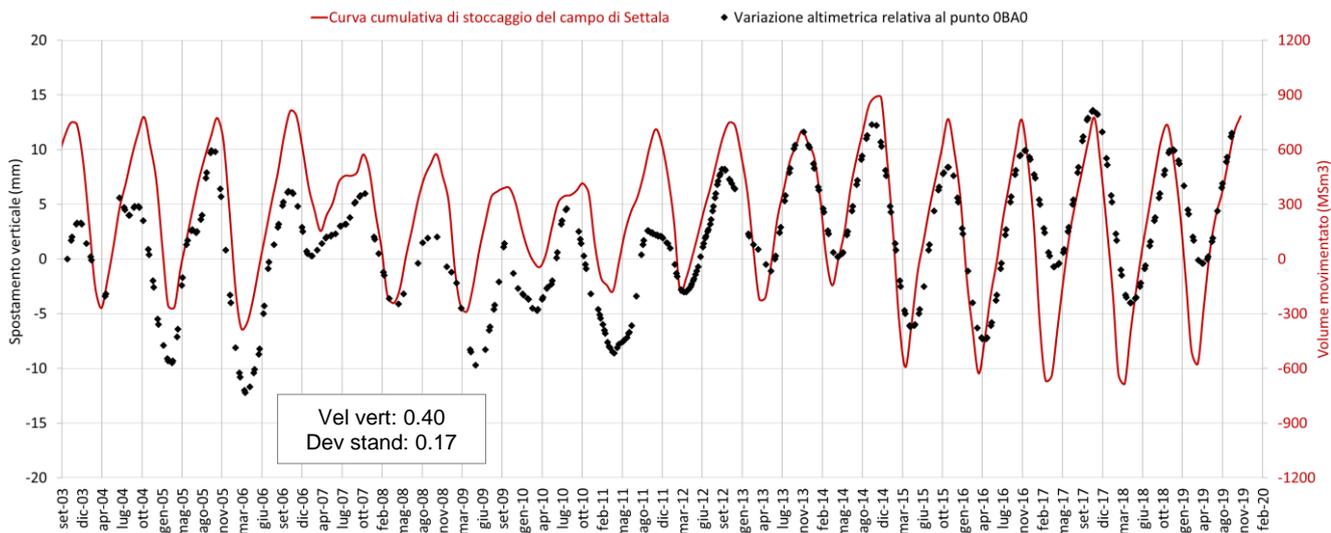


Fig. 25 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 0BA0 e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto interno – 1122

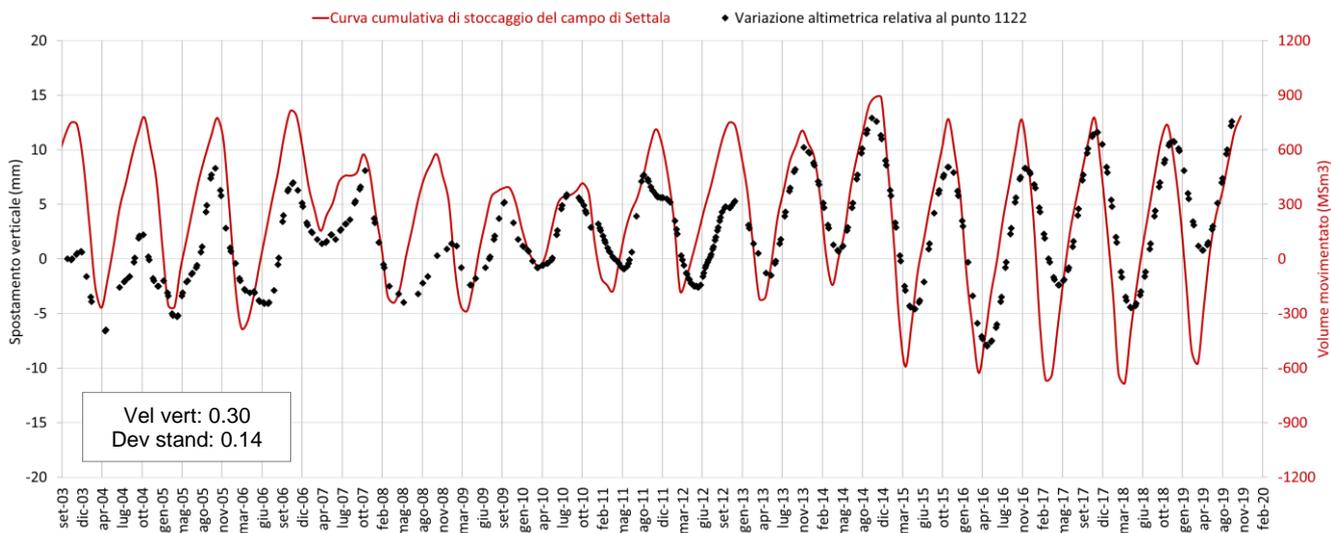


Fig. 26 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 1122 e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto esterno – 10D9

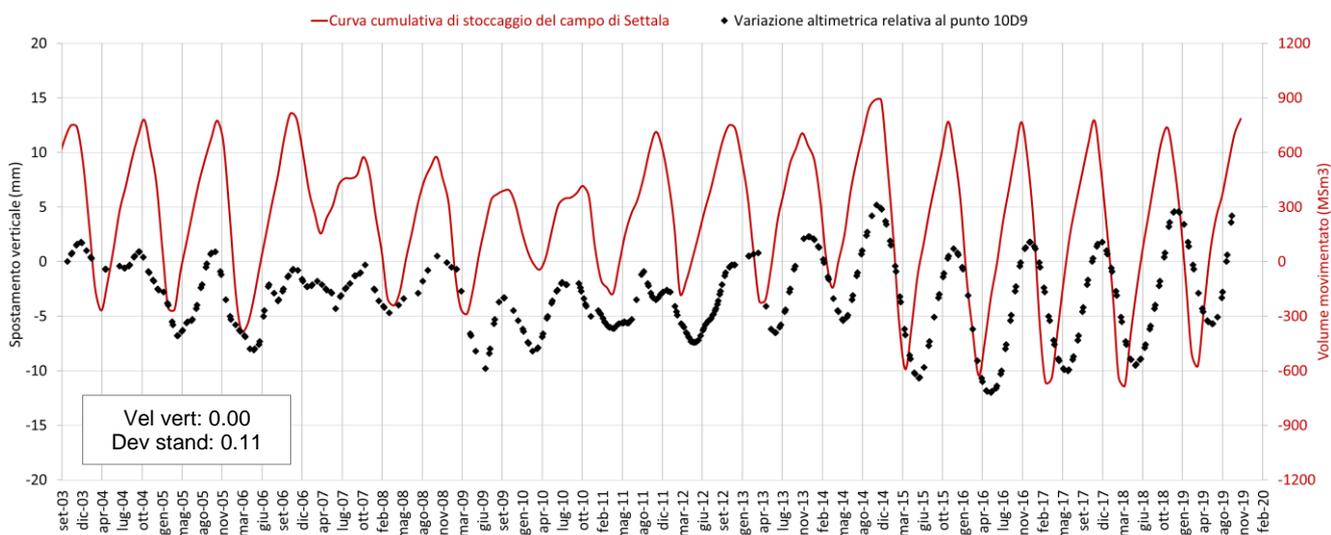


Fig. 27 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 10D9 e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto esterno – 18FE

