



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG **1** DI **44**

CONCESSIONE BORDOLANO STOCCAGGIO

Ciclo di stoccaggio 2020-2021

MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI DEL SUOLO

(aggiornamento dati a Novembre 2020)

Febbraio 2021	G. Codegone	A. Mantegazzi	C. Coti
DATA DI EMISSIONE	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 2 DI 44

SOMMARIO

1. Introduzione	3
2. Il monitoraggio satellitare SAR.....	6
2.1. La Tecnica PSP-IFSAR™	7
2.2. Indici di precisione	9
2.3. Tipologia di analisi PS proposte.....	10
3. Analisi del campo di Bordolano	14
3.1. Analisi del dato Radarsat 1 – Radarsat 2	15
3.1.1. Analisi del dato GPS	15
3.1.2. Calibrazione del dato Regional con GPS di riferimento	17
3.1.3. Calibrazione del dato Local con il dato Regional.....	21
3.1.4. Analisi delle serie storiche dei punti scomposti	28
3.2. Analisi del dato Sentinel 1.....	34
3.2.1. Analisi dei valori di velocità media.....	34
3.2.2. Analisi delle serie storiche dei punti scomposti	37
4. Conclusioni.....	43



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 3 DI 44

1. Introduzione

L'esercizio del giacimento di Bordolano (CR), attivato allo stoccaggio nel corso del 2016, prevede l'ottemperanza ad una serie di adempimenti e di prescrizioni contenute nei provvedimenti ministeriali di autorizzazione dell'attività. In particolare, i decreti di VIA (MATTM, 2009 e 2014) e il decreto di approvazione del programma lavori (MiSE-MATTM, 2011) prescrivono l'esecuzione di alcuni monitoraggi di natura geologica e dinamica per la verifica dei seguenti aspetti:

- gestione dei fluidi e misura delle pressioni di esercizio del giacimento;
- spostamenti dell'acquifero di fondo;
- analisi dei movimenti del suolo;
- analisi della microsismicità.

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

- Punto A9) del decreto DVA-DEC-0001633 del 12.11.2009: *"Il monitoraggio della subsidenza, attraverso dati SAR e tecnica Permanent Scatterers, dovrà essere integrato periodicamente, anche ai fini delle calibrazione delle misure, con i dati dei CGPS rilevanti, sulla base di un programma concordato con ARPA Lombardia; i risultati delle analisi dovranno essere inviati con cadenza annuale a MATTM e ARPA Lombardia"*.
- Art. 1, comma 3, del decreto MiSE-MATTM del 28.12.2011: *"La documentazione prodotta in ottemperanza alle prescrizioni nn. A7), A8) e A9) del decreto del Ministero dell'ambiente 12 novembre 2009, n. 1633 dovranno essere inoltrate anche alla Divisione II – Sezione UNMIG di BOLOGNA e alla Divisione VII del Ministero dello sviluppo economico"*.

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 poterle distinguere 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 2020 dei dati radar satellitari acquisiti ed elaborati con Tecnica PSP-IFSAR™ sul campo Stogit di Bordolano per il monitoraggio delle possibili deformazioni del terreno connesse all'attività di stoccaggio di gas. L'analisi interferometrica si è basata



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 4 DI 44

sull'elaborazione congiunta delle immagini radar acquisite in geometria ascendente e discendente dai satelliti Radarsat-1 e Radarsat-2 nel periodo Ottobre 2003 – Novembre 2020.

È stata inoltre eseguita l'analisi Sentinel riferita al periodo Marzo 2015 – Novembre 2020 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 di aumentare la frequenza temporale delle acquisizioni (Sentinel fornisce una misura ogni 6 giorni) e la copertura areale del dato con un aumento dei punti di misura.

L'esercizio allo stoccaggio del giacimento è stato avviato recentemente, pertanto per la gran parte del periodo monitorato il campo non era attivo allo stoccaggio. In particolare, tra il 2008 ed il 2013 è stata completata la ricostituzione del cushion gas per un volume totale iniettato di 455 Msm³, mentre nel corso del 2016 sono stati dapprima eseguiti alcuni test di iniezione/erogazione mirati alla verifica del corretto funzionamento degli impianti e solo nella seconda parte dell'anno sono stati iniettati i primi volumi di working gas. Attualmente il campo è attivo allo stoccaggio con graduale riempimento per raggiungere la condizione a regime.

Il dato Radarsat è stato calibrato in termini assoluti utilizzando il CGPS pubblico di Crema (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 +0.44 mm/anno, in linea con gli aggiornamenti precedenti e con quanto evidenziato dal dato del CGPS di Crema (-0.24 mm/anno).

Le serie storiche dei punti selezionati all'interno dei limiti del giacimento mostrano una buona correlazione con la curva del volume di gas movimentato, registrando un leggero trend di sollevamento a partire dal periodo di iniezione del cushion gas. Inoltre, i punti interni ubicati in prossimità del culmine del giacimento registrano oscillazioni medie di 5-10 millimetri legate ai cicli di stoccaggio, in coerenza con quanto si osserva negli altri campi di stoccaggio gestiti da Stogit.

Al contrario, le serie storiche dei punti selezionati all'esterno dei limiti del giacimento non mostrano alcuna correlazione con l'attività esercitata nel sito in esame. In tutta l'area monitorata si registrano oscillazioni di ampiezza contenuta (mediamente di circa 5 mm) e di periodicità variabile, poco significative dal punto di vista geodinamico e che rientrano nel margine di tolleranza del metodo di misura e del sistema di elaborazione dei dati. La continuità del monitoraggio nei prossimi anni fornirà maggiori indicazioni in merito alla correlazione delle serie storiche dei punti con l'attività di stoccaggio appena avviata.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 5 DI 44

L'analisi evidenzia che l'effetto in superficie dello stoccaggio tende ad esaurirsi in prossimità del limite del giacimento, ad eccezione dell'area immediatamente a sud-est in cui diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi ad una distanza di circa 1.5 km dal limite del giacimento stesso.

Lo specchietto seguente riassume i risultati dell'analisi SAR condotta sul campo di Bordolano.

Variazioni Altimetriche

Trend regionale
(valori CGPS Crema)

- 0.24 mm/anno

Relative rispetto al
trend regionale

~ (+0.44 mm/anno)

Correlazione con il ciclo di stoccaggio

Ampiezza media
delle curve

~ 5-10 mm

Correlazione (con curva
gas movimentato)

BUONA



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-O.

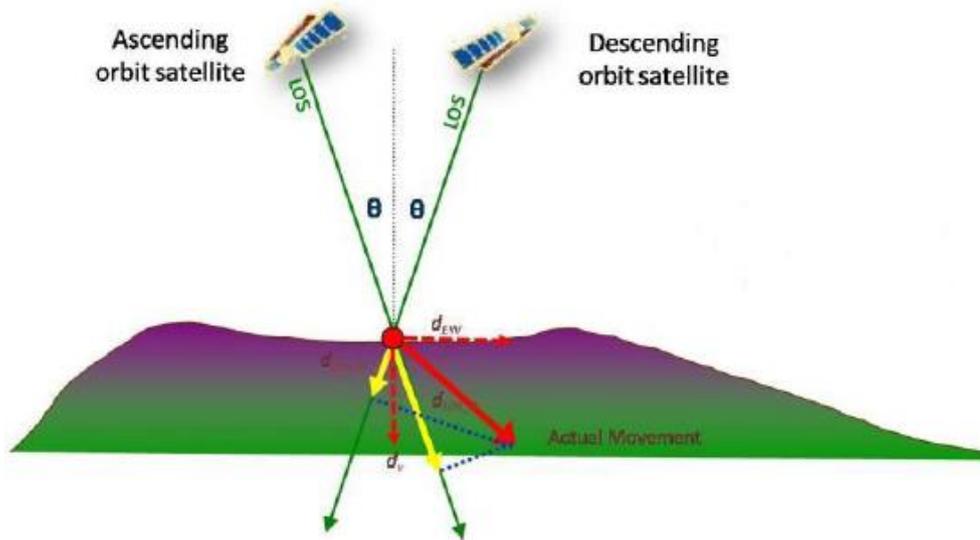


Fig. 1 Scomposizione del moto dalle LOS ascendente e discendente alle componenti orizzontale est-ovest e verticale.

Le immagini SAR vengono acquisite con una frequenza che dipende dal tempo di rivisitazione del satellite utilizzato. Per il monitoraggio del giacimento di Bordolano, 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



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 8 DI 44

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.

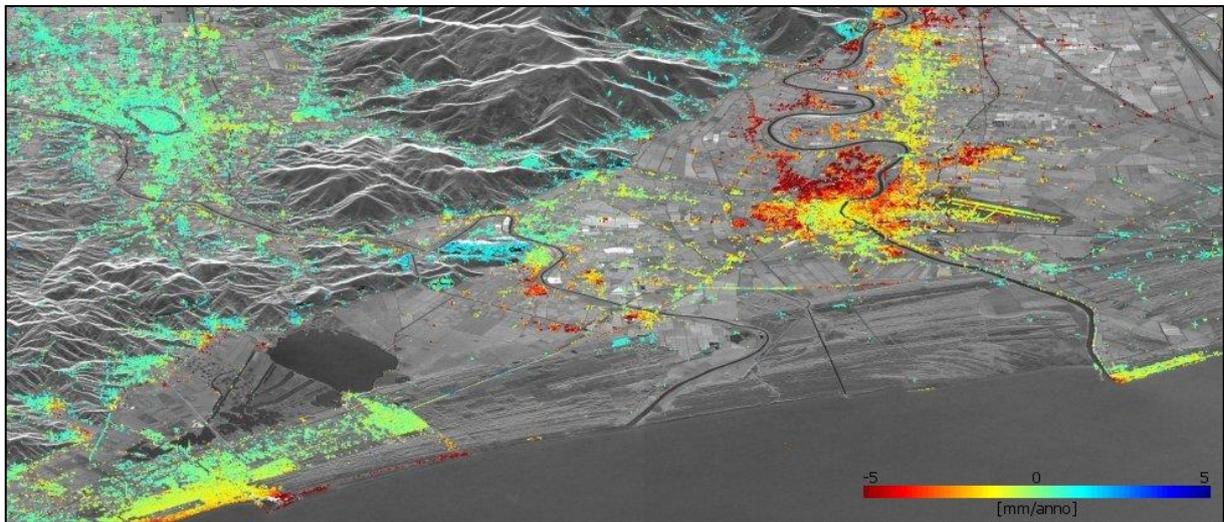


Fig. 2 Esempi di subsidenza nell'area di Pisa. I punti colorati indicano le posizioni dei PS, ed il loro colore indica la velocità media di spostamento lungo la LOS misurata.

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.

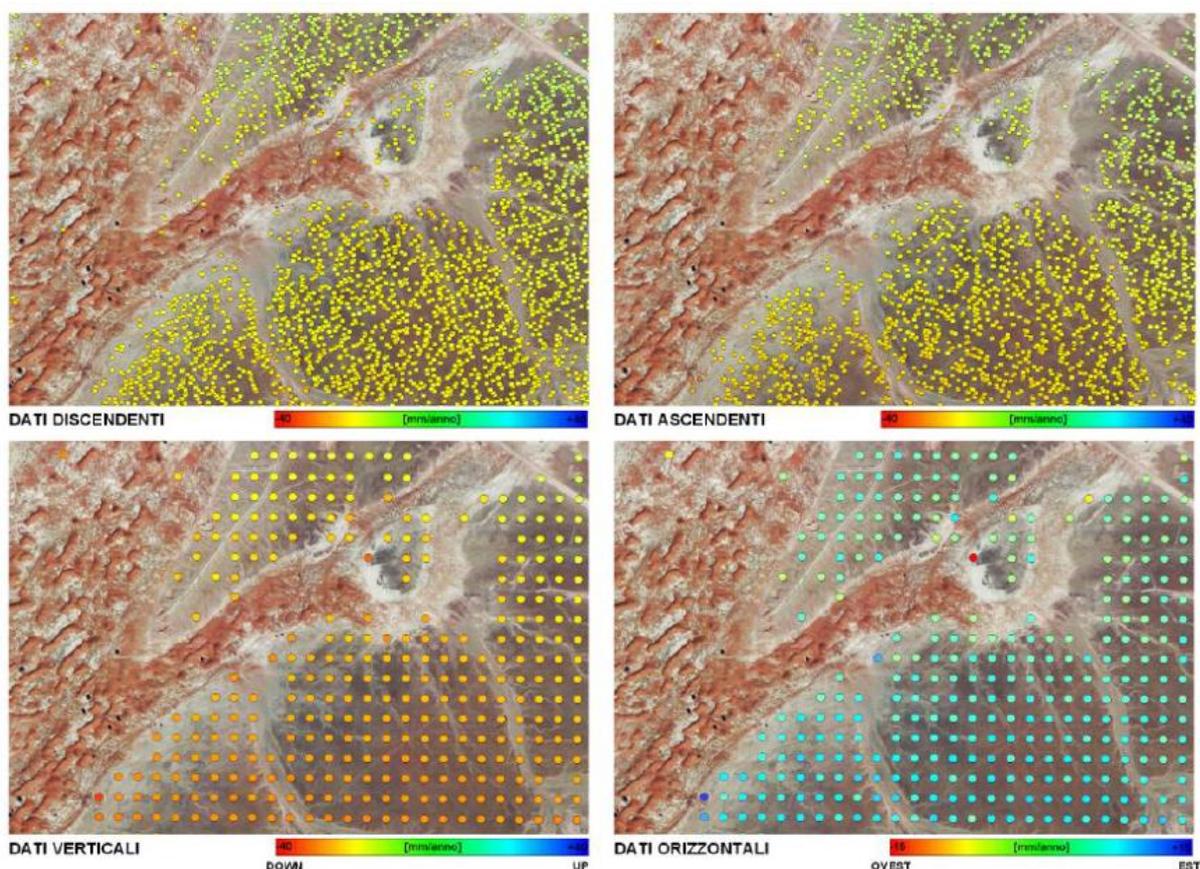


Fig. 3 Trasformazione dei dati di spostamento dei PS su griglia regolare. In alto i risultati ottenuti dai PS, in basso gli stessi ricampionati su griglia regolare per la scomposizione del moto.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 11 DI 44

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

Le analisi eseguite sul campo di Bordolano sono di due tipologie che differiscono principalmente per l'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 (Bordolano, Ripalta e Sergnano), 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 Crema).
- *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 Bordolano si utilizza il GPS di Crema). Una volta calibrato il dato Regional, è 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).

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 e le serie storiche di alcuni punti rappresentativi posti sia all'interno che all'esterno della proiezione in superficie dell'area originariamente mineralizzata.

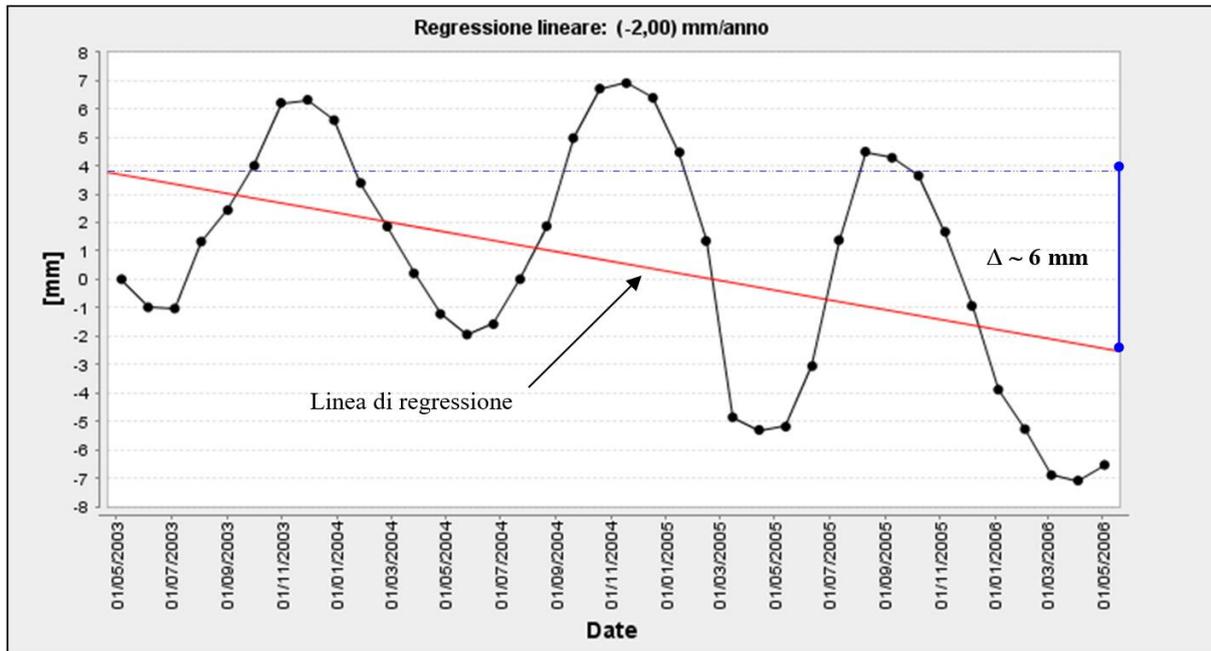


Fig. 4 Esempio di serie storica con valori di subsidenza di circa 2 mm/anno.