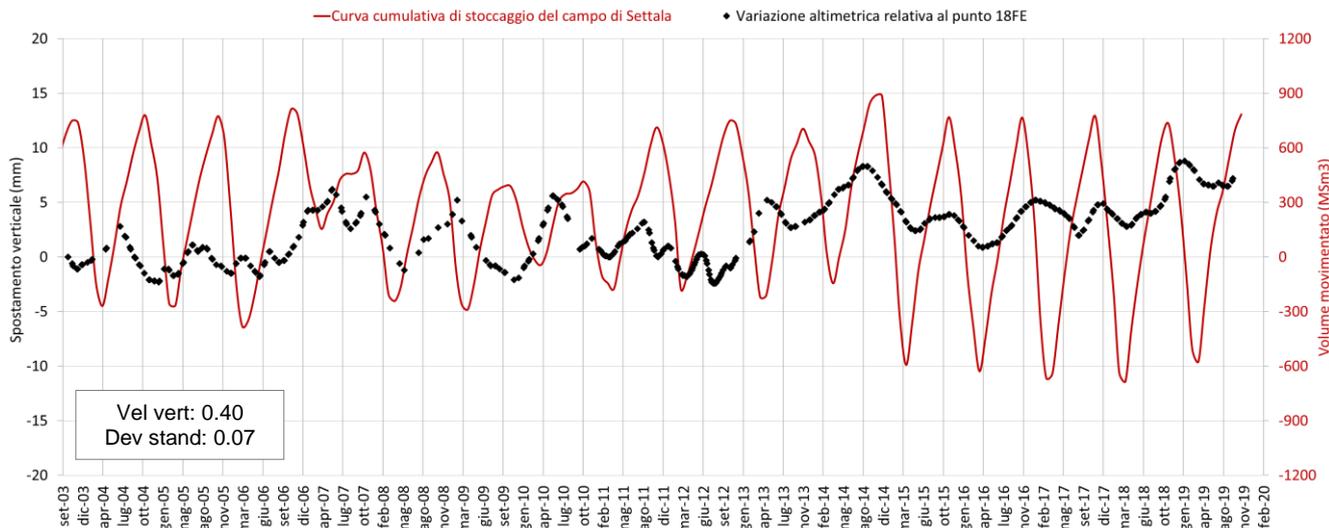


Fig. 28 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 18FE e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto esterno – 038C

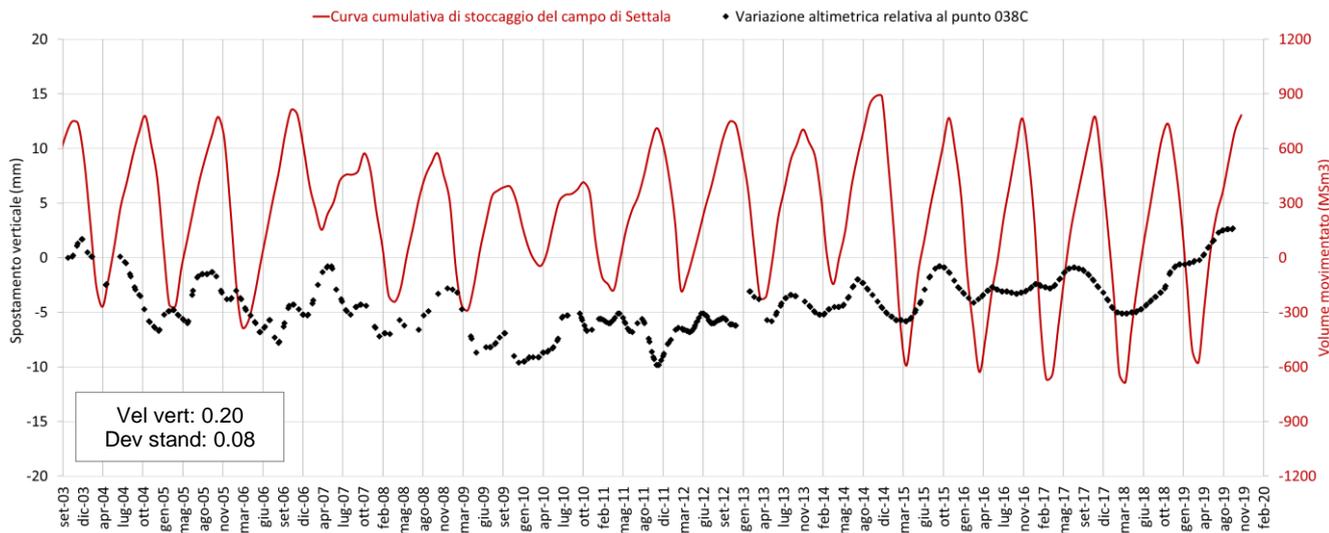


Fig. 29 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 038C e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

L'analisi mostra un'elevata correlazione tra le variazioni altimetriche dei punti scelti all'interno del limite del giacimento e la curva cumulativa di stoccaggio, con shift temporali di circa 30 giorni. Tutti i 3 punti interni presentano elevate periodicità e oscillazioni che si attestano mediamente tra 10 e 20 millimetri (Fig. 30). In particolare, i punti interni 0BA0 (ubicato entro la centrale di stoccaggio in corrispondenza del culmine della struttura) e 1122 sono quelli che risentono maggiormente delle attività di stoccaggio e presentano la miglior correlazione con la curva del gas movimentato. Tale correlazione non viene riscontrata per i punti esterni, dove le deformazioni verticali analizzate non sono associabili all'attività di stoccaggio, ad eccezione del punto 10D9, prossimo al limite sud del giacimento, in cui l'effetto dello stoccaggio in superficie è ancora visibile (Fig. 31).

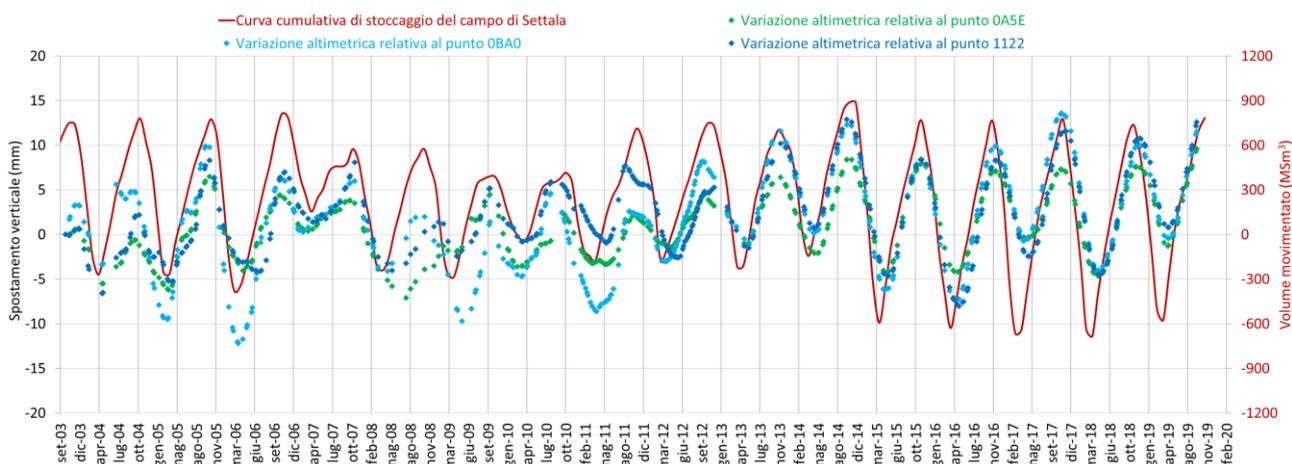


Fig. 30 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti interni.

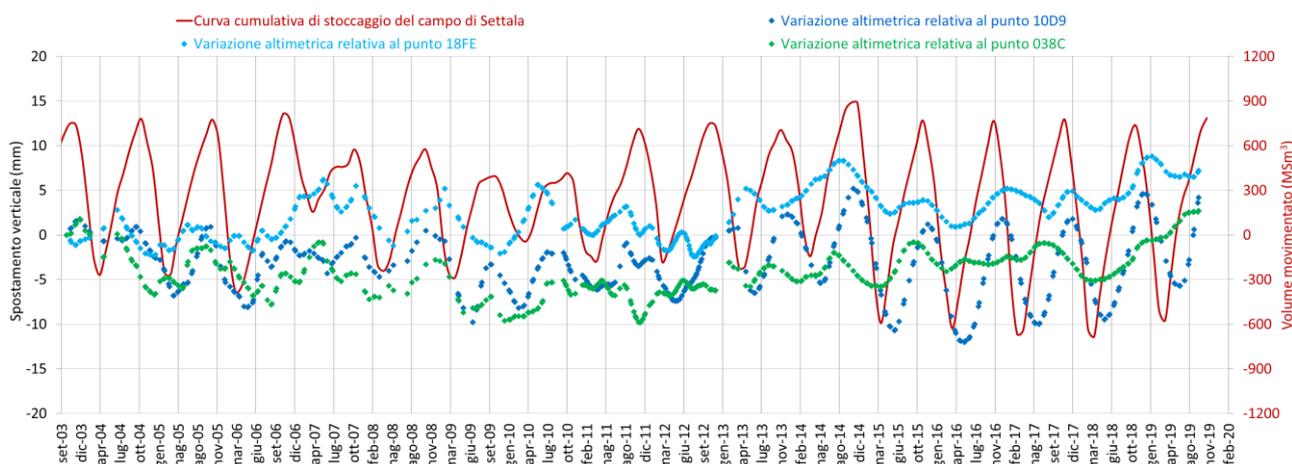


Fig. 31 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti esterni.