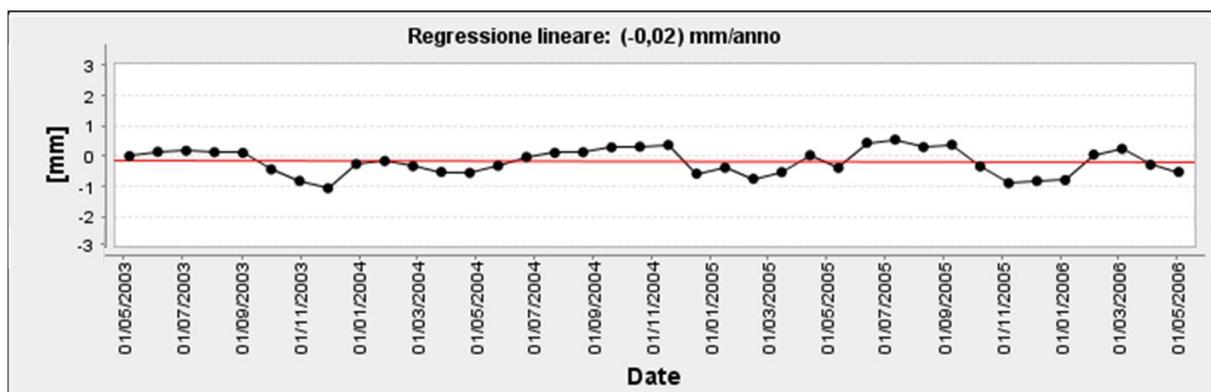


Fig. 5 Esempio di serie storica con valori di regressione lineare nulla.

Nel caso specifico di Bordolano, poiché per la gran parte del periodo monitorato il campo non era ancora attivo allo stoccaggio, il confronto è stato eseguito con la curva del volume di gas movimentato.

In particolare, tra il 2008 ed il 2013 è stata completata la ricostituzione del cushion gas per un volume totale iniettato di 455 Msm³, mentre nel corso del 2016 sono stati dapprima eseguiti alcuni test di iniezione/erogazione mirati alla verifica del corretto funzionamento degli impianti e solo nella seconda



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 13 DI 44

parte dell'anno sono stati iniettati i primi volumi di working gas. Attualmente il campo è attivo allo stoccaggio con graduale riempimento per raggiungere la condizione a regime.

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 (Fig. 6); 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.

L'analisi comparata delle serie storiche di spostamento dei punti e della curva cumulativa del gas movimentato è un elemento molto utile per la caratterizzazione dello scenario deformativo di fondo degli anni precedenti l'avvio dello stoccaggio, per poter eseguire un confronto con il periodo da cui si opera lo stoccaggio del gas.

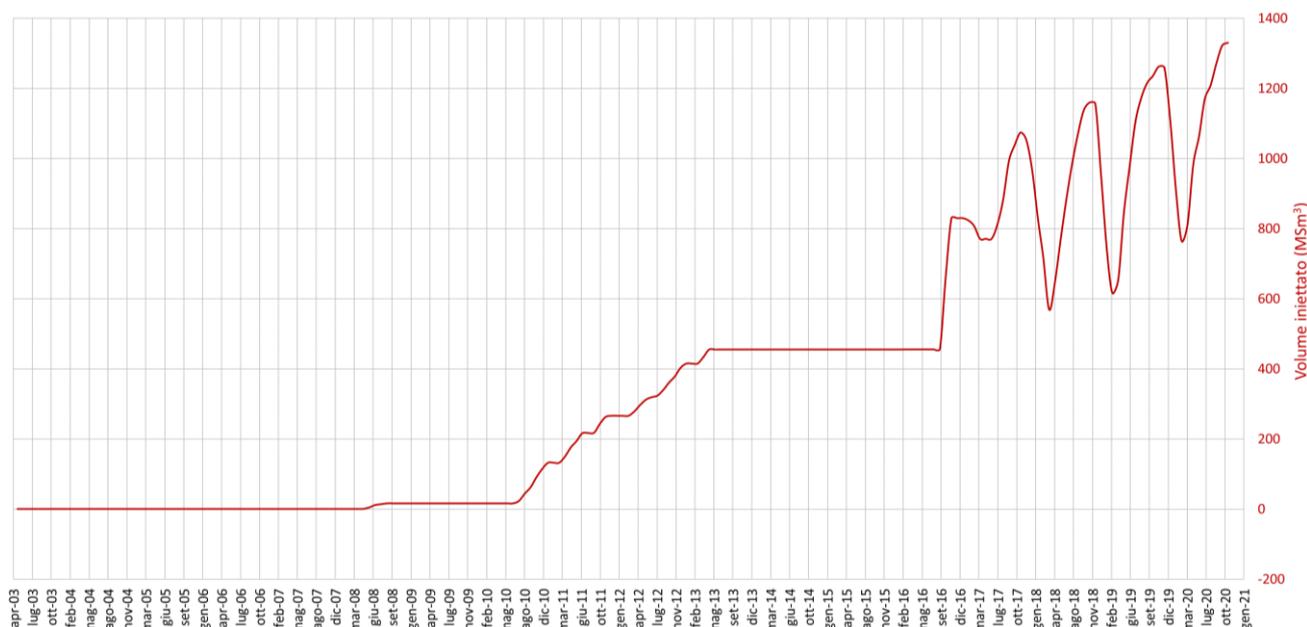


Fig. 6 Curva cumulativa del gas movimentato del campo di Bordolano (volumi in Milioni di Standard m^3 o MSm^3).

Analisi dell'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 Bordolano

Per il monitoraggio del campo di Bordolano, Stogit effettua un'analisi PSP-IFSAR™ di tipo Local con estensione di circa 54 km² e di tipo Regional con estensione di circa 900 km² comprendente al suo interno le singole aree Local di Bordolano, Ripalta e Sergnano (Fig. 7).

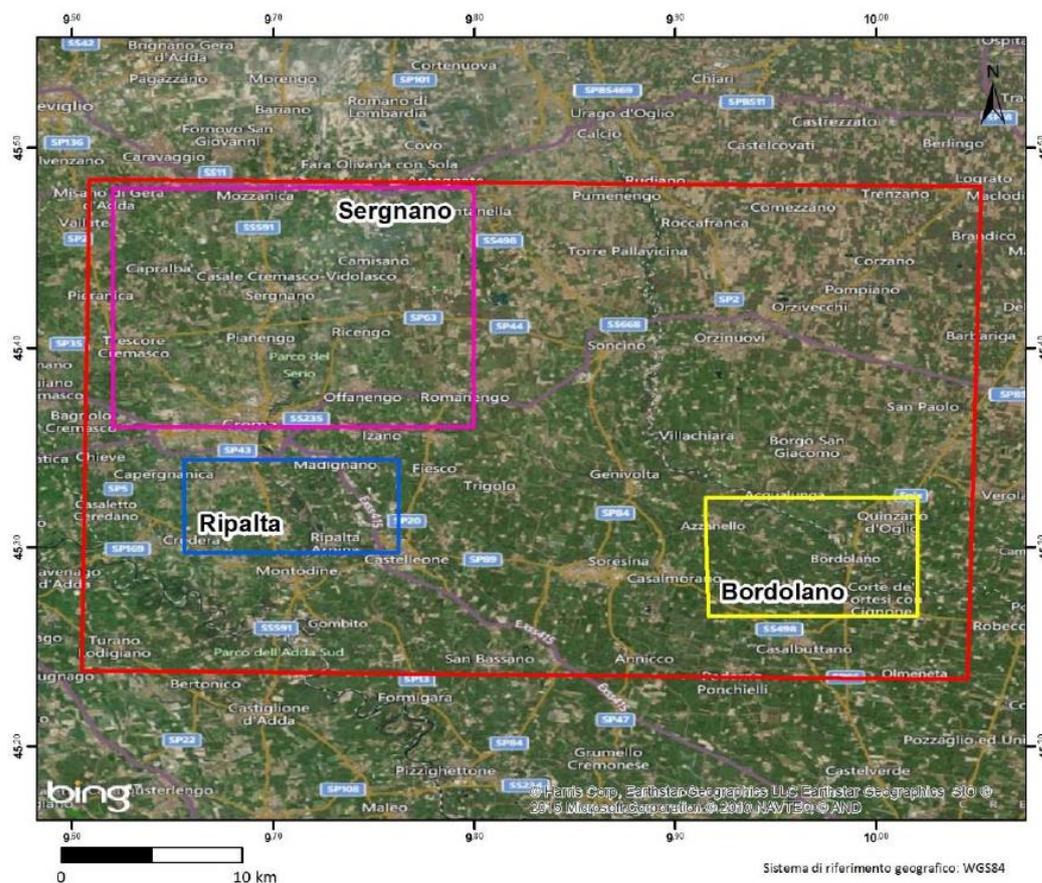


Fig. 7 Estensione dell'area Regional di Crema rispetto alle tre aree Local di Bordolano, Ripalta e Sergnano.

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 2020. 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 107 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 134 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 Novembre 2020, sia in geometria ascendente



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 15 DI 44

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 contrattista nel recupero di alcune immagini storiche.

	Geometria	Track	N° immagini	Periodo
Radarsat 1-2	Ascendente	147-66	207	09/10/2003-27/10/2020
Radarsat 1-2	Discendente	197-116	243	13/10/2003-31/10/2020
Sentinel 1	Ascendente	15	265	23/03/2015-28/10/2020
Sentinel 1	Discendente	168	275	22/03/2015-27/10/2020

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 Crema, utilizzato per la calibrazione del dato Regional, è installato con monumentazione a palo presso il tetto dell'Istituto per Geometri "Pacioli", situato nella zona sud di Crema (Fig. 9). Di tale CGPS sono stati stimati i movimenti di lungo periodo, dal 14/05/2005 al 31/10/2020, ed i dati sono stati analizzati nell'ambito di una rete di riferimento costituita da 9 stazioni IGS/EPN. Il CGPS di Crema misura un valore medio di velocità assoluta pari a -0.24 mm/anno nella componente verticale.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 16 DI 44

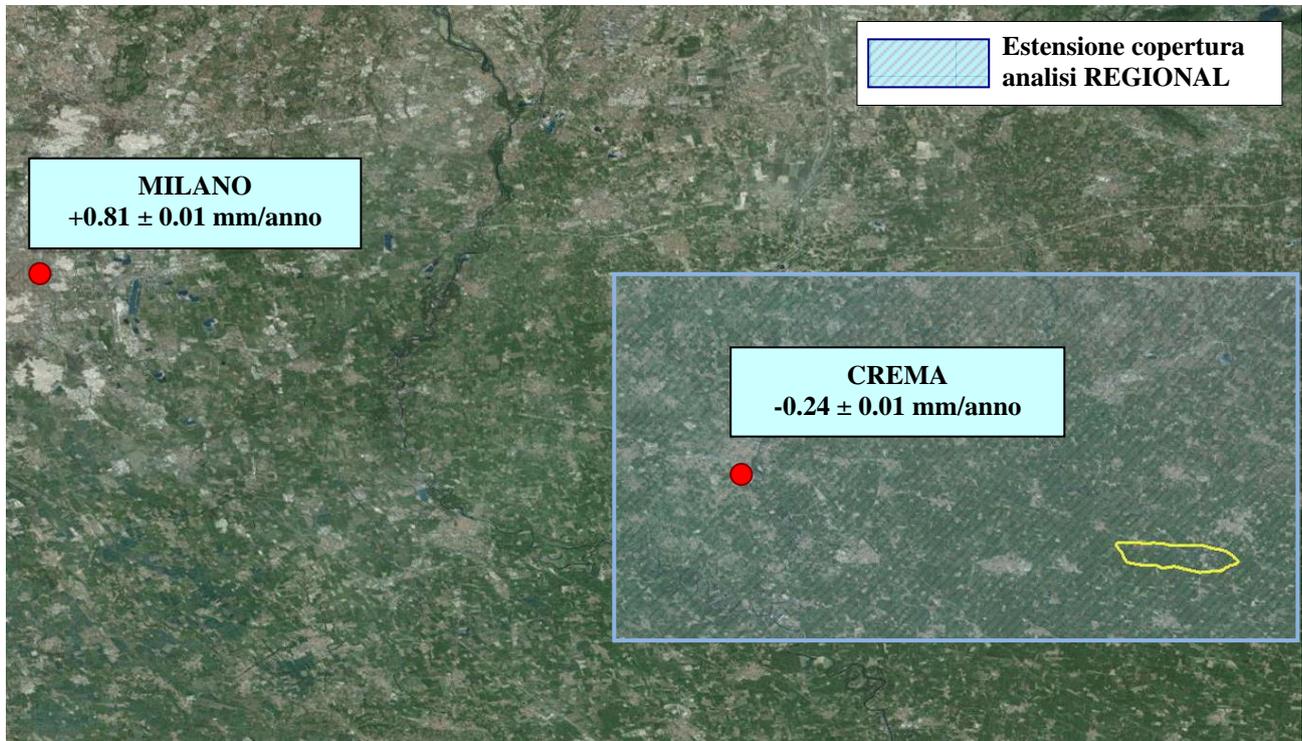


Fig. 8 Ubicazione GPS Milano e Crema ed estensione dell'analisi Regional (in giallo il campo di Bordolano).

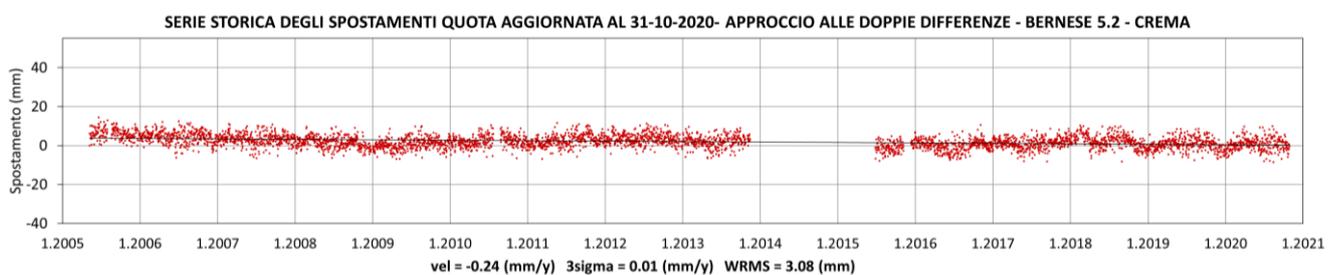


Fig. 9 Ubicazione GPS di Crema, particolare dell'antenna e stima di velocità della componente verticale.

3.1.2. Calibrazione del dato Regional con GPS di riferimento

L'area Regional di Crema è caratterizzata da una sostanziale stabilità, ad eccezione dell'estremità SO, in cui sono presenti fenomeni di subsidenza che superano i -5 mm/anno (Fig. 10 e Fig. 11).

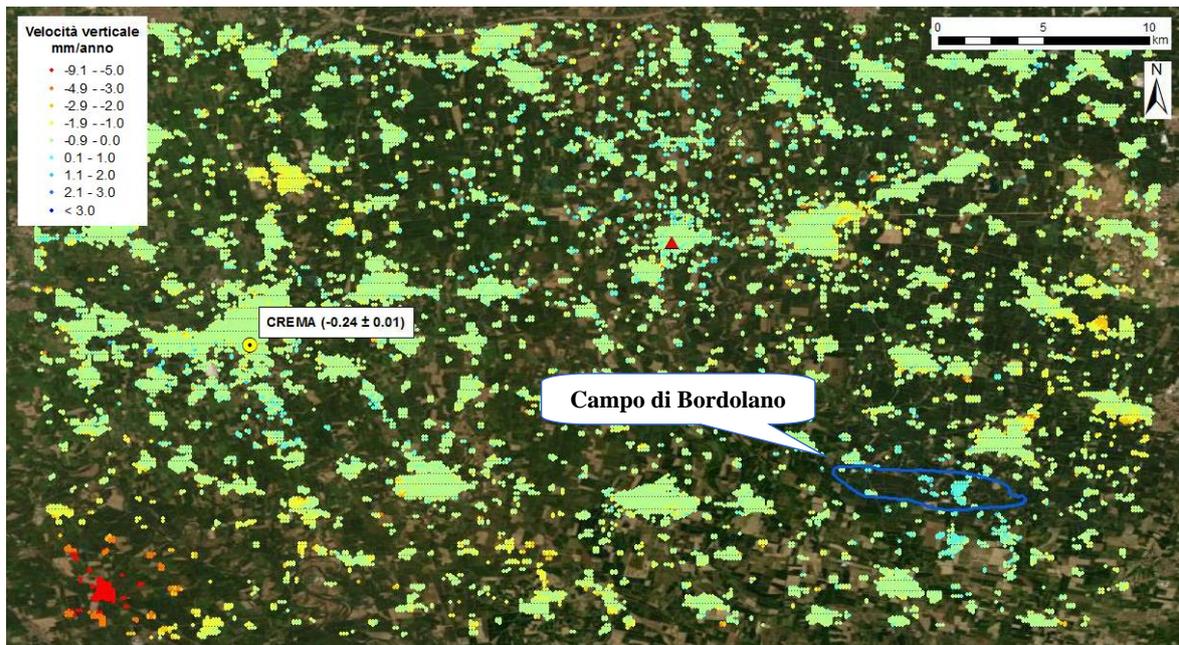


Fig. 10 Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale. In evidenza la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione (triangolo rosso) e del CGPS di Crema utilizzato per la calibrazione (giallo).

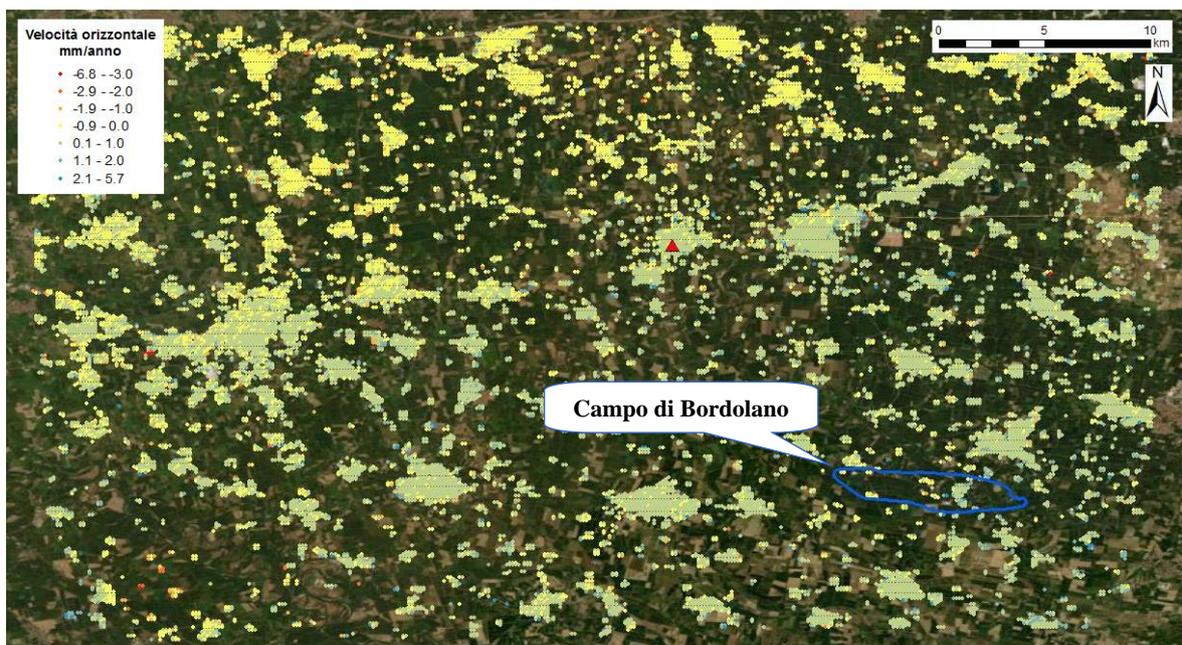


Fig. 11 Dati Regional scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento (triangolo rosso).

L'analisi dei valori di ampiezza della stagionalità evidenzia come in corrispondenza dei giacimenti di Sergnano e Ripalta siano presenti i tipici fenomeni deformativi ciclici legati allo stoccaggio del gas naturale, mentre tale ciclicità risulta assente in corrispondenza del giacimento di Bordolano (Fig. 12). L'attività di stoccaggio in giacimento è stata infatti avviata recentemente e pertanto il campo non è stato attivo per gran parte del periodo monitorato.

A nord di Bordolano è inoltre presente un'estesa area caratterizzata da un fenomeno deformativo a carattere stagionale nella componente verticale sicuramente non riconducibile all'attività di stoccaggio. A titolo di esempio si riportano in Fig. 13 le serie storiche di spostamento di due punti ubicati in quest'area, caratterizzata da oscillazioni cicliche di ampiezza compresa tra 5 e 15 mm e periodicità stagionale, in opposizione di fase rispetto alla curva di stoccaggio e probabilmente connessa al prelievo di acqua dal sottosuolo. E' inoltre ben visibile un generale trend di ribassamento.

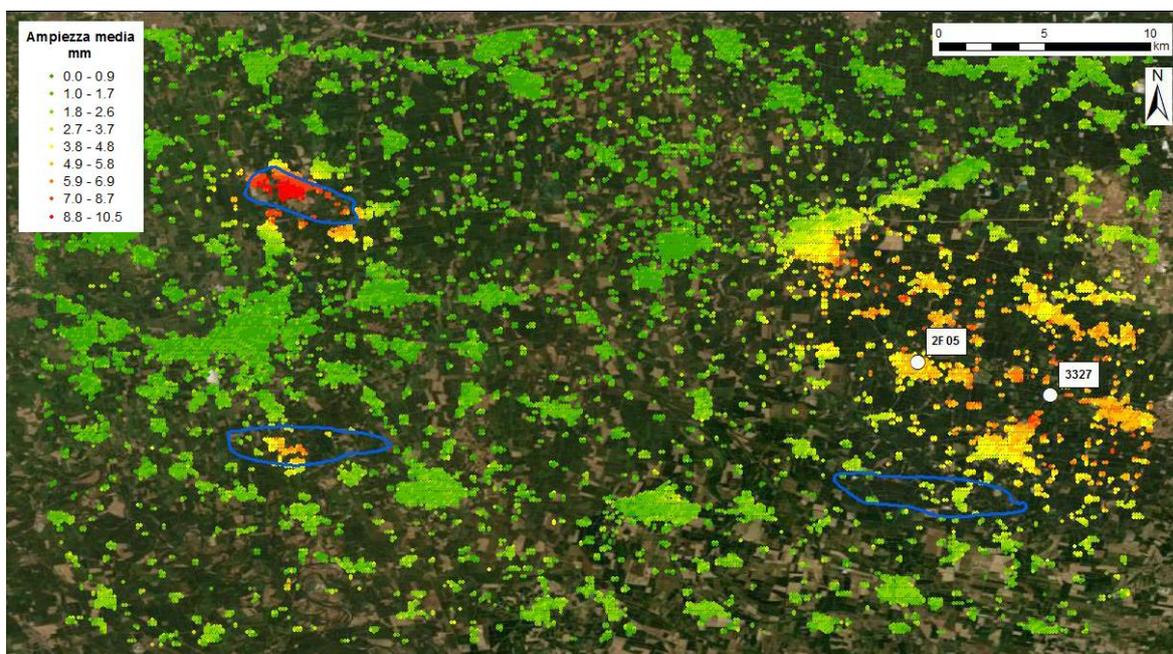


Fig. 12 Valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale del rilievo Regional; in blu le proiezioni in superficie dei giacimenti di Sergnano (a NO), Ripalta (a SO) e Bordolano (a SE).

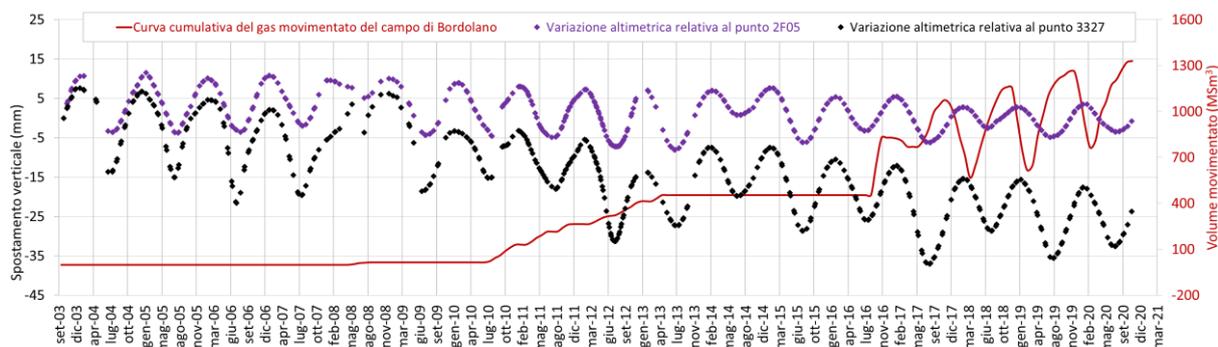


Fig. 13 Confronto tra la curva del gas movimentato del giacimento e l'andamento temporale delle variazioni altimetriche di due punti ubicati nell'area a nord del campo di Bordolano (ubicazione in Fig. 12).

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 Crema è pari a -0.38 mm/anno. Considerato che il CGPS di Crema misura un valore medio di velocità assoluta di -0.24 mm/anno nella componente verticale, la correzione da apportare ai valori scomposti Regional per riportarli al piano assoluto rilevato dal CGPS risulta essere di +0.14 mm/anno (Fig. 14). 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.



Fig. 14 Punti scomposti dell'analisi Regional: in giallo i valori originali e in rosa quelli calibrati.

Il dataset di velocità verticale dell'analisi Regional di Crema calibrato con il CGPS di riferimento è riportato in Fig. 15. 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 di Bordolano, 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 di Bordolano pari a +0.44 mm/anno, coerente con quanto evidenziato dal CGPS di Crema. Il dato evidenzia un lieve sollevamento dell'area occupata dal giacimento di Bordolano legato al graduale riempimento del giacimento, in accordo con quanto rilevato nei report degli anni precedenti. Tale effetto tende ad esaurirsi in prossimità del limite del giacimento, ad eccezione dell'area immediatamente a sud-est in cui diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi ad una distanza di circa 1.5 km dal limite del giacimento.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 20 DI 44

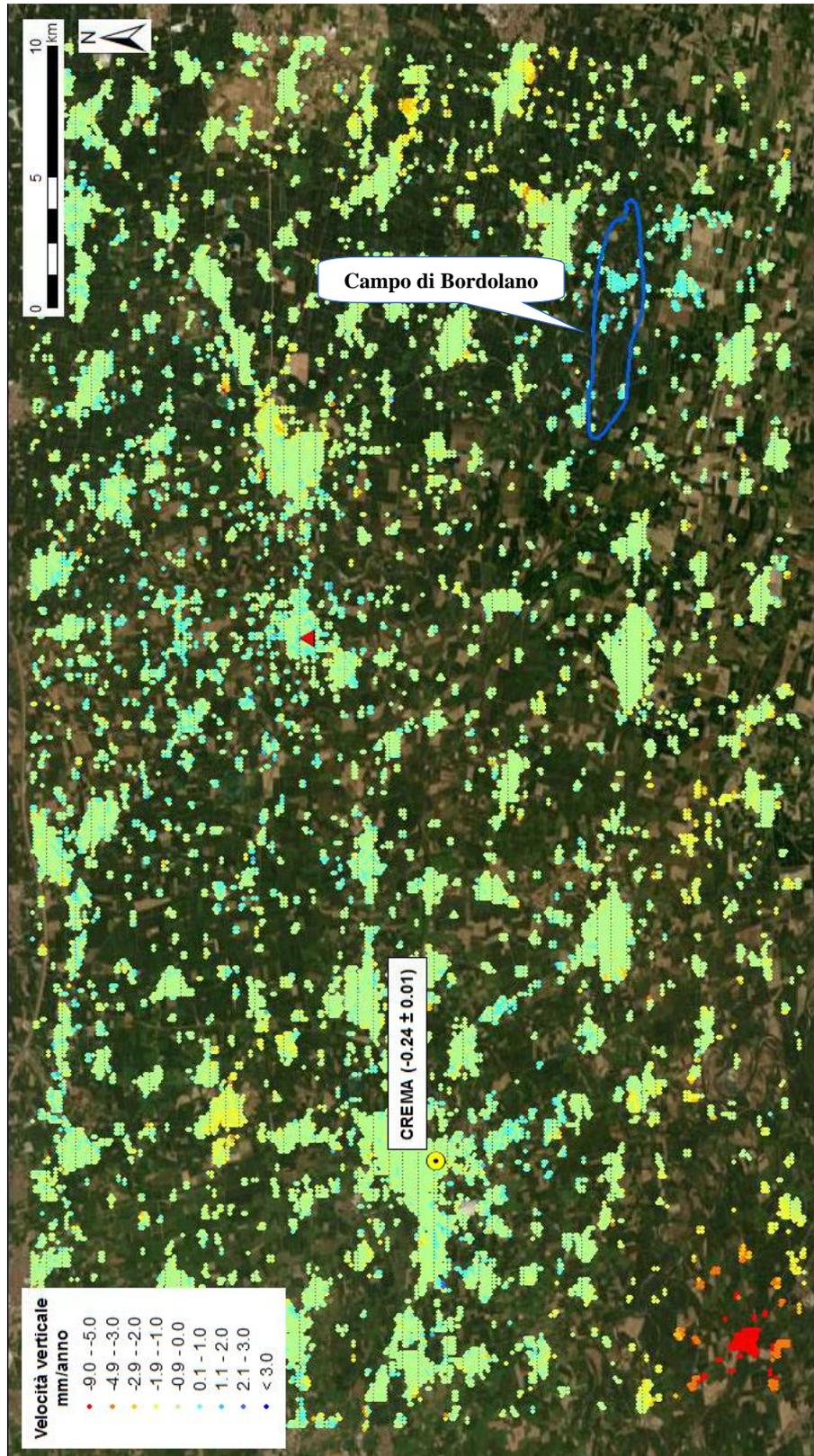


Fig. 15 Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati. In evidenza l'ubicazione del CGPS usato per la calibrazione, il punto di riferimento (triangolino rosso) e il limite del giacimento.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 21 DI 44

3.1.3. Calibrazione del dato Local con il dato Regional

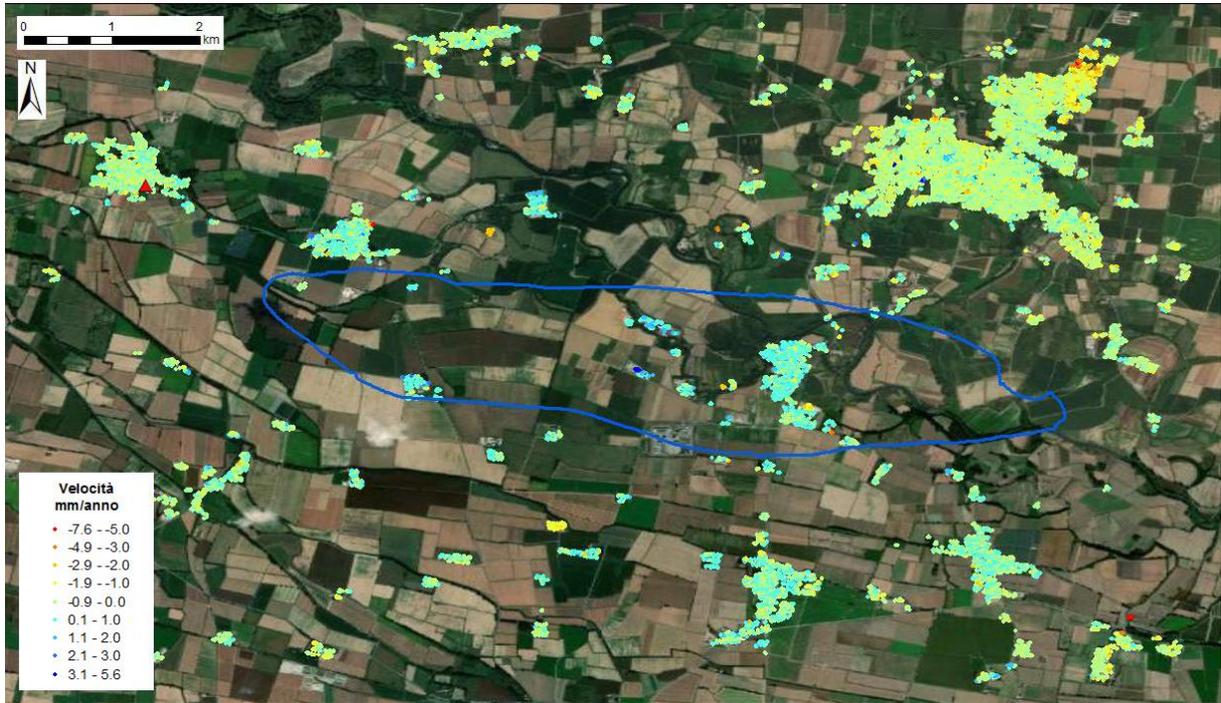
Il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del moto, al quale è assegnata velocità pari a zero, è stato mantenuto distante dalla zona di influenza del giacimento in modo da apprezzare in maniera oggettiva le eventuali anomalie deformative. Come si nota dalle Fig. 16, Fig. 17 e Fig. 18, i valori di velocità dell'area studiata evidenziano un leggero trend di innalzamento entro l'area del giacimento rispetto alle aree circostanti.

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 Crema. 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 Crema.

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 -0.31 mm/anno (Fig. 19). 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. 20).

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 +0.42 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 Crema e con la distribuzione media delle velocità verticali dell'intera area (Fig. 21), e risulta altresì coerente con quanto misurato nel corso degli anni precedenti, a dimostrazione della qualità dei dati SAR e CGPS utilizzati.