3.2. Analisi del dato Sentinel 1

Di seguito vengono illustrati i risultati dell'analisi del dato Sentinel ed il relativo confronto con i risultati ottenuti con il dato Radarsat sia in termini di velocità media di spostamento dei PS, con particolare riferimento alla componente verticale, sia in merito all'andamento delle serie storiche dei punti scomposti.

3.2.1. Analisi dei valori di velocità media

Il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del moto, al quale è assegnata velocità pari a zero, è stato mantenuto anche in questo caso distante dalla zona di influenza del giacimento ma in prossimità del punto di riferimento dell'analisi Radarsat, per eseguire un più preciso confronto tra le misure ottenute con i due satelliti.

I valori di velocità media calcolati con Radarsat e Sentinel si riferiscono a periodi temporali diversi, ma forniscono risultati coerenti (Fig. 32 e Fig. 33). In accordo con quanto misurato con Radarsat, la distribuzione dei valori di velocità verticale ottenuta con il dato Sentinel (Fig. 34) evidenzia come i valori di velocità dell'area presentano una sostanziale stabilità ed uniformità, sia all'esterno che all'interno dell'area occupata dal giacimento.

Le differenze tra i valori medi di velocità misurati con i due satelliti sono dovute al diverso intervallo temporale analizzato. L'analisi Sentinel infatti fornisce informazioni dettagliate in merito alla storia recente dell'area (ultimi 4 anni), mentre l'analisi Radarsat fornisce un valore di velocità media calcolato su un intervallo di tempo più ampio (2003-2019). Inoltre, il dataset Sentinel non è stato sottoposto a calibrazione.

Sentinel fornisce inoltre informazioni su infrastrutture di recente costruzione come la TEEM, che non è visibile nel dataset Radarsat perché presente solo negli ultimi anni del periodo monitorato: le aree interessate dal tracciato della TEEM sono caratterizzate da un lieve trend di abbassamento, legato all'assestamento dell'infrastruttura. L'analisi a scala locale eseguita considerando la media dei valori di velocità verticale dei PS Local ricadenti entro il limite del giacimento evidenzia una velocità verticale media di +0.20 mm/anno, mentre l'osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali (Fig. 35) evidenzia una sostanziale stabilità dell'area.

Anche l'analisi Sentinel conferma che l'attività di stoccaggio non influenza il trend di velocità media dei punti interni al giacimento, che risulta assolutamente in continuità con le aree circostanti.

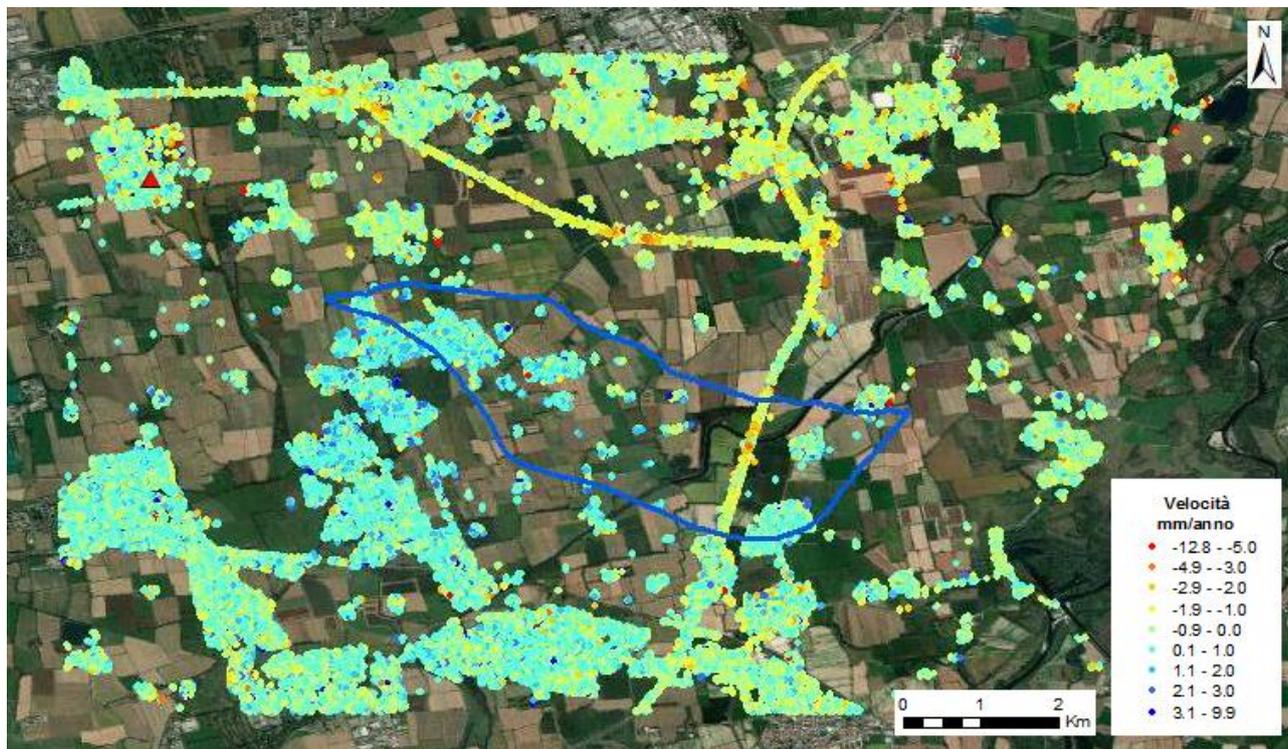


Fig. 32 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento.

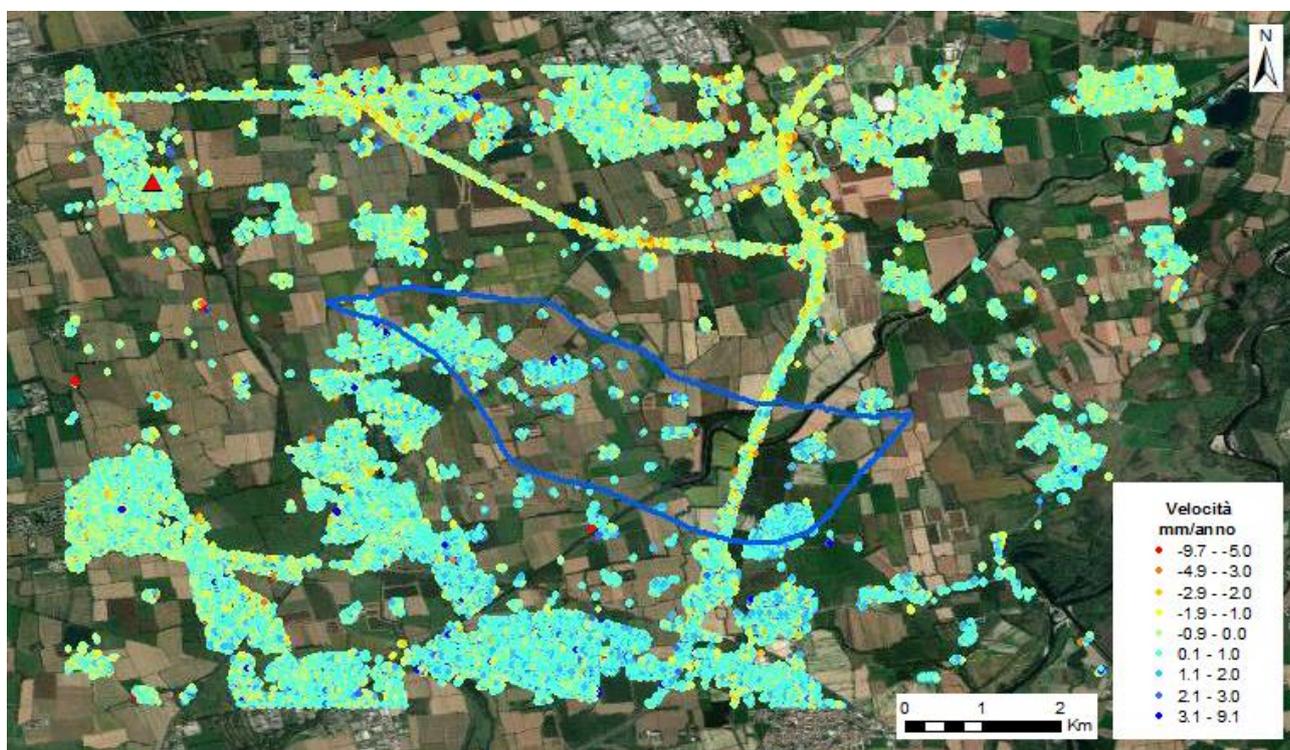


Fig. 33 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità discendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento.