L'osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali (Fig. 22) evidenzia 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

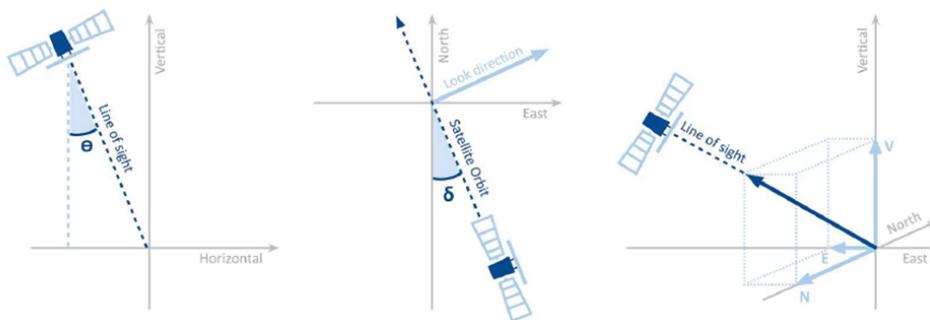
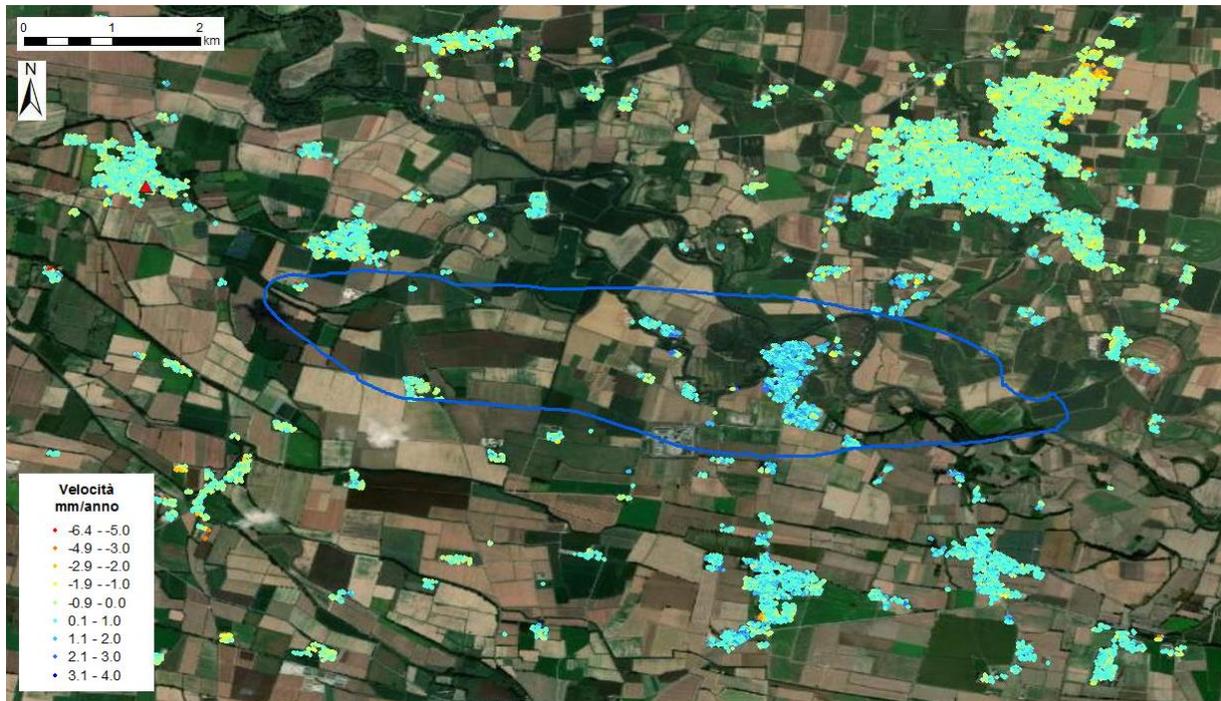


Fig. 16 Visualizzazione in scala di colori delle velocità dell'analisi Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



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	

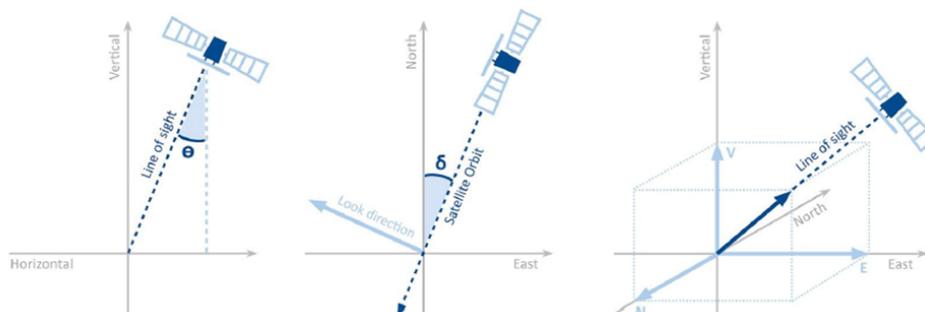


Fig. 17 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità discendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

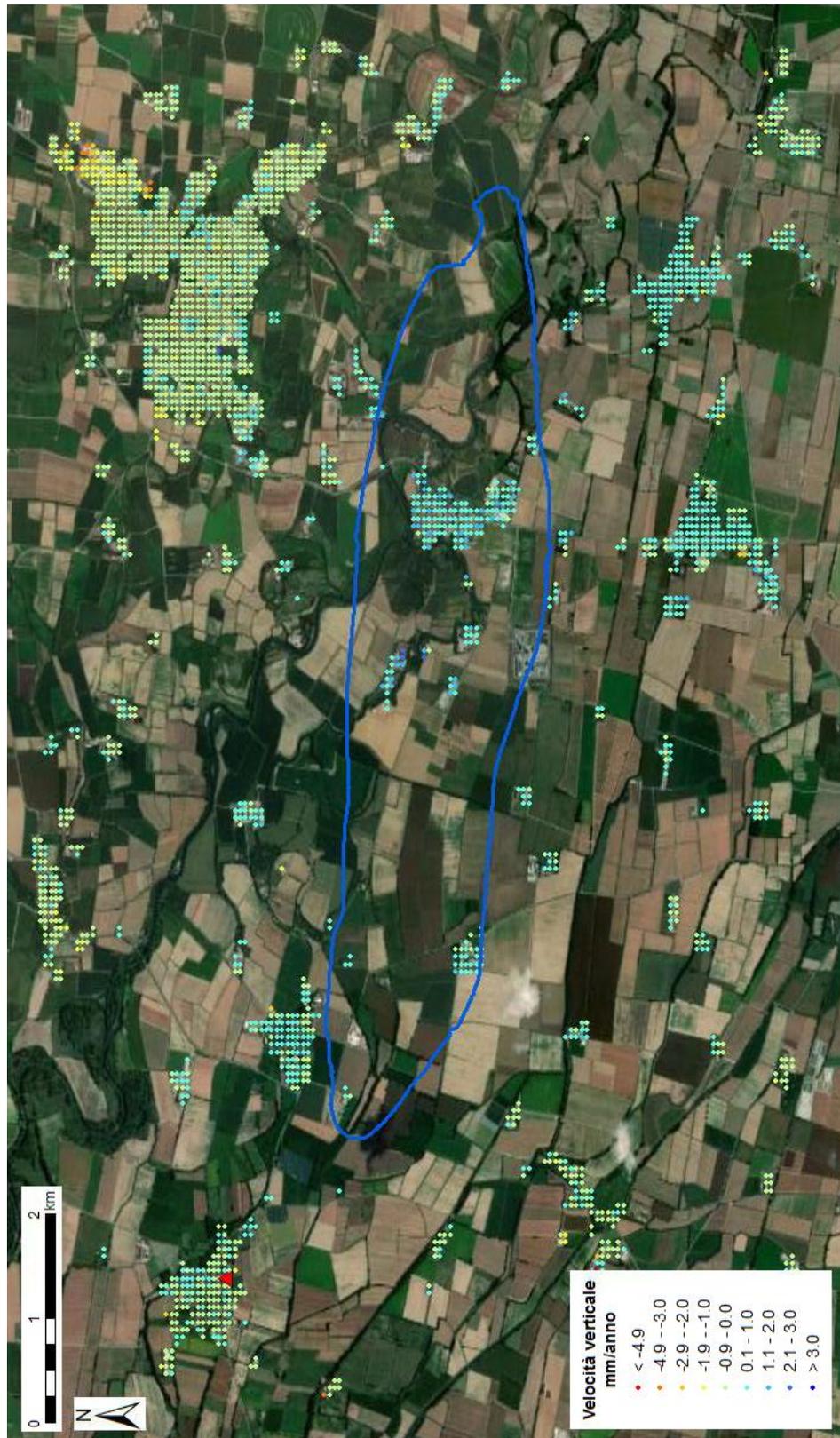


Fig. 18 Dati Local scomposti secondo il vettore verticale prima della calibrazione. In evidenza il punto di riferimento (triangolo rosso).



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020



Fig. 19 Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale vicino al punto di riferimento utilizzato per la scomposizione Local (triangolo rosso); in rosa i valori di velocità verticale calibrati. Il valore medio di velocità verticale per la calibrazione è stato calcolato all'interno di un cerchio di raggio di circa 200 m centrato sul punto di riferimento.



Fig. 20 Dati Local scomposti: in bianco i valori originali ed in verde quelli corretti di -0.31 mm/anno.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 26 DI 44

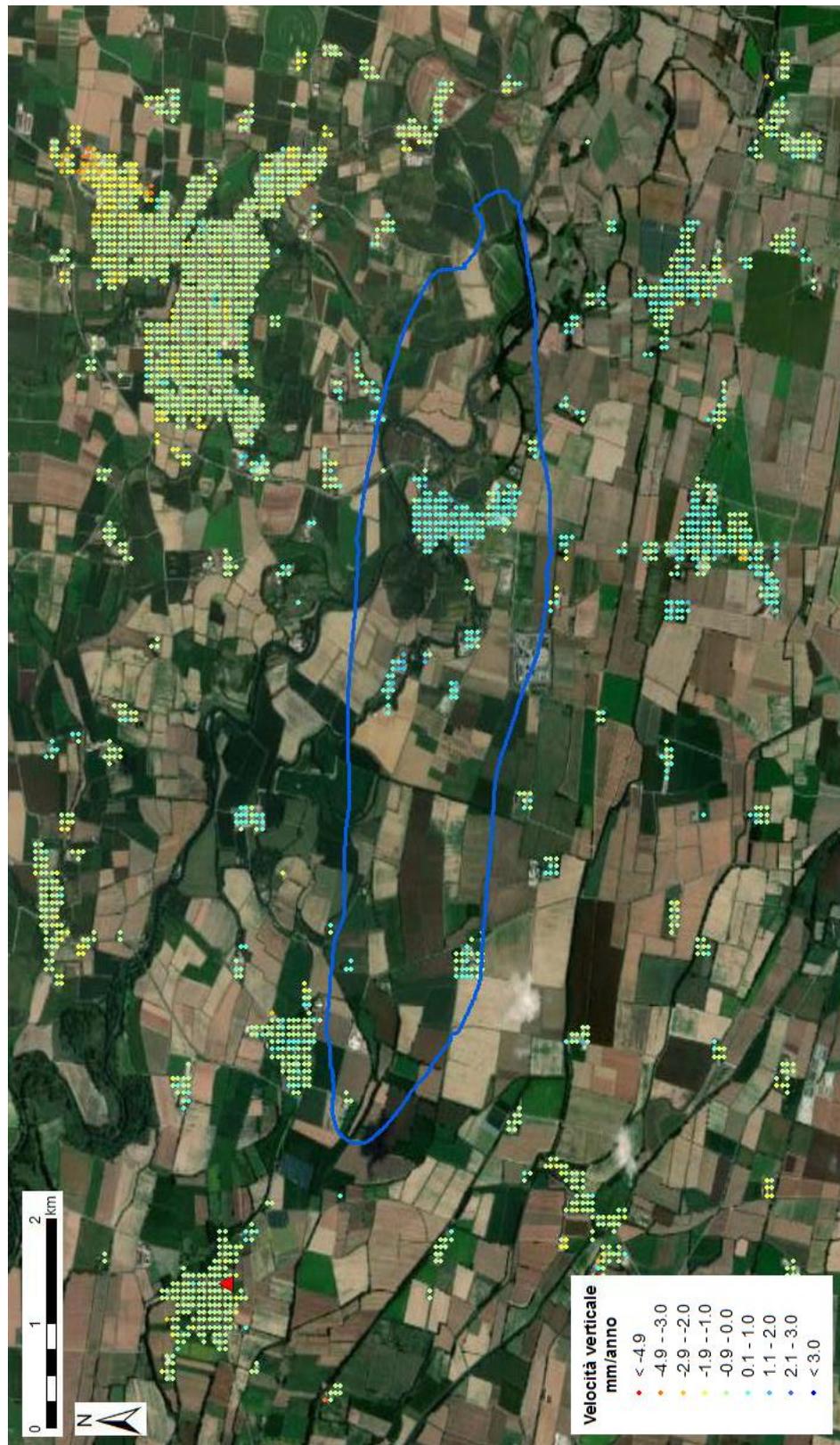


Fig. 21 Dati Local scomposti secondo il vettore verticale dopo la calibrazione. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso).



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 27 DI 44

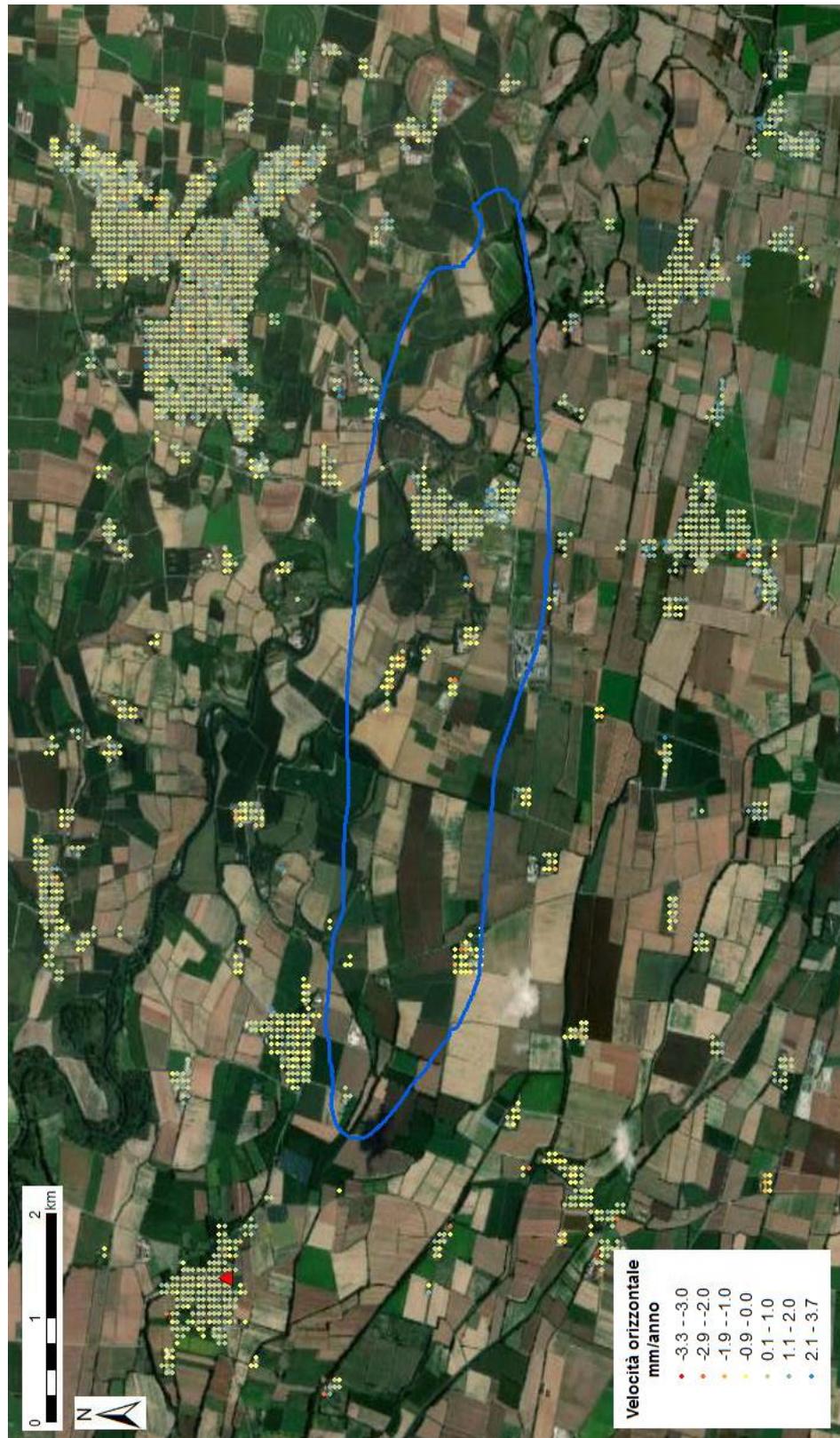


Fig. 22 Dati Local scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso).

3.1.4. Analisi delle serie storiche dei punti scomposti

Come già detto, nel caso specifico di Bordolano, l'analisi delle serie storiche è un elemento molto utile per la caratterizzazione dello scenario deformativo di fondo degli anni precedenti l'avvio dello stoccaggio, per poter eseguire un confronto con il periodo da cui si opera lo stoccaggio del gas.

Come si nota in Fig. 23, che mostra i valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale dei PS, sono presenti deformazioni cicliche di una certa entità solo nell'area a nord-est di Bordolano, come già evidenziato dall'analisi a scala regionale. Tale area risulta caratterizzata da un fenomeno deformativo a carattere stagionale nella componente verticale, sicuramente non riconducibile all'attività di stoccaggio gas e che potrebbe essere connesso al prelievo di acqua dal sottosuolo. La distribuzione dei valori di ampiezza media della stagionalità per le componenti verticale e orizzontale dei PS (Fig. 23 e Fig. 24) non evidenzia la presenza di fenomeni deformativi ciclici apprezzabili nell'area del giacimento in quanto l'analisi Radarsat fornisce informazioni su un intervallo di tempo ampio (2003-2020) che ricopre anche il periodo in cui lo stoccaggio non era ancora stato avviato (2003-2016).

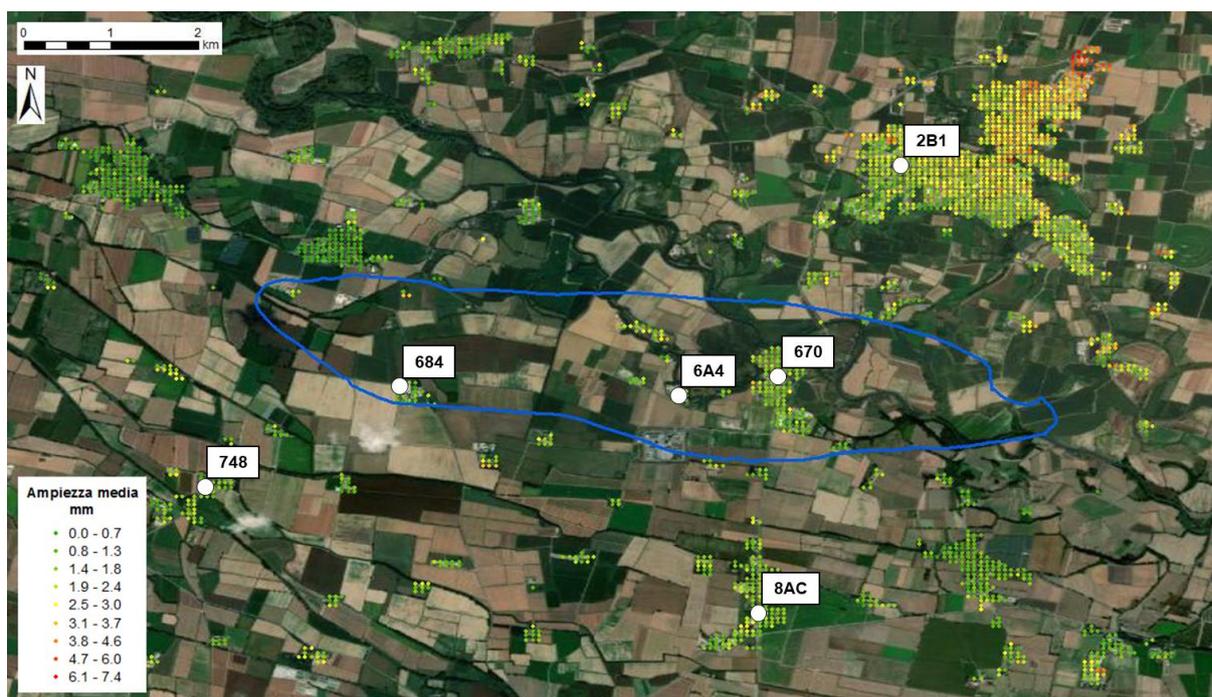


Fig. 23 Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente verticale dei PS Local e ubicazione dei 6 punti scelti rispetto alla proiezione in superficie del limite del giacimento.

Sono state analizzate le serie storiche relative a 6 punti, la cui ubicazione è riportata in Fig. 23. 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.

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.

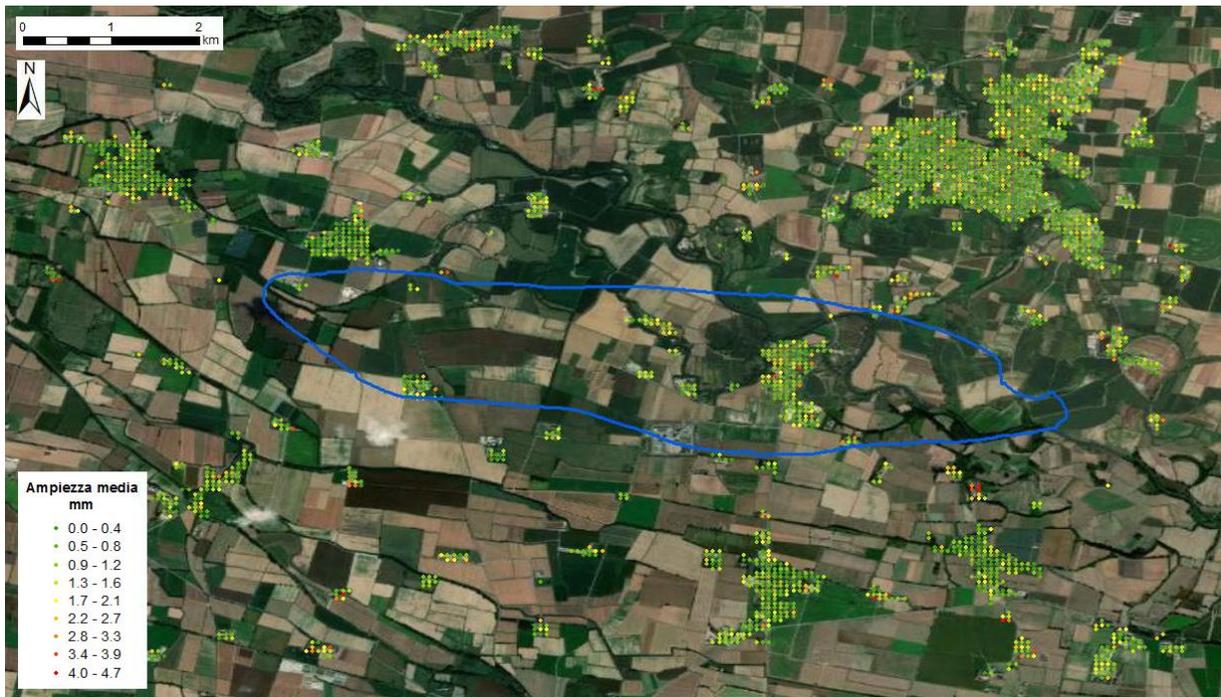


Fig. 24 Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente orizzontale dei PS Local.

Nelle pagine successive (da Fig. 25 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 del volume di gas movimentato del campo di Bordolano, 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.

Nel periodo 2008-2009 le serie storiche risentono della lacuna di immagini che interessa il dataset Radarsat-1 per la geometria ascendente. L'andamento delle 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.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 30 DI 44

Punto interno – 684

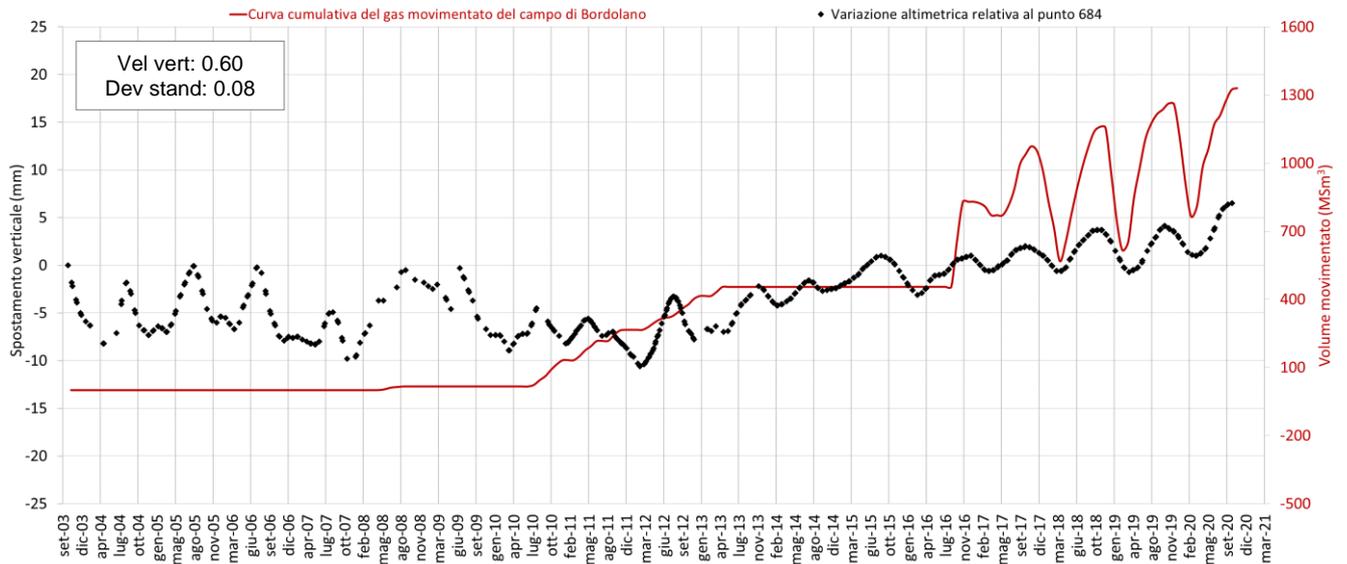


Fig. 25 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 684 e la curva del gas movimentato del giacimento di Bordolano.

Punto interno – 6A4

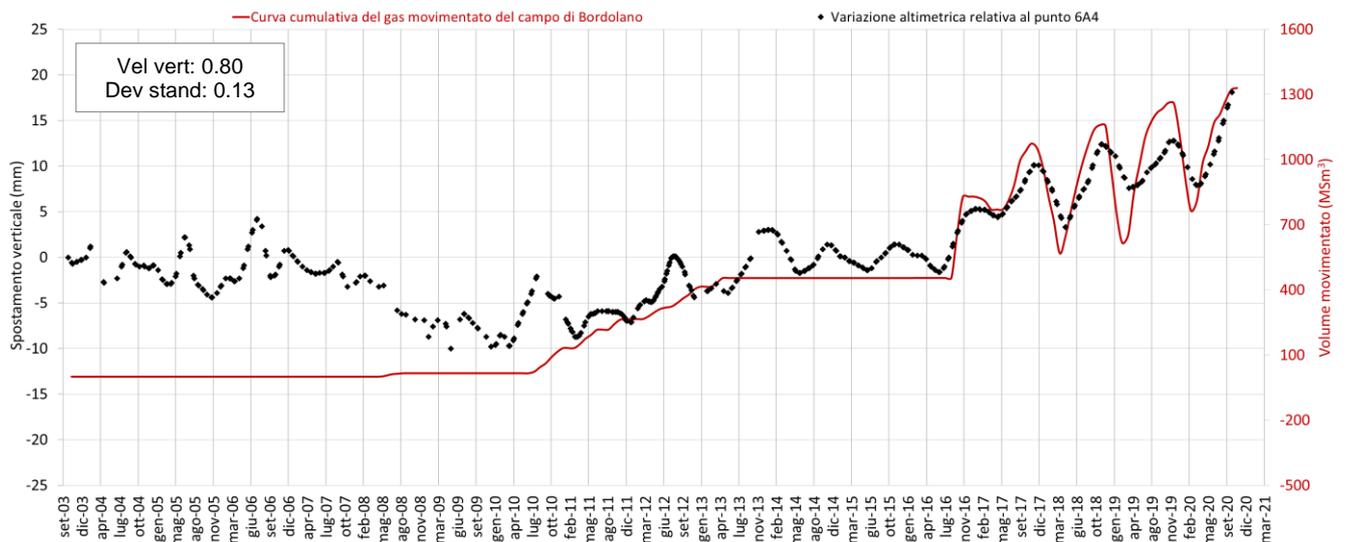


Fig. 26 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 6A4 e la curva del gas movimentato del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 31 DI 44

Punto interno – 670

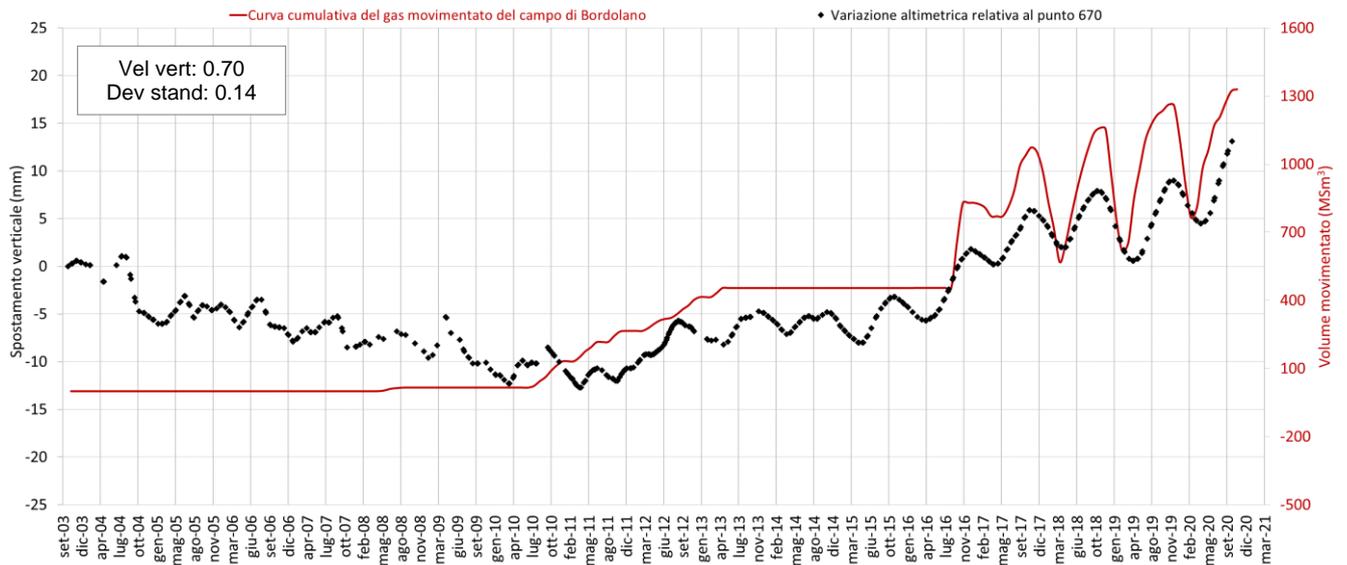


Fig. 27 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 670 e la curva del gas movimentato del giacimento di Bordolano.

Punto esterno – 748

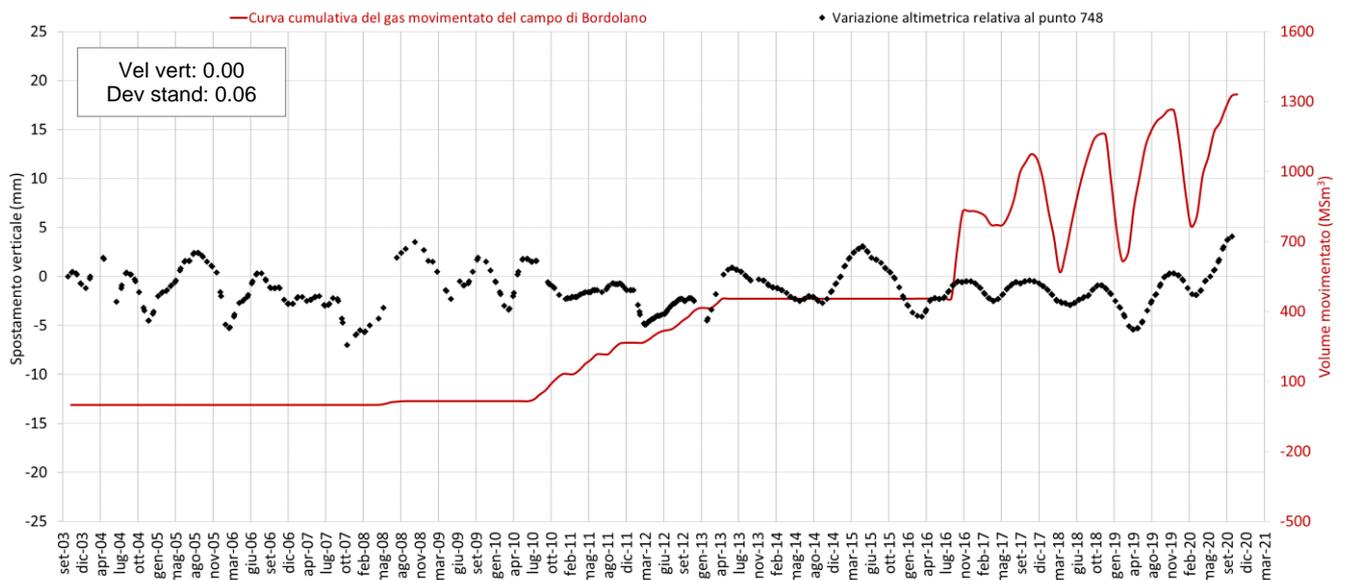


Fig. 28 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 748 e la curva del gas movimentato del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 32 DI 44

Punto esterno – 8AC

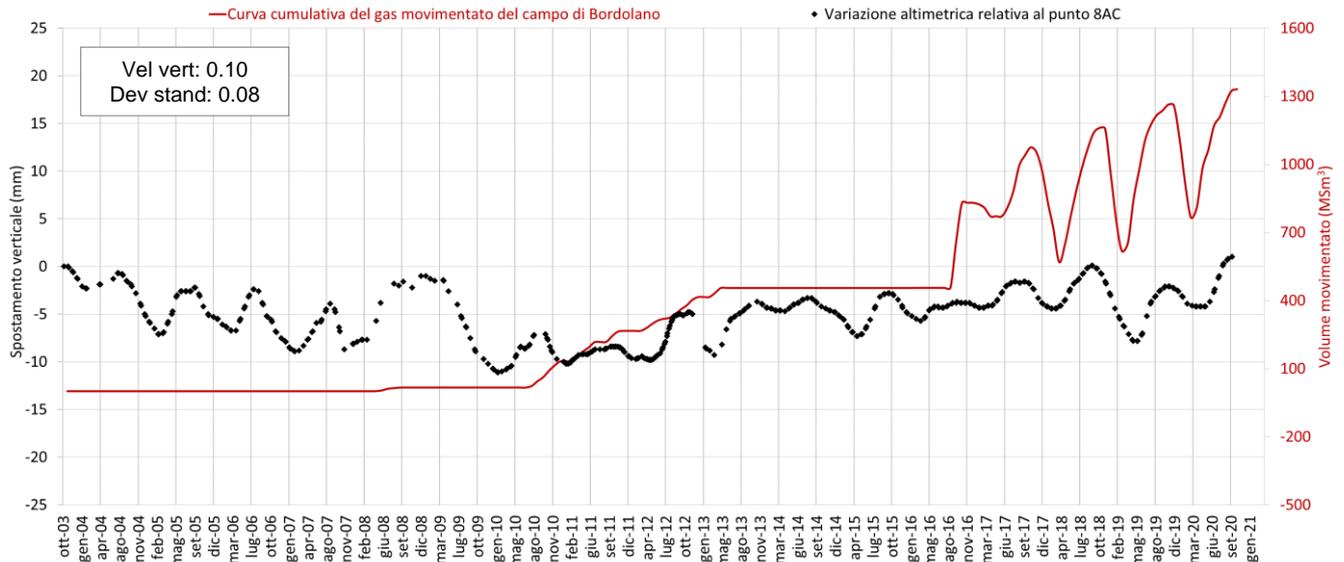


Fig. 29 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 8AC e la curva del gas movimentato del giacimento di Bordolano.