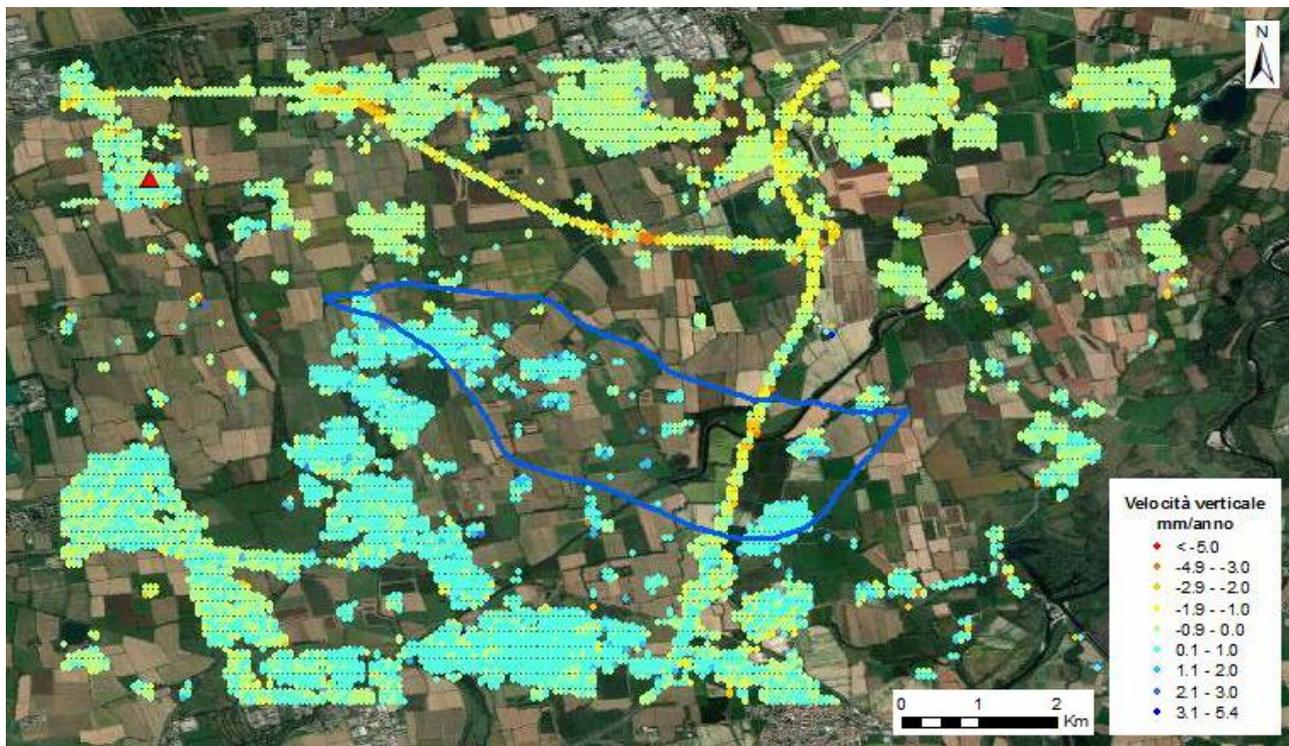


Fig. 34 Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti dell'analisi Local. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento

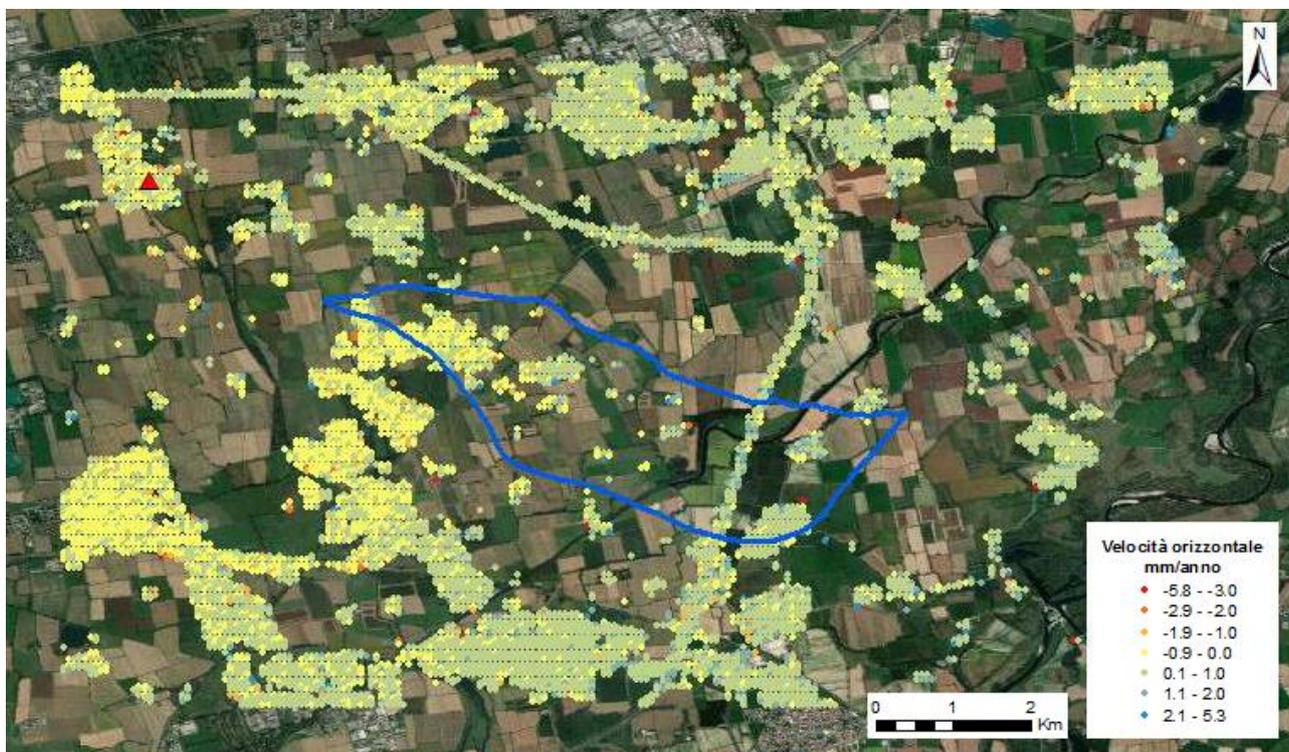


Fig. 35 Visualizzazione in scala di colori delle velocità orizzontali dei punti scomposti dell'analisi Local. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento.

3.2.2. Analisi delle serie storiche dei punti scomposti

Anche in termini di ampiezza media della stagionalità, i risultati Sentinel sono coerenti con il dato Radarsat, sia in termini di entità delle oscillazioni che di distribuzione spaziale delle deformazioni cicliche legate all'attività di stoccaggio (Fig. 36 e Fig. 37). Per l'analisi di correlazione con la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Settala, sono stati selezionati 6 punti del dataset Sentinel (3 punti interni e 3 punti esterni al giacimento) ubicati in corrispondenza dei punti scelti per l'analisi eseguita con il dato Radarsat, come illustrato in Fig. 36.