Punto esterno – 281

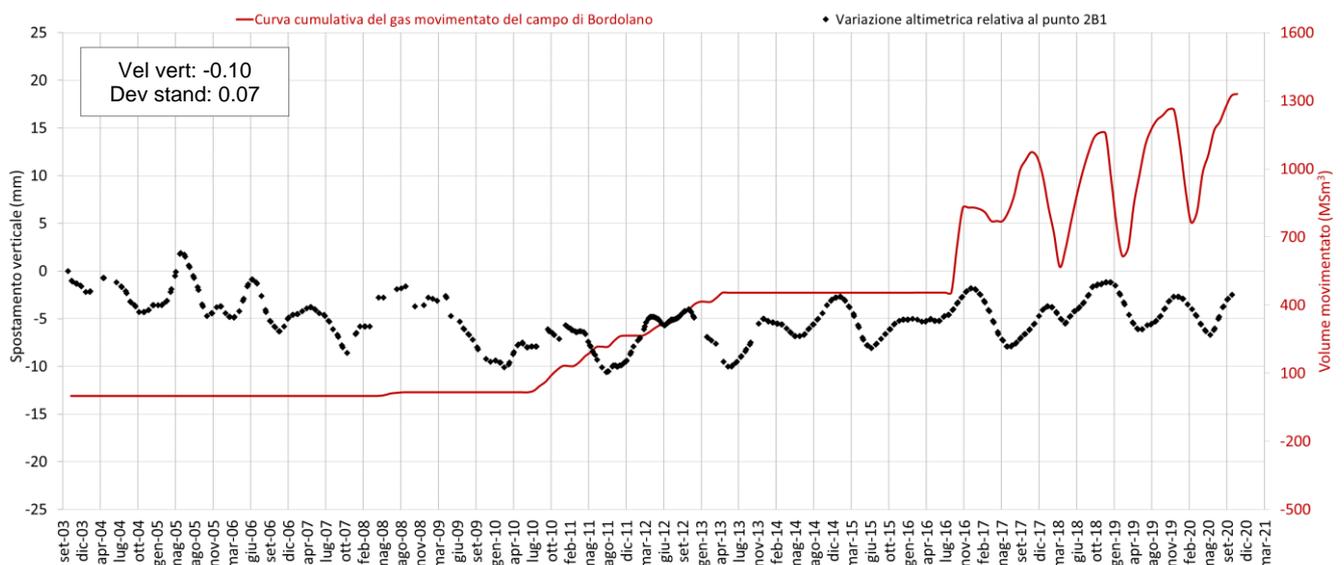


Fig. 30 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 281 e la curva del gas movimentato del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 33 DI 44

I punti scelti all'interno dei limiti del giacimento mostrano una buona correlazione con la curva del gas movimentato e registrano un lieve trend di innalzamento a partire dal periodo di iniezione del cushion gas (Fig. 31). I due punti interni ubicati in corrispondenza del culmine strutturale registrano le oscillazioni legate ai cicli di stoccaggio, con ampiezze che si attestano mediamente tra 5 e 10 millimetri, in accordo con quanto si osserva negli altri campi di stoccaggio gestiti da Stogit. Per il punto 684, ubicato in una zona marginale e molto vicino al limite del giacimento, tale correlazione risulta meno evidente. I punti esterni non mostrano invece alcuna correlazione ed evidenziano una generale stabilità (Fig. 32).

In accordo con l'analisi della distribuzione delle velocità medie, l'effetto dello stoccaggio in superficie nella zona a sud-est del campo diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi ad una distanza di circa 1.5 km dal limite del giacimento, come evidenziato dal punto 8AC.

Nel resto dell'area monitorata si registrano oscillazioni di ampiezza contenuta (mediamente di circa 5 mm) e di periodicità variabile, poco significative dal punto di vista geodinamico e che rientrano nel margine di tolleranza del metodo di misura e del sistema di elaborazione dati.

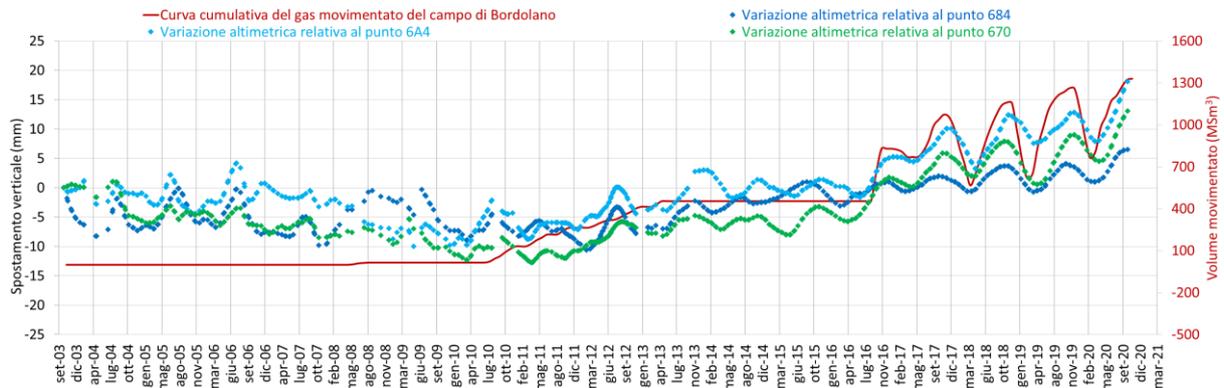


Fig. 31 Confronto tra la curva del gas movimentato e le serie storiche dei punti scelti interni.

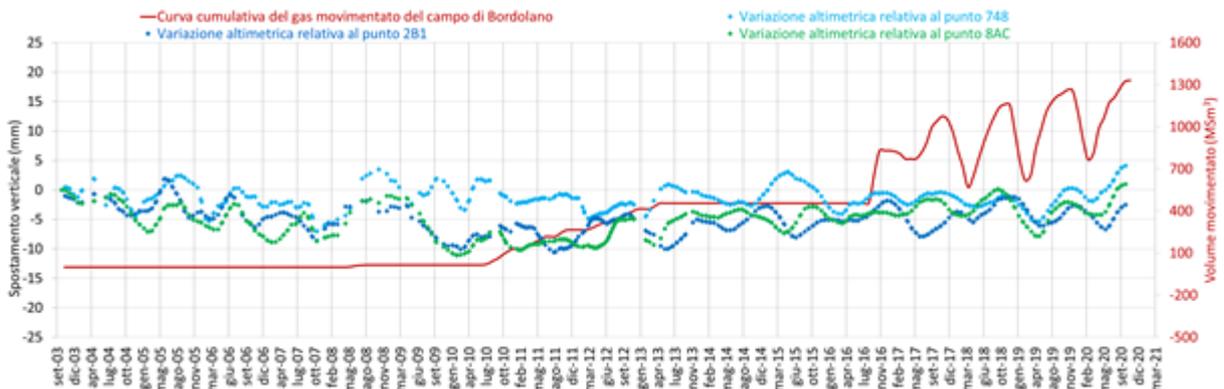


Fig. 32 Confronto tra la curva del gas movimentato e le serie storiche dei punti scelti esterni.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 34 DI 44

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 distante dalla zona di influenza del giacimento e 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. 33 e Fig. 34). In accordo con quanto misurato con Radarsat, la distribuzione dei valori di velocità verticale ottenuta con il dato Sentinel (Fig. 35) conferma la leggera tendenza all'innalzamento per i punti ubicati entro l'area del giacimento. Le differenze tra i valori medi di velocità misurati con i satelliti Radarsat e Sentinel sono dovute al diverso intervallo temporale analizzato. L'analisi Sentinel, che presenta velocità medie leggermente più elevate, fornisce informazioni dettagliate in merito alla storia recente dell'area (ultimi 5 anni), ossia da quando è stato avviato lo stoccaggio. L'analisi Radarsat fornisce un valore di velocità media calcolato su un intervallo di tempo più ampio (2003-2020) che comprende anche tutto il periodo in cui lo stoccaggio non era ancora stato avviato. L'analisi Radarsat permette quindi di analizzare soprattutto lo scenario deformativo di fondo prima dell'avvio delle attività. Infine, il dataset Sentinel non è stato sottoposto a calibrazione.

Sentinel fornisce inoltre informazioni su infrastrutture di recente costruzione come ad esempio la centrale di stoccaggio che non è visibile nel dataset Radarsat perché presente solo negli ultimi anni del periodo monitorato. L'utilizzo di entrambi i satelliti permette quindi di aumentare non solo la frequenza temporale delle acquisizioni ma anche la copertura areale del dato con un aumento dei punti di misura.

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 +1.99 mm/anno, evidenziando un leggero trend di innalzamento. Il resto dell'area di analisi risulta caratterizzato da una generale stabilità e l'effetto delle attività di stoccaggio risulta esaurirsi in prossimità del limite del giacimento, ad eccezione dell'area immediatamente a sud-est del giacimento, a conferma di quanto evidenziato dall'analisi Radarsat.

Le velocità degli spostamenti orizzontali (Fig. 36) evidenziano una sostanziale stabilità dell'area.

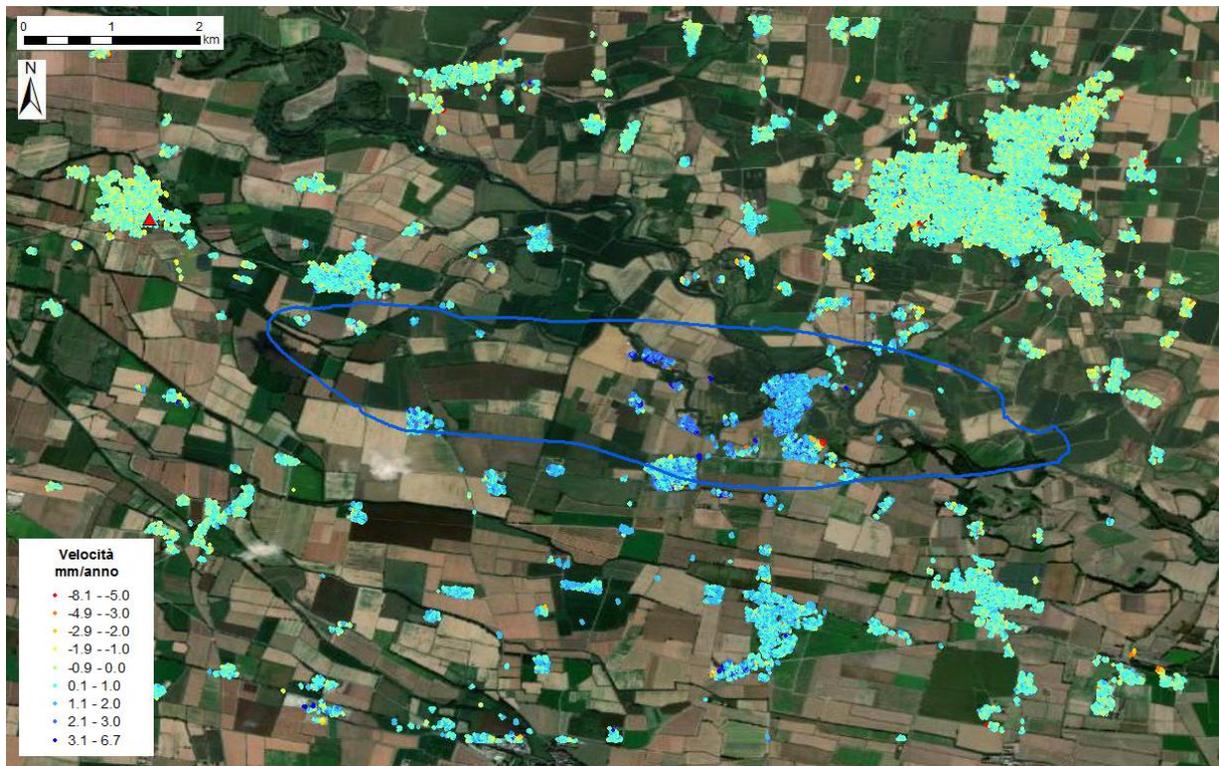


Fig. 33 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento.

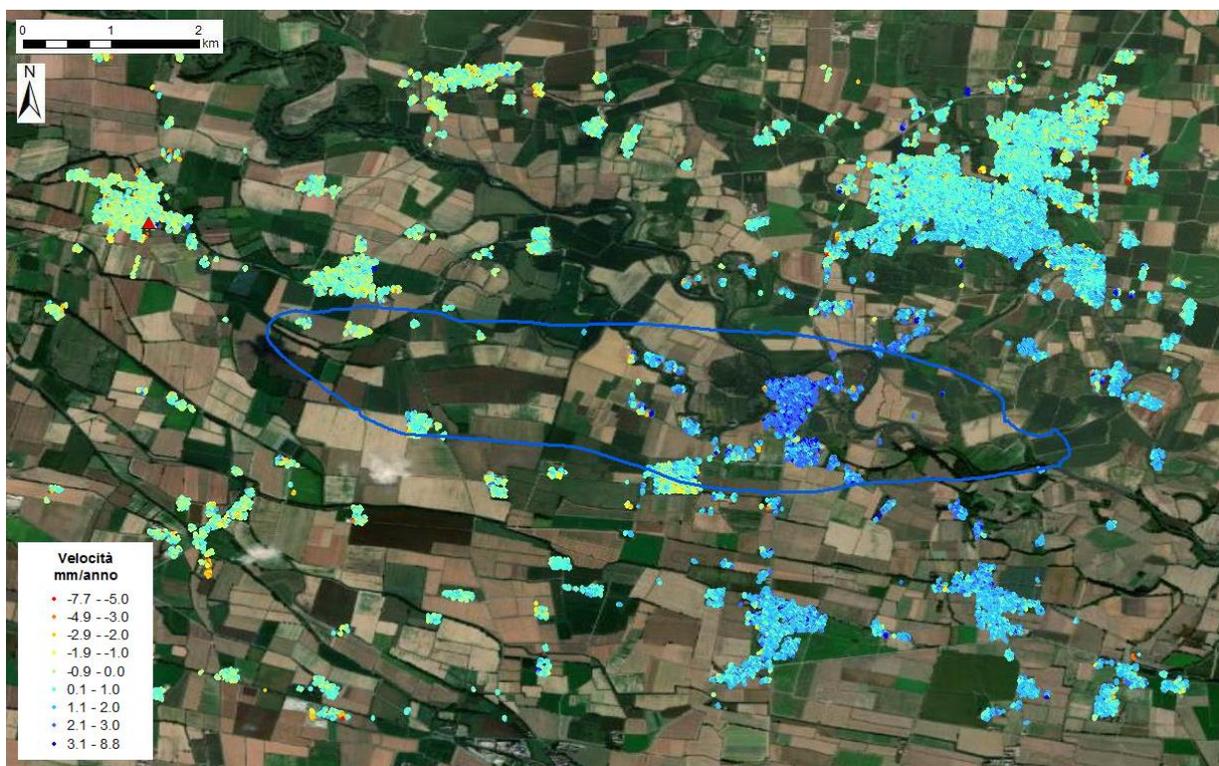


Fig. 34 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità discendente. Il triangolo rosso rappresenta il punto di riferimento.