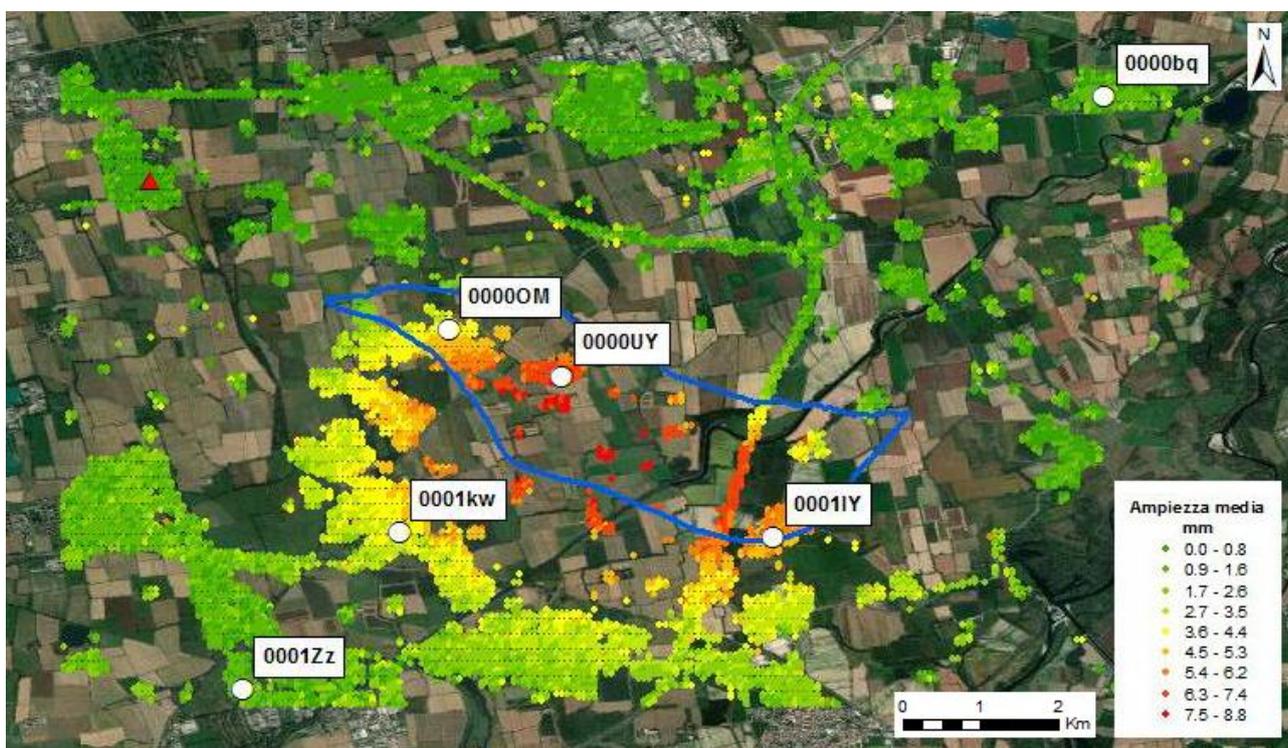


Fig. 36 Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente verticale dei PS Local e ubicazione dei 6 punti scelti rispetto alla proiezione in superficie del limite del giacimento.

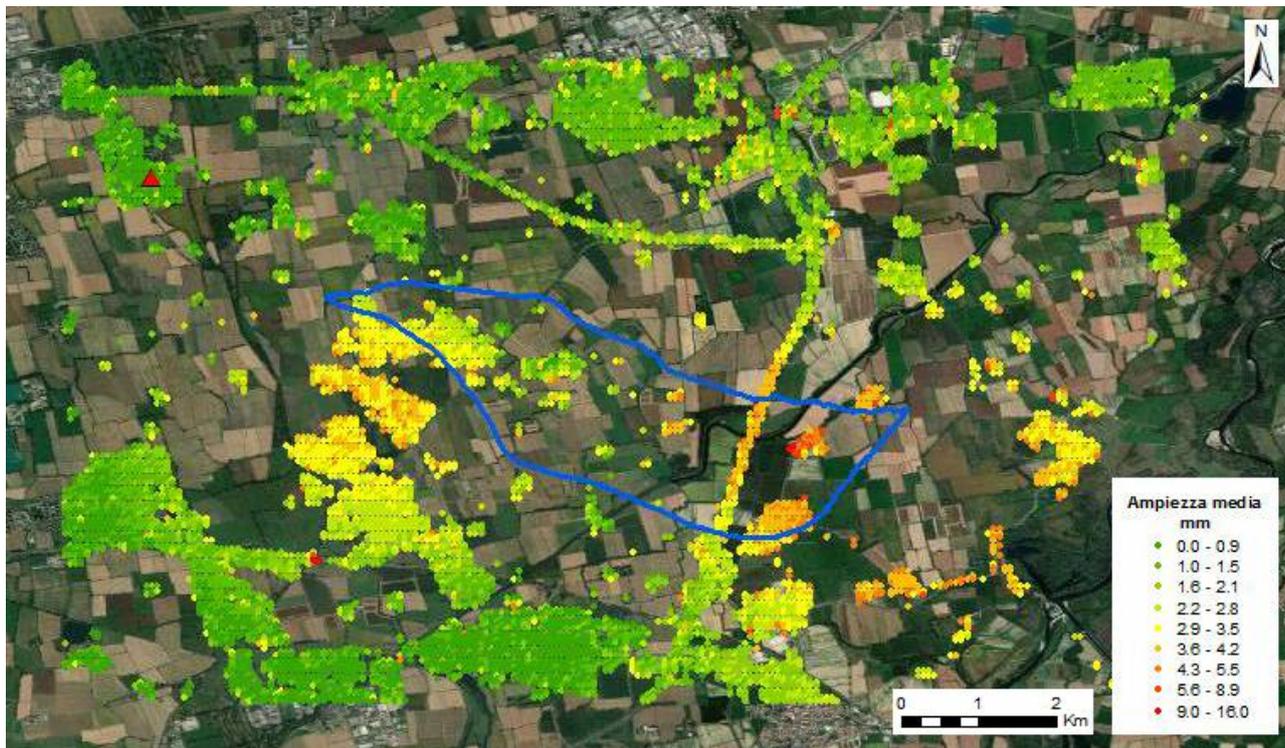


Fig. 37 Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente orizzontale dei PS Local.

Nelle figure seguenti (da Fig. 38 a Fig. 43) è mostrato l'andamento delle serie storiche scomposte dei 6 punti scelti del dataset Sentinel (in nero), ottenuti sempre da griglia regolare con risoluzione 50x50 m, ed il relativo confronto sia con la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Settala (in rosso) sia con i corrispondenti punti scelti per l'analisi Radarsat (in azzurro).

Punto interno – 0000OM

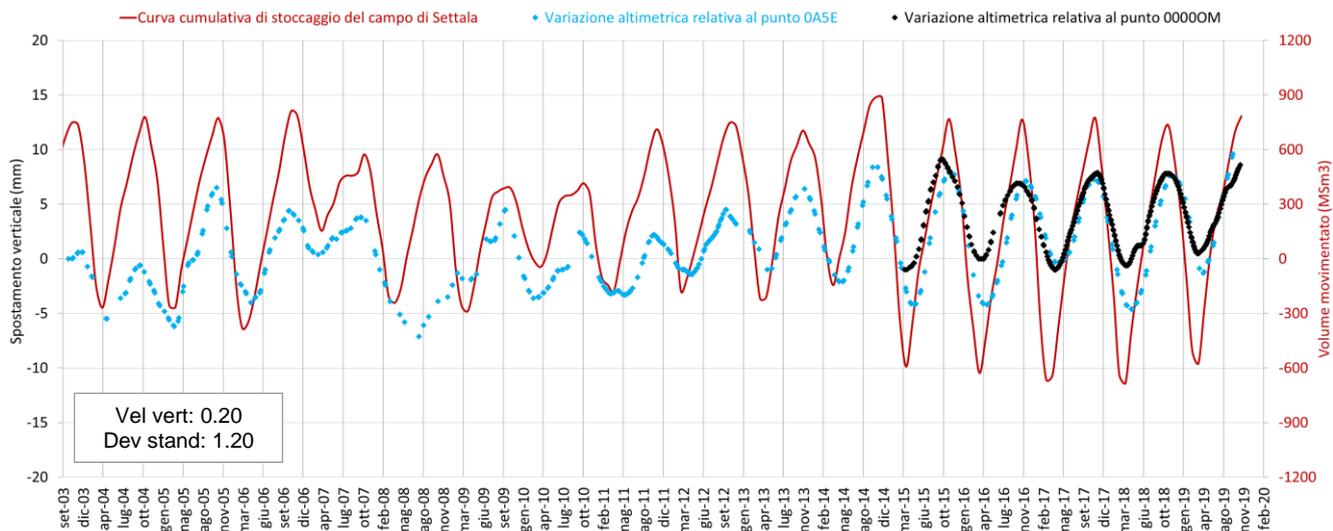


Fig. 38 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 0A5E (Radarsat) e 0000OM (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto interno – 0000UY

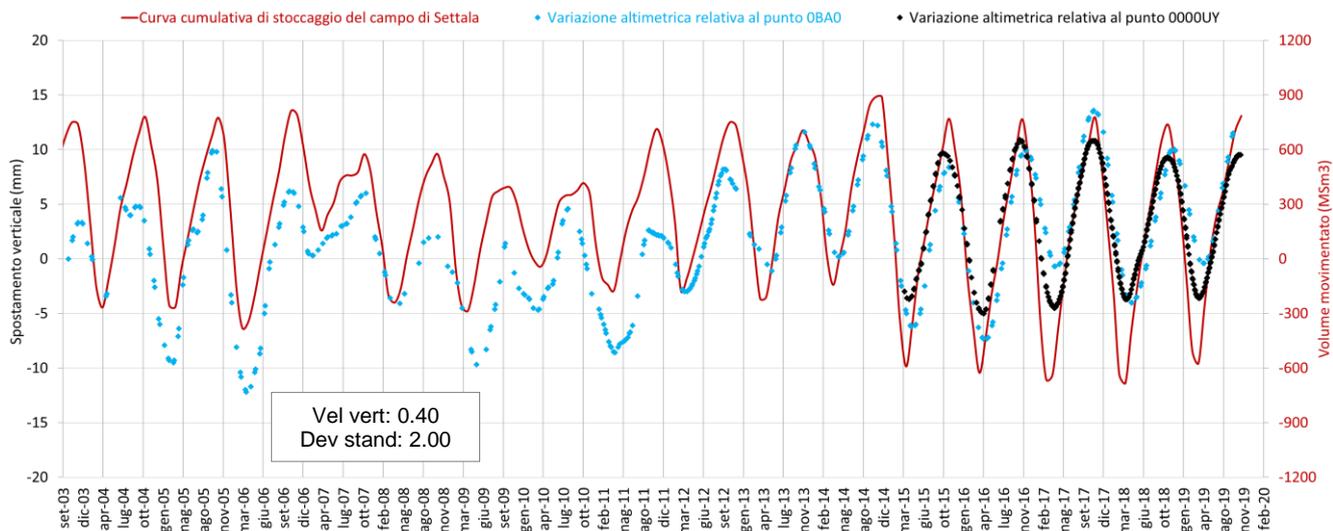


Fig. 39 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 0B1C (Radarsat) e 0000UY (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto interno – 0001IY

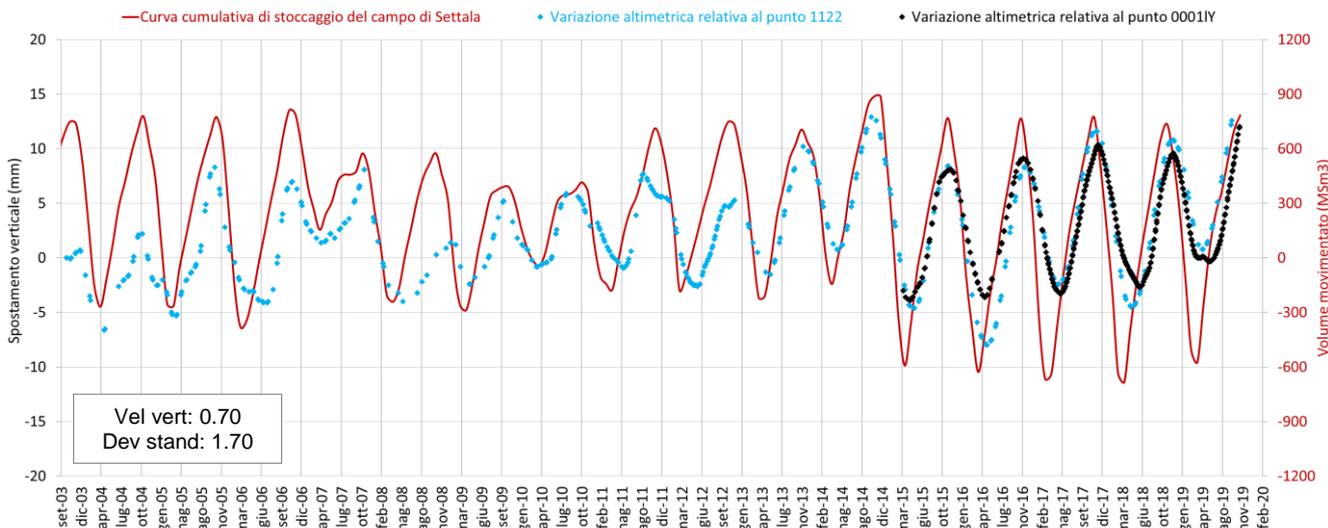


Fig. 40 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 1122 (Radarsat) e 0001IY (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto esterno – 0001kw

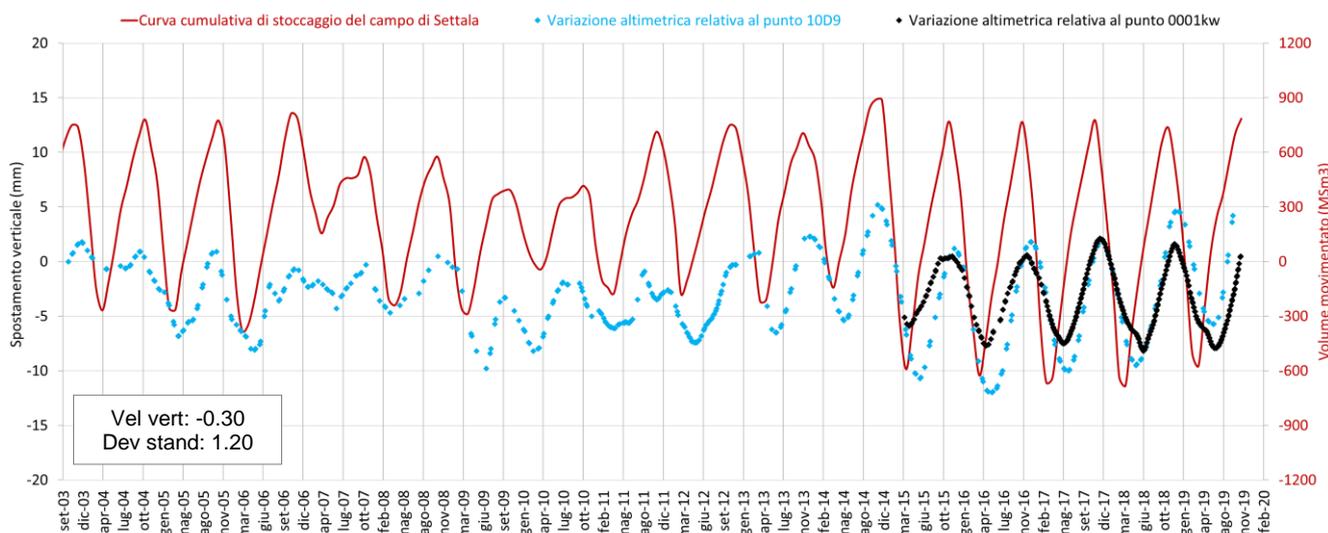


Fig. 41 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 10D9 (Radarsat) e 0001kw (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto esterno – 0001Zz