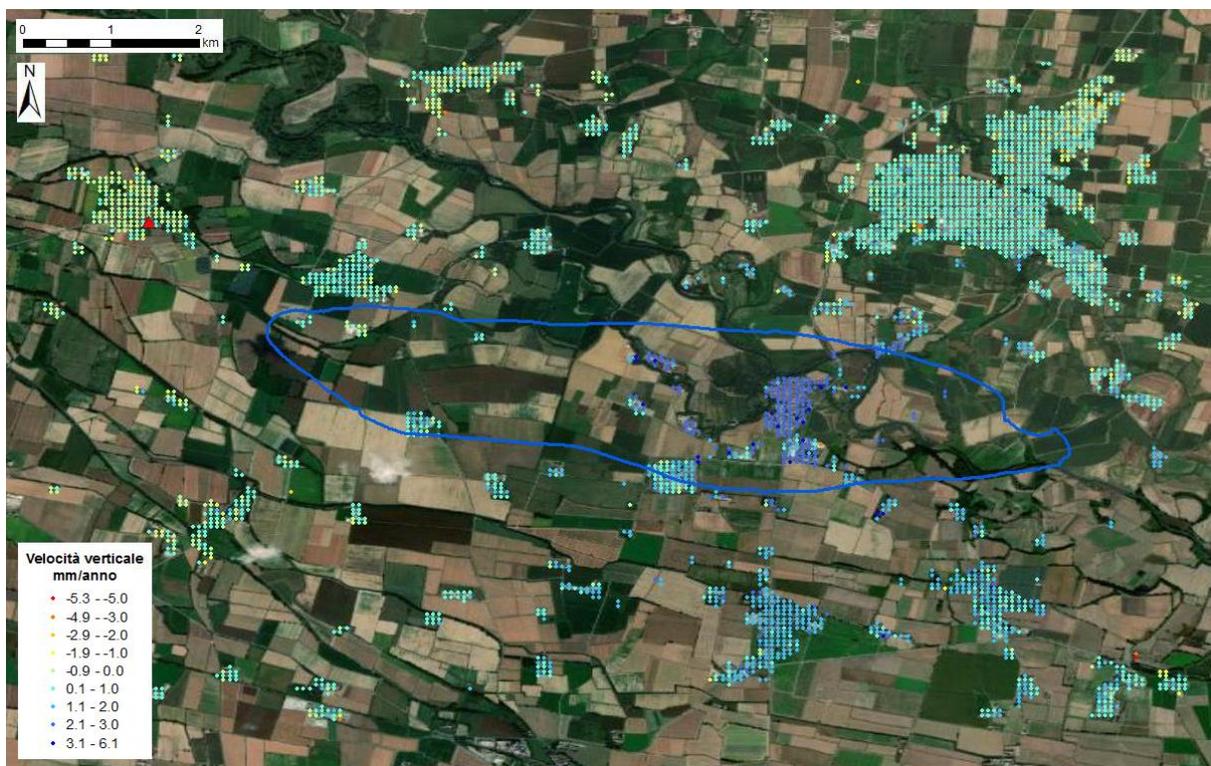


Fig. 35 Dati Local scomposti secondo il vettore verticale. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso).

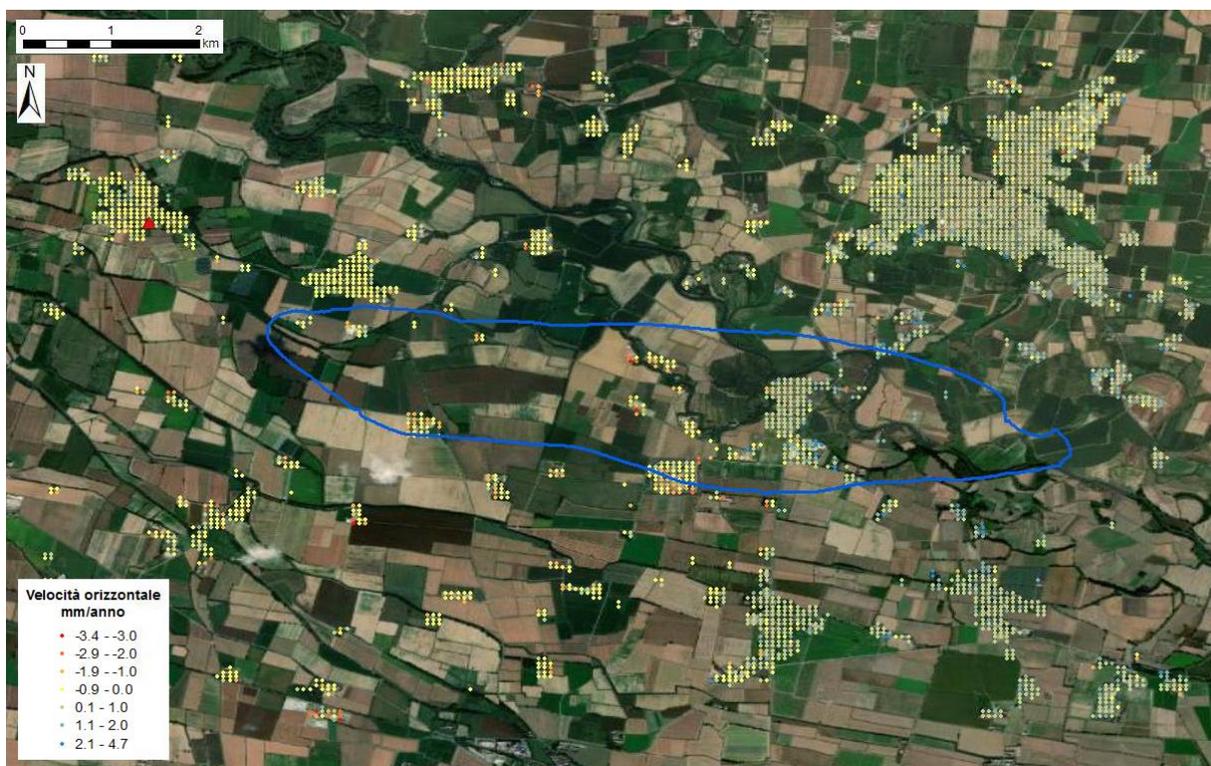


Fig. 36 Dati Local scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso).

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 che di distribuzione spaziale delle deformazioni (Fig. 37 e Fig. 38). Come da aspettative, risultano maggiormente evidenti i fenomeni deformativi ciclici nell'area del giacimento legati allo stoccaggio in quanto l'analisi Sentinel fornisce informazioni sul periodo in cui il campo è stato avviato lo stoccaggio (2016-2020).

Per l'analisi di correlazione con la curva del volume di gas movimentato del campo di Bordolano, 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. 37.



Fig. 37 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.

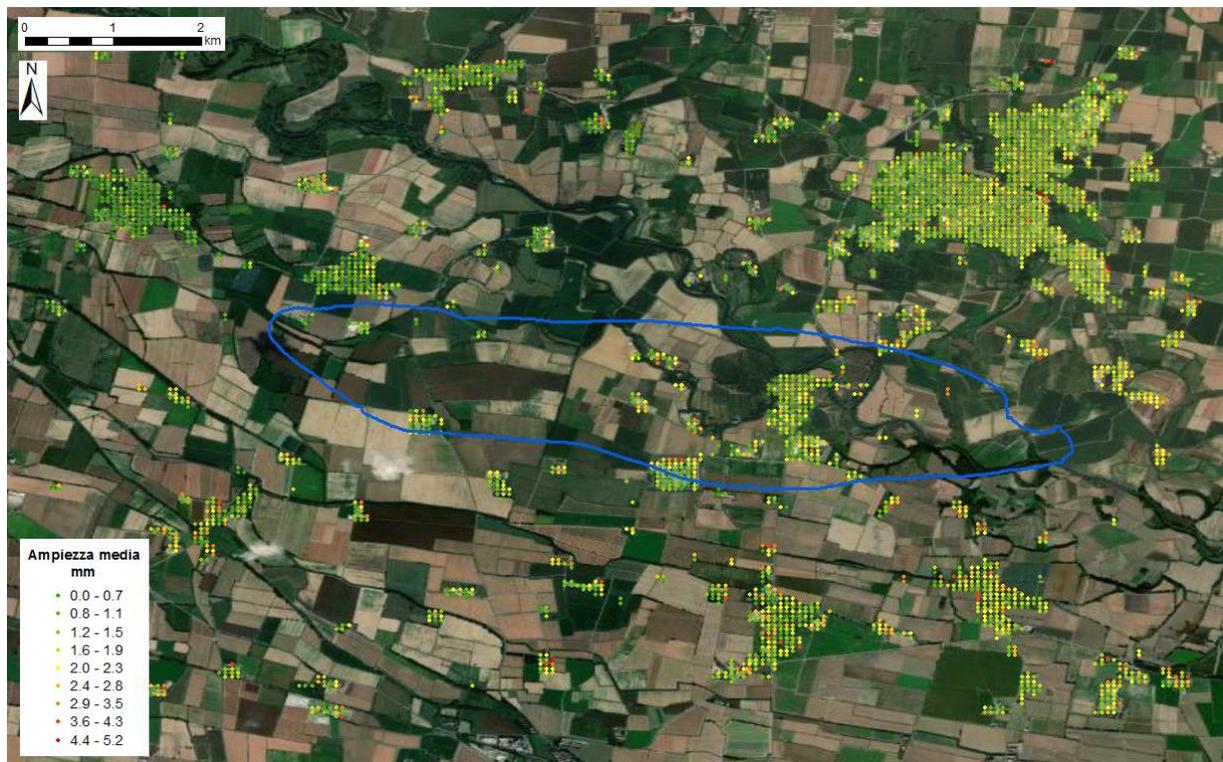


Fig. 38 Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente orizzontale dei PS Local.

Nelle figure seguenti (da Fig. 39 a Fig. 44) 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 del volume di gas movimentato del campo di Bordolano sia con i corrispondenti punti scelti per l'analisi Radarsat (in azzurro).



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 39 DI 44

Punto interno – 0000w8

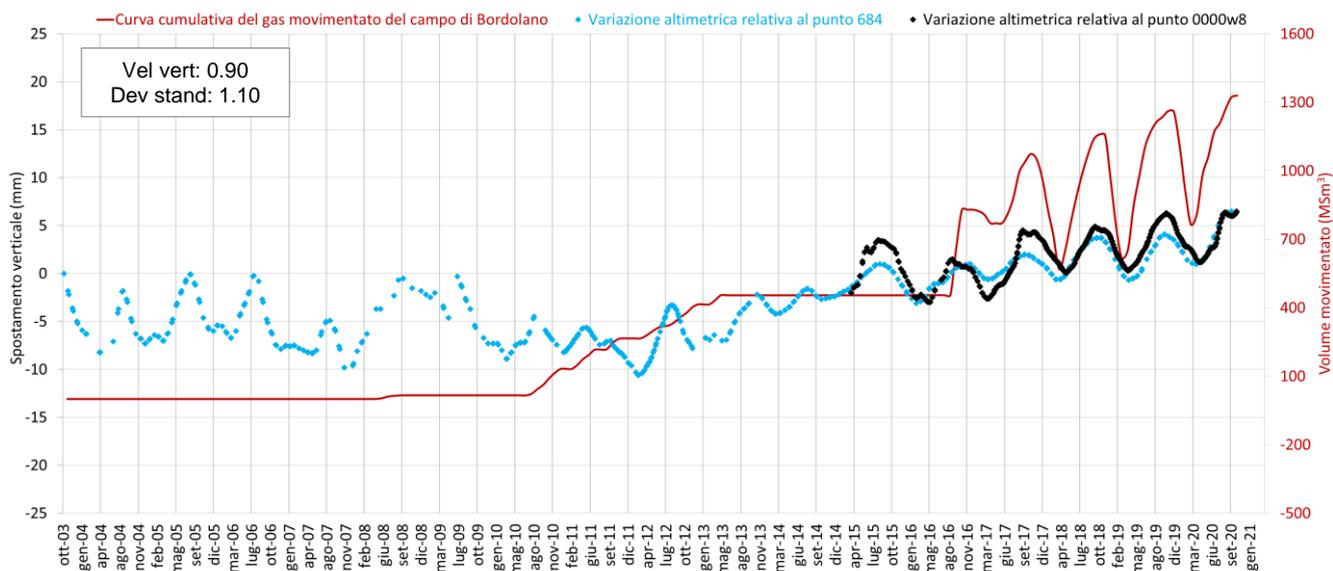


Fig. 39 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 684 (Radarsat) e 0000w8 (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.

Punto interno – 0000wG

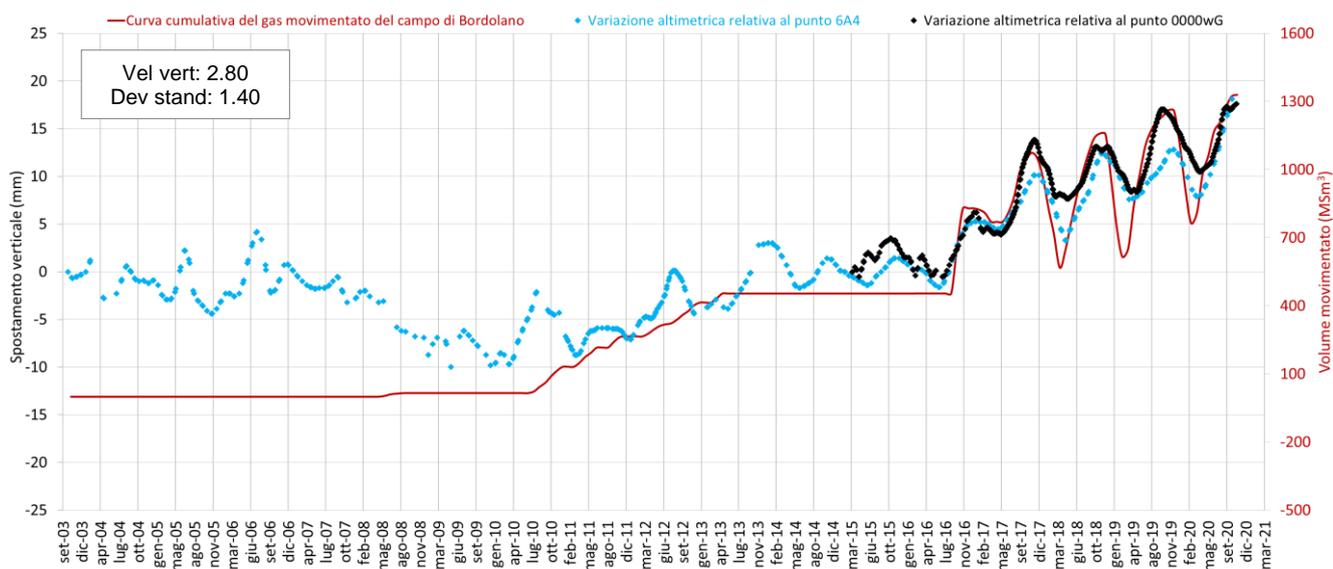


Fig. 40 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 6A4 (Radarsat) e 0000wG (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 40 DI 44

Punto interno – 0000vQ

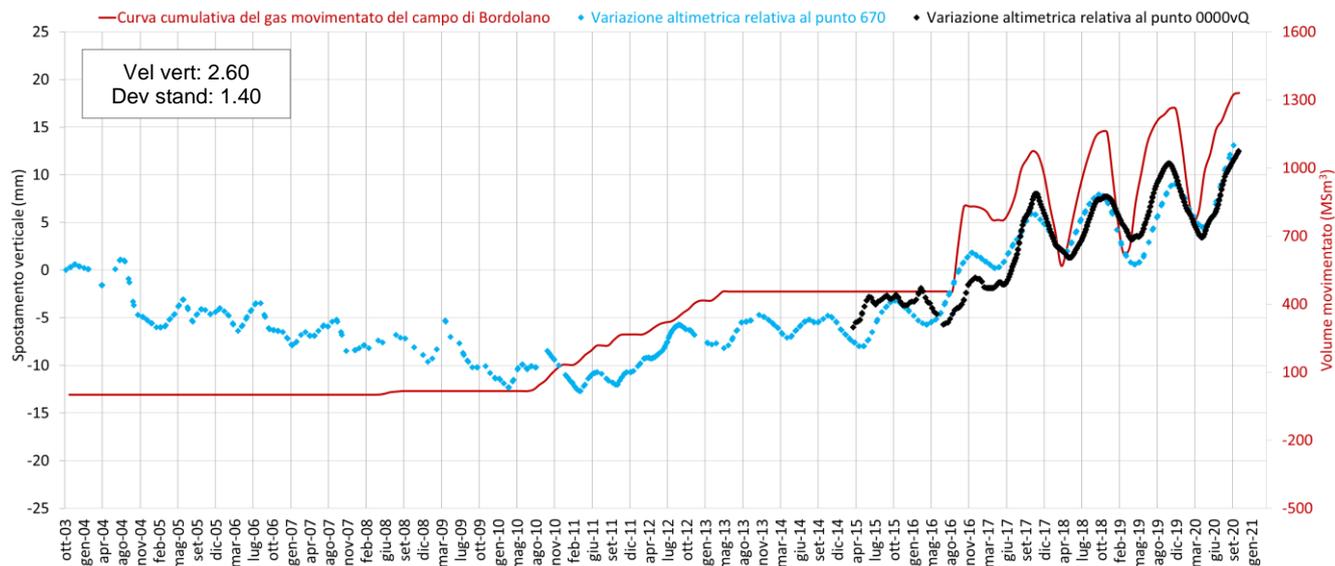


Fig. 41 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 670 (Radarsat) e 0000vQ (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.