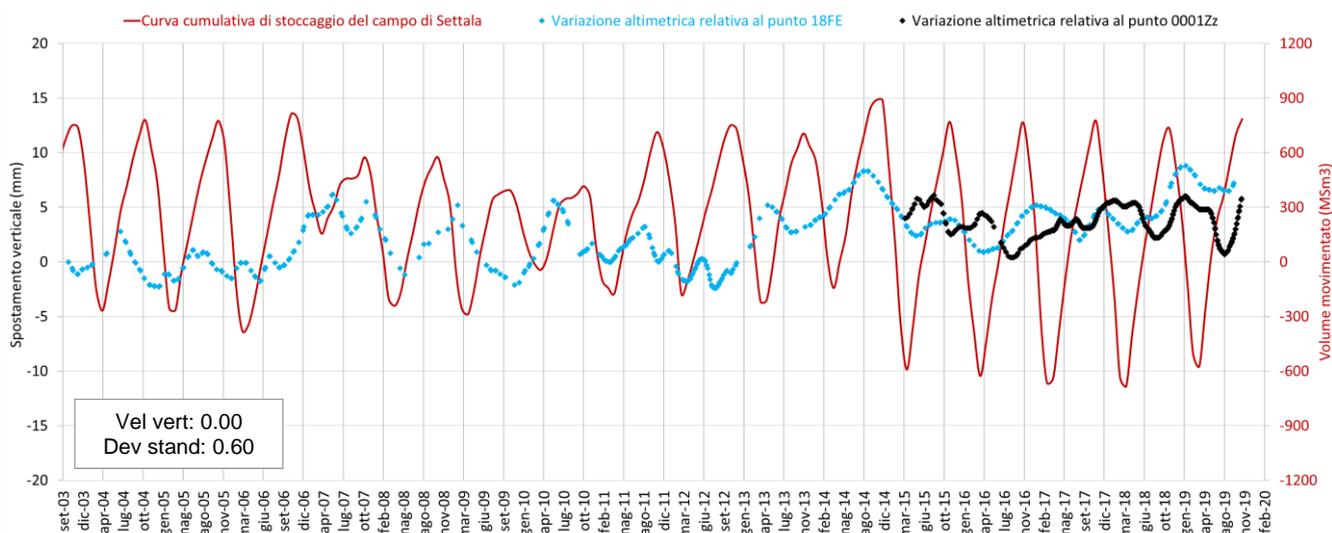


Fig. 42 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 18FE (Radarsat) e 0001Zz (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

Punto esterno al giacimento – 0000bq

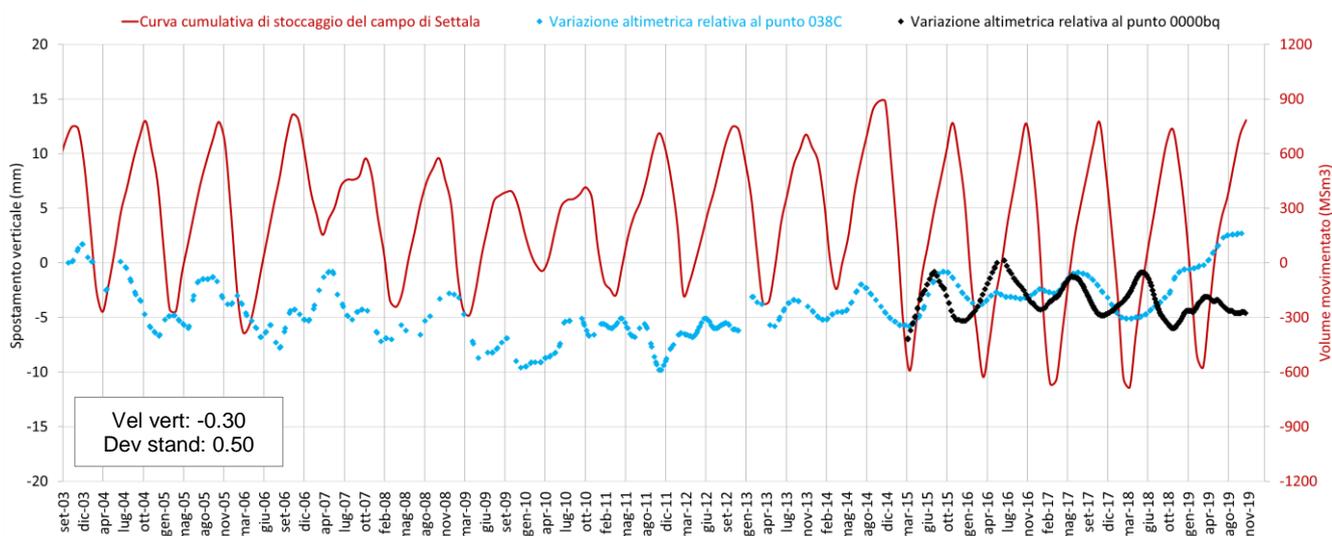


Fig. 43 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 018C (Radarsat) e 0000bq (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.

L'analisi dei punti scelti all'interno del limite del giacimento evidenzia un'elevata correlazione tra le variazioni altimetriche registrate dal dato Sentinel e la curva cumulativa di stoccaggio, con shift temporali di circa 30 giorni. Il dato è perfettamente in accordo con quanto registrato da Radarsat: tutti i punti interni presentano elevate periodicità e oscillazioni che si attestano mediamente tra 10 e 15 millimetri (Fig. 44).

Tale correlazione non viene riscontrata per i punti esterni, dove le deformazioni verticali analizzate non sono associabili all'attività di stoccaggio, ad eccezione del punto 0001kw, prossimo al limite sud del giacimento, in cui l'effetto dello stoccaggio in superficie è ancora visibile, in accordo con quanto evidenziato da Radarsat (Fig. 45).

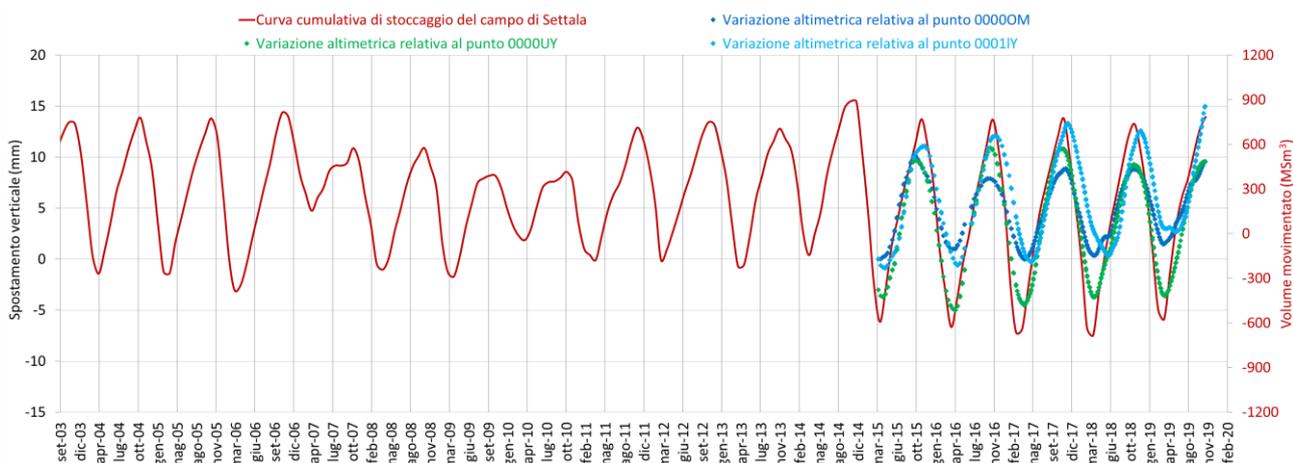


Fig. 44 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti interni.

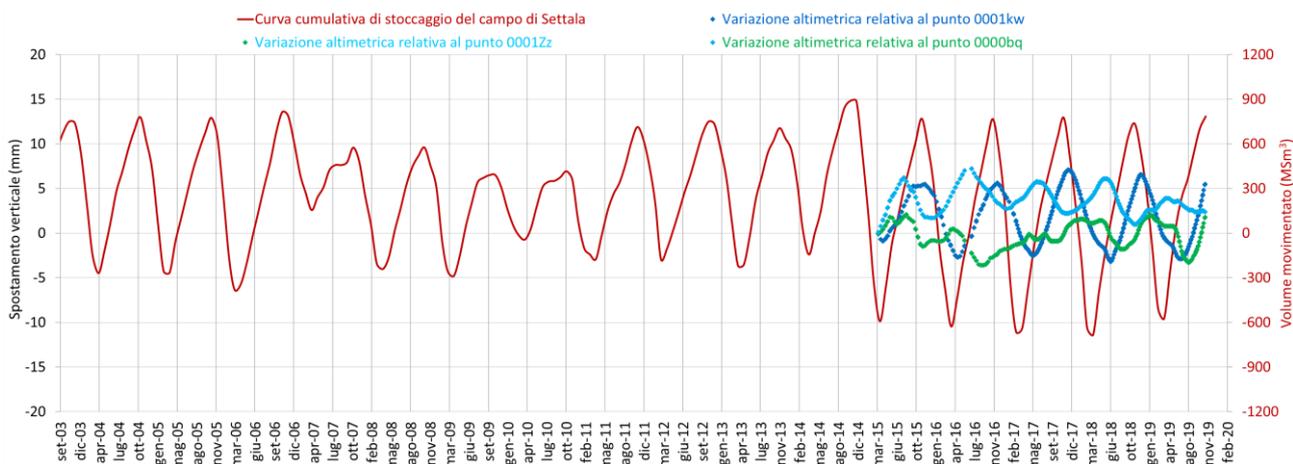


Fig. 45 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti esterni.