Punto esterno – 0000Bg

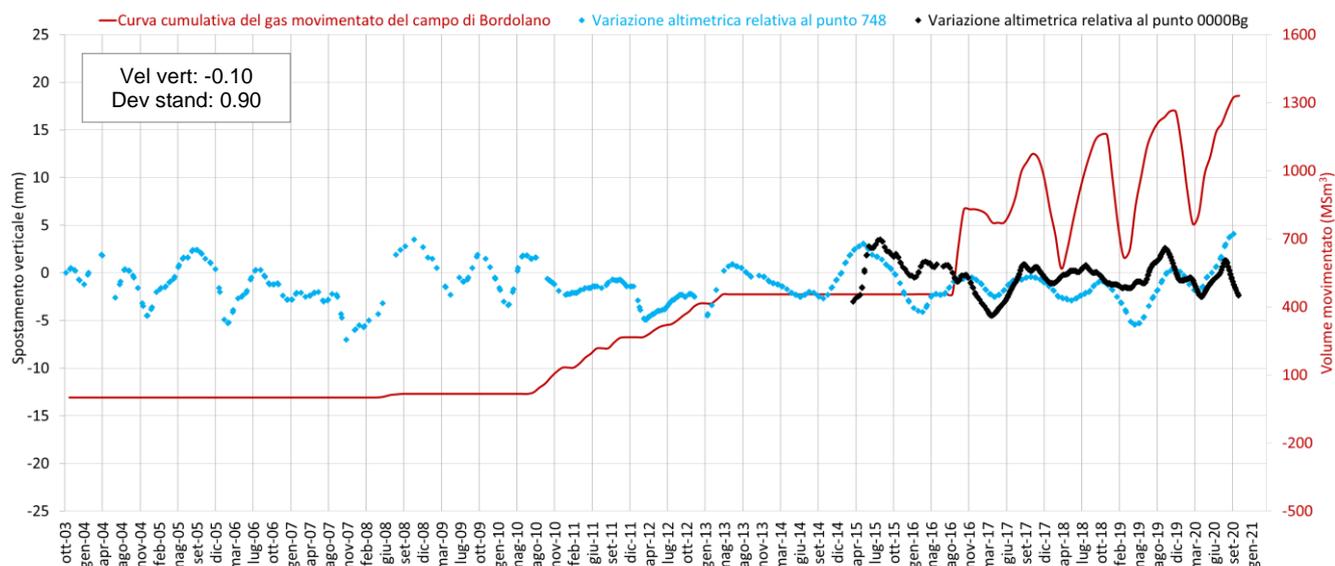


Fig. 42 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 748 (Radarsat) e 0000Bg (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 41 DI 44

Punto esterno – 0000lj

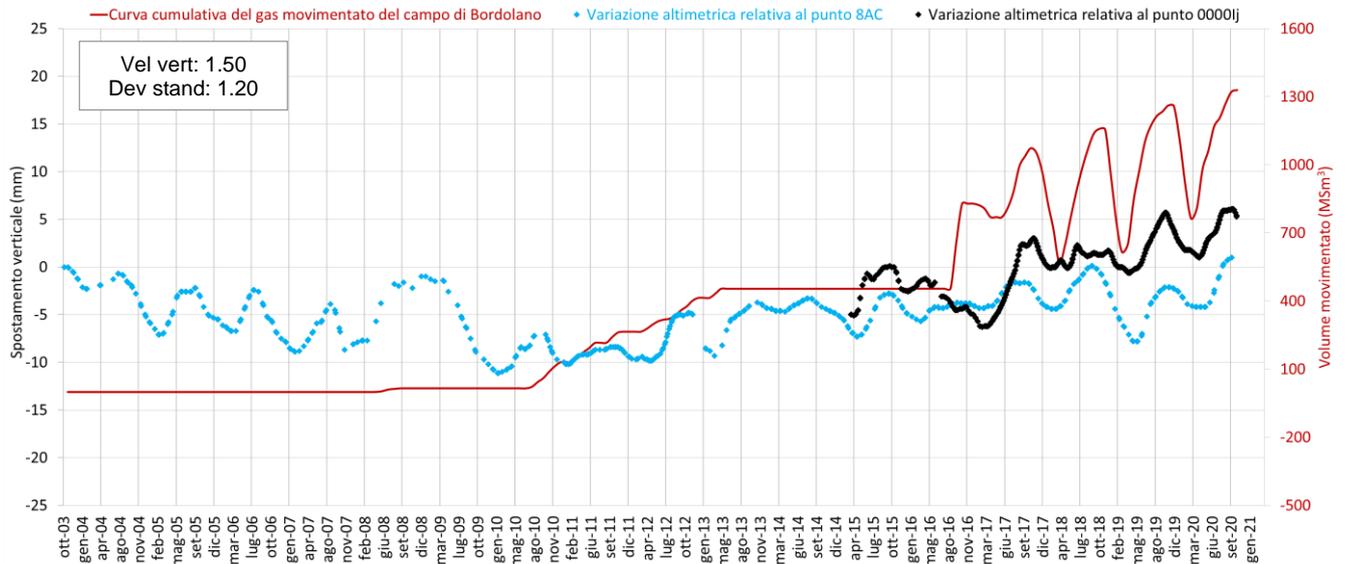


Fig. 43 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 8AC (Radarsat) e 0000lj (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.

Punto esterno – 0000dF

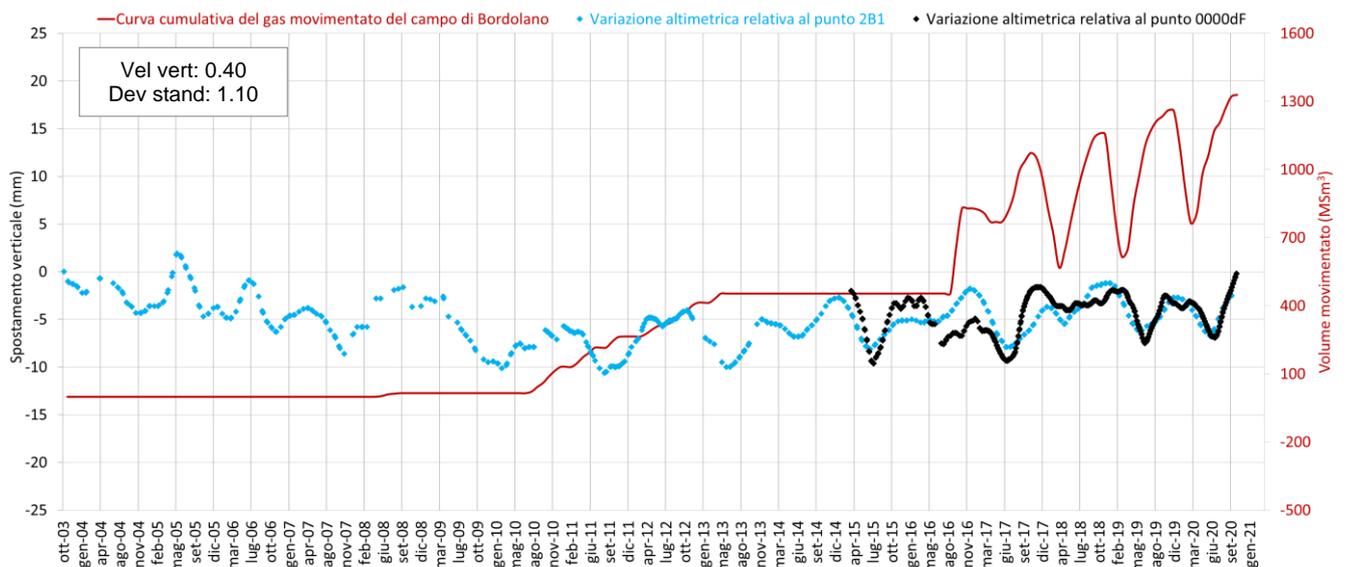


Fig. 44 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti 2B1 (Radarsat) e 0000dF (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 42 DI 44

L'analisi dei punti scelti all'interno del limite del giacimento evidenzia una buona correlazione tra le variazioni altimetriche registrate dal dato Sentinel e la curva del gas movimentato in coerenza con quanto si osserva negli altri campi di stoccaggio gestiti da Stogit, con ampiezze che si attestano mediamente tra 5 e 10 millimetri; in accordo con Radarsat, per il punto 0000w8, ubicato in una zona marginale e molto vicino al limite del giacimento, tale correlazione risulta meno evidente (Fig. 45).

I punti esterni non mostrano invece alcuna correlazione con l'attività di stoccaggio (Fig. 46). In accordo con l'analisi della distribuzione delle velocità medie e con l'analisi Radarsat, l'effetto dello stoccaggio in superficie nella zona a sud-est del campo diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi ad una distanza di circa 1.5 km dal limite del giacimento, come evidenziato dal punto 0000lj.

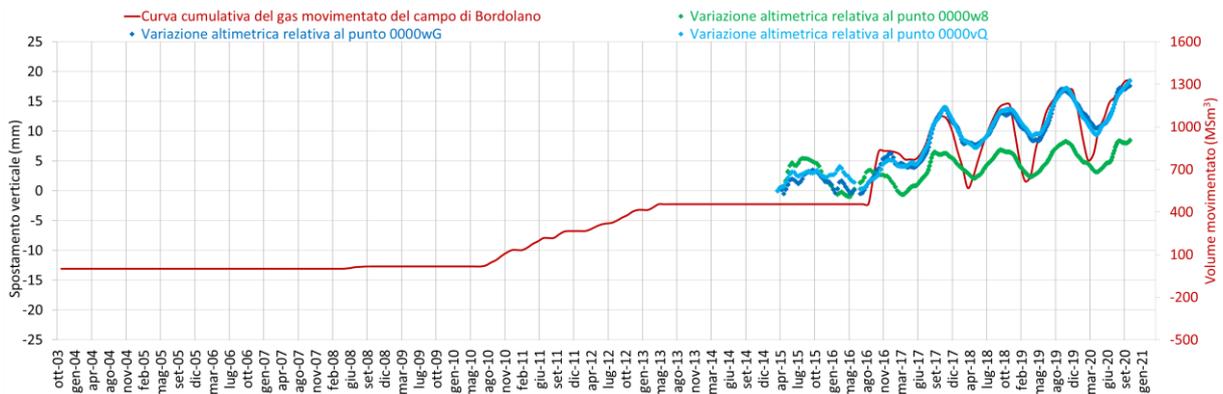


Fig. 45 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti interni.

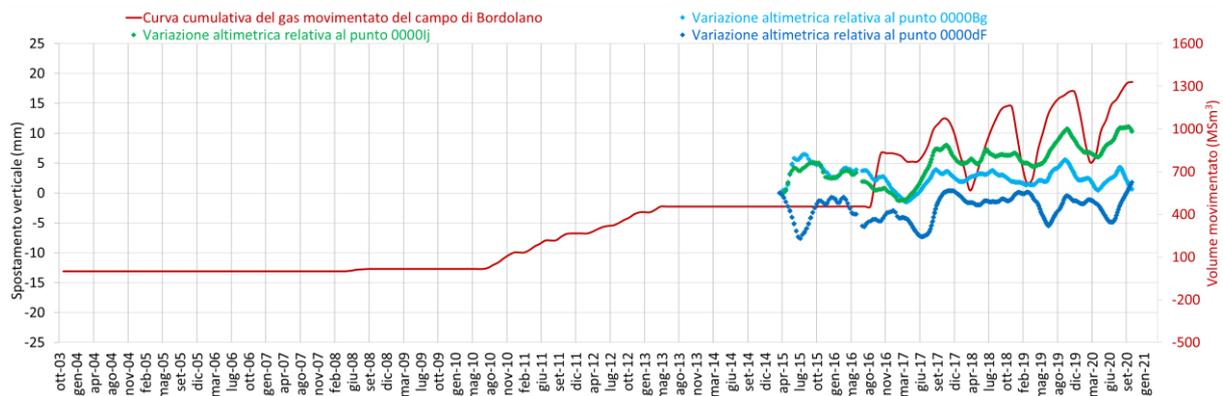


Fig. 46 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti esterni.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 43 DI 44

4. Conclusioni

Il dataset Radarsat, che consente di eseguire un monitoraggio pregresso fino al 2003, rappresenta il principale di riferimento per l'analisi. L'analisi integrata dei dataset Radarsat e Sentinel consente, da un lato, di estendere il monitoraggio fino al 2003, e dall'altro, di analizzare in maniera dettagliata la storia recente dell'area (ultimi 5 anni), ossia da quando è stato avviato lo stoccaggio, sia in termini di frequenza temporale delle acquisizioni sia in termini di copertura areale del dato con un aumento dei punti di misura.

Analisi Regionale

L'analisi a scala regionale evidenzia una sostanziale stabilità ed è contrassegnata da spostamenti nell'ordine di pochi mm/anno, ad eccezione dell'estremità sud-ovest dell'area di indagine, molto distante dal sito di stoccaggio di Bordolano, caratterizzata da fenomeni di subsidenza che superano i -5 mm/anno. Andando ad evidenziare i soli punti situati entro i limiti definiti dalla proiezione in superficie del giacimento di Bordolano, risulta un valore medio di velocità verticale pari a +0.44 mm/anno. Tale valore è nel complesso in linea con il trend regionale stimato con le velocità verticali assolute effettuate del CGPS installato presso Crema (-0.24 mm/anno).

Analisi Locale

L'analisi a scala locale effettuata sull'area occupata dal giacimento di Bordolano evidenzia valori medi di velocità verticale di +0.42 mm/anno, confermando il trend di leggero innalzamento per i punti ubicati entro l'area del giacimento. L'osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali evidenzia una sostanziale stabilità dell'area, se analizzata sull'intero periodo.

Analisi delle serie storiche

I punti scelti all'interno dei limiti del giacimento mostrano una buona correlazione con la curva del gas movimentato, e registrano un lieve trend di innalzamento a partire dal periodo di iniezione del cushion gas. I due punti interni ubicati in corrispondenza del culmine strutturale registrano le oscillazioni legate ai cicli di stoccaggio in accordo con quanto si osserva negli altri campi di stoccaggio gestiti da Stogit, con ampiezze che si attestano mediamente tra 5 e 10 millimetri. Per il punto 684, ubicato in una zona marginale e molto vicino al limite del giacimento, tale correlazione risulta meno evidente. Al contrario, i punti esterni non mostrano alcuna correlazione ed evidenziano una generale stabilità. Nel resto dell'area monitorata si registrano oscillazioni di ampiezza contenuta (mediamente di circa 5 mm) e di periodicità variabile poco significative dal punto di vista geodinamico e che rientrano nel margine di tolleranza del metodo di misura e del sistema di elaborazione dati.

L'analisi evidenzia che l'effetto in superficie dello stoccaggio tende ad esaurirsi in prossimità del limite del giacimento, ad eccezione dell'area immediatamente a sud-est in cui diminuisce gradualmente di entità



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio

Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2020

PAG 44 DI 44

fino ad esaurirsi ad una distanza di circa 1.5 km dal limite del giacimento stesso come evidenziato dalla serie storica del punto 8AC.

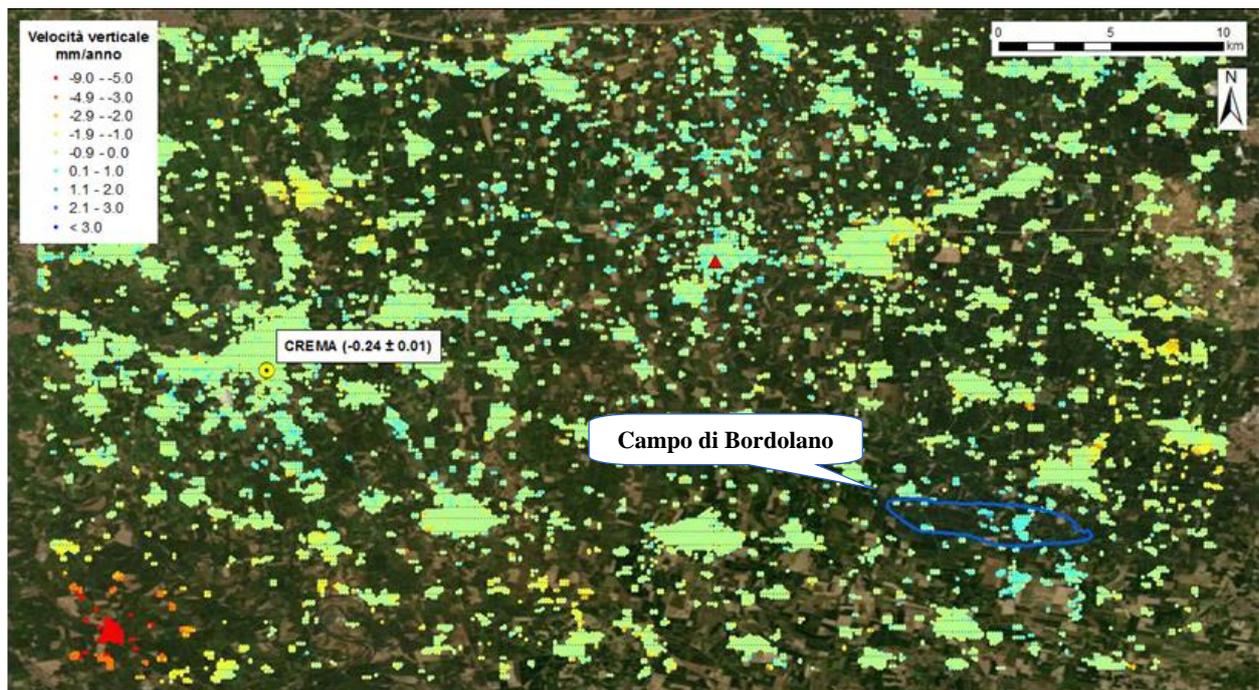
La continuità del monitoraggio nei prossimi anni fornirà maggiori indicazioni in merito alla correlazione delle serie storiche dei punti con l'attività di stoccaggio appena avviata.

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 dei volumi di gas movimentato.

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 del giacimento.

La Fig. 47 riassume i risultati dell'analisi SAR condotta sul campo di Bordolano.



Variazioni Altimetriche

Trend regionale
(valori CGPS Crema)

-0.24 mm/anno

Relative rispetto al
trend regionale

~ (+0.44 mm/anno)

Correlazione con il ciclo di stoccaggio

Ampiezza media
delle curve

~ 5-10 mm

Correlazione (con curva
gas movimentato)

BUONA

Fig. 47 In alto i dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati, con ubicazione del CGPS di Crema, del punto di riferimento (triangolino rosso) e del limite del giacimento di Bordolano. In basso i risultati dell'analisi SAR eseguita sul campo di Bordolano.