4. Conclusioni

Il dataset Radarsat, che consente di eseguire un monitoraggio pregresso fino al 2003, rappresenta sempre il principale di riferimento per l'analisi. È stato inoltre analizzato anche il dataset Sentinel, che fornisce informazioni dettagliate sugli ultimi 4 anni, per eseguire un confronto tra le misure ottenute tra i due satelliti.

Analisi Regionale

L'analisi a scala regionale effettuata sull'area di Milano evidenzia valori di velocità verticali quasi uniformemente positivi e mediamente compresi tra -1 e +1 mm/anno.

Andando ad evidenziare i soli punti situati entro i limiti definiti dalla proiezione in superficie del giacimento, risulta un valore medio di velocità verticale pari a +0.67 mm/anno. Tale range di valori viene confermato dalla stima delle velocità verticali assolute effettuate mediante il CGPS pubblico installato presso il Politecnico di Milano (+0.84 mm/anno). L'attività di stoccaggio non influenza il trend di velocità media dei punti interni al giacimento, che risulta assolutamente in continuità con le aree circostanti.

Analisi Local

L'analisi a scala locale effettuata sull'area occupata dal giacimento di Settala evidenzia valori medi di velocità verticale di +0.73 mm/anno. Tali valori risultano in linea con la velocità di deformazione registrata dal CGPS di Milano e con la distribuzione media delle velocità verticali dell'intera area. L'analisi evidenzia inoltre che l'attività di stoccaggio non influenza il trend di velocità media dei punti interni al giacimento, che risulta assolutamente in continuità con le aree circostanti.

L'osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali evidenzia anch'essa una sostanziale stabilità dell'area, se analizzata sull'intero periodo.

Analisi delle serie storiche

L'analisi delle serie storiche ha messo in evidenza, come da aspettative, una elevata correlazione tra le variazioni altimetriche dei punti scelti all'interno della proiezione in superficie del limite del giacimento e la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Settala. Tutti i 3 punti interni al limite del giacimento presentano elevate periodicità ed oscillazioni che si attestano mediamente tra i 10 e i 20 millimetri, con i punti 0BA0, ubicato entro la centrale di stoccaggio del gas, e 1122 che presentano la miglior correlazione con la curva del gas movimentato con shift temporali di circa 30 giorni.

Tale correlazione non viene riscontrata per i punti esterni, dove le deformazioni verticali analizzate non sono associabili all'attività di stoccaggio, ad eccezione del punto 10D9, ubicato nell'area



prossima al limite meridionale del giacimento in cui l'effetto dello stoccaggio in superficie è ancora visibile. Tale effetto diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi ad una distanza di circa 1,5 km dal limite del giacimento. Una tale particolare distribuzione delle deformazioni in superficie è riconducibile all'asimmetria del giacimento, che presenta un assetto geologico con rapida chiusura del reservoir verso nord e progressivo ispessimento verso sud, con conseguente riverbero sul baricentro teorico delle deformazioni superficiali associate.

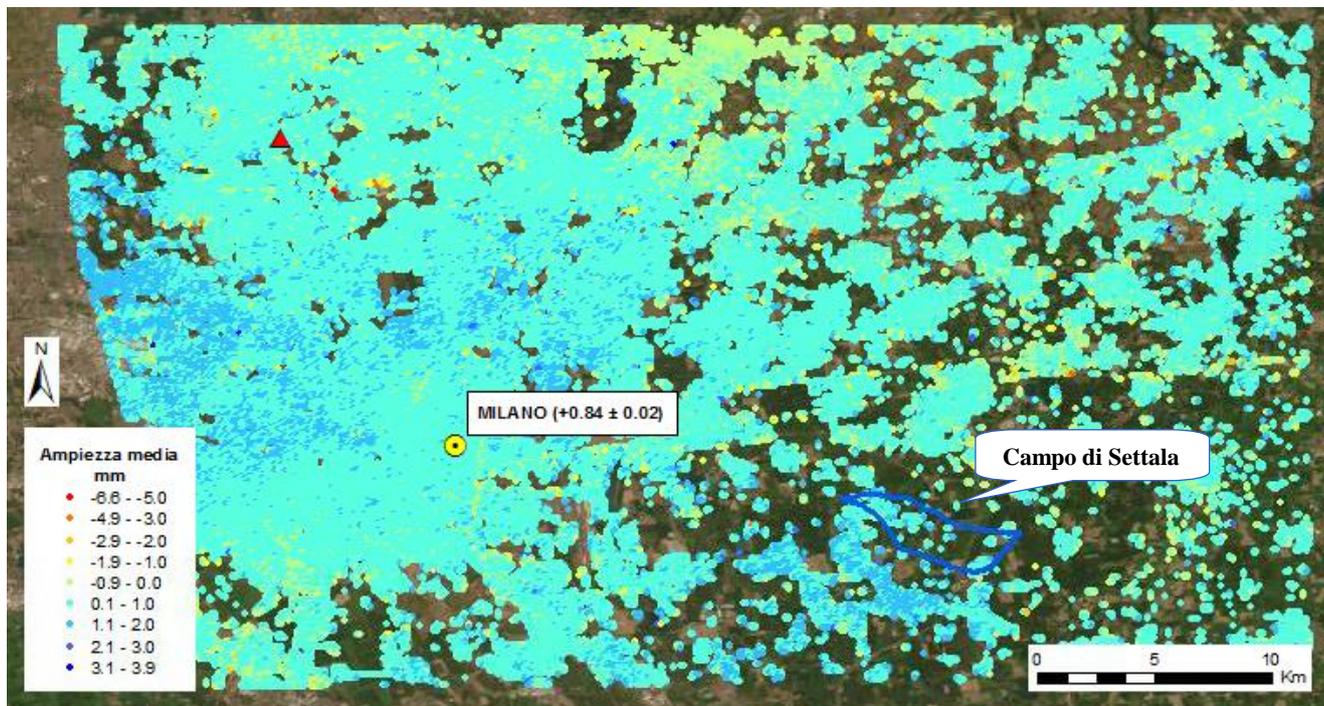
Confronto con il dato Sentinel

Le analisi eseguite con i satelliti Radarsat e Sentinel, sebbene riferite a periodi temporali differenti, hanno fornito risultati coerenti sia in termini di valori di velocità media e loro distribuzione entro l'area di interesse, sia per quanto riguarda l'andamento delle serie storiche di spostamento dei punti e confronto con la curva cumulativa di stoccaggio.

I risultati conseguiti risultano in linea con quanto evidenziato nei report precedenti.

La Fig. 46 riassume i risultati dell'analisi SAR condotta sul campo di Settala.

I risultati conseguiti risultano perfettamente in linea con quanto evidenziato nei report precedenti e confermano pertanto l'idoneità tecnica e le condizioni di sicurezza nell'esercizio in sovrappressione del giacimento di Settala SAN P/E fino ad una pressione massima pari al 107% di quella originaria di scoperta.



Variazioni Altimetriche

Trend regionale
(valori CGPS Milano)

+ 0.84 mm/anno

Relative rispetto al
trend regionale

~ (+0.67 mm/anno)

Correlazione con il ciclo di stoccaggio

Ampiezza media
delle curve

~ 10-20 mm

SHIFT
temporale

~ 30 gg

Correlazione
(con la curva di
stoccaggio)

ELEVATA

Fig. 46 In alto i dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati, con ubicazione del CGPS di Milano, del punto di riferimento (triangolino rosso) e il limite del giacimento di Settala. In basso i risultati dell'analisi SAR eseguita sul campo di Settala.