

	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date February 2011	Doc. N°. GEOD_1102_d02	Rev. 0	Sheet 1	Of 27
--	--	-----------------------	---------------------------	-----------	------------	----------

## Interferometria differenziale SAR e Tecnica PS

### Campo di stoccaggio di

### SERGNANO

**(Aggiornamento dati Ottobre 2010)**

0		A. BAGLIANI		A. MOSCONI	Feb. 2011
<b>REV.</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>PREPARED BY</b>	<b>CHECKED BY</b>	<b>APPROVED BY</b>	<b>DATE</b>

	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date February 2011	Doc. N°. GEOD_I102_d02	Rev. 0	Sheet 2-2	Of 27
--	--	-----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

## **ESPL - GEOL GEOD**

GEODYNAMICS Department

Autore:

Andrea Bagliani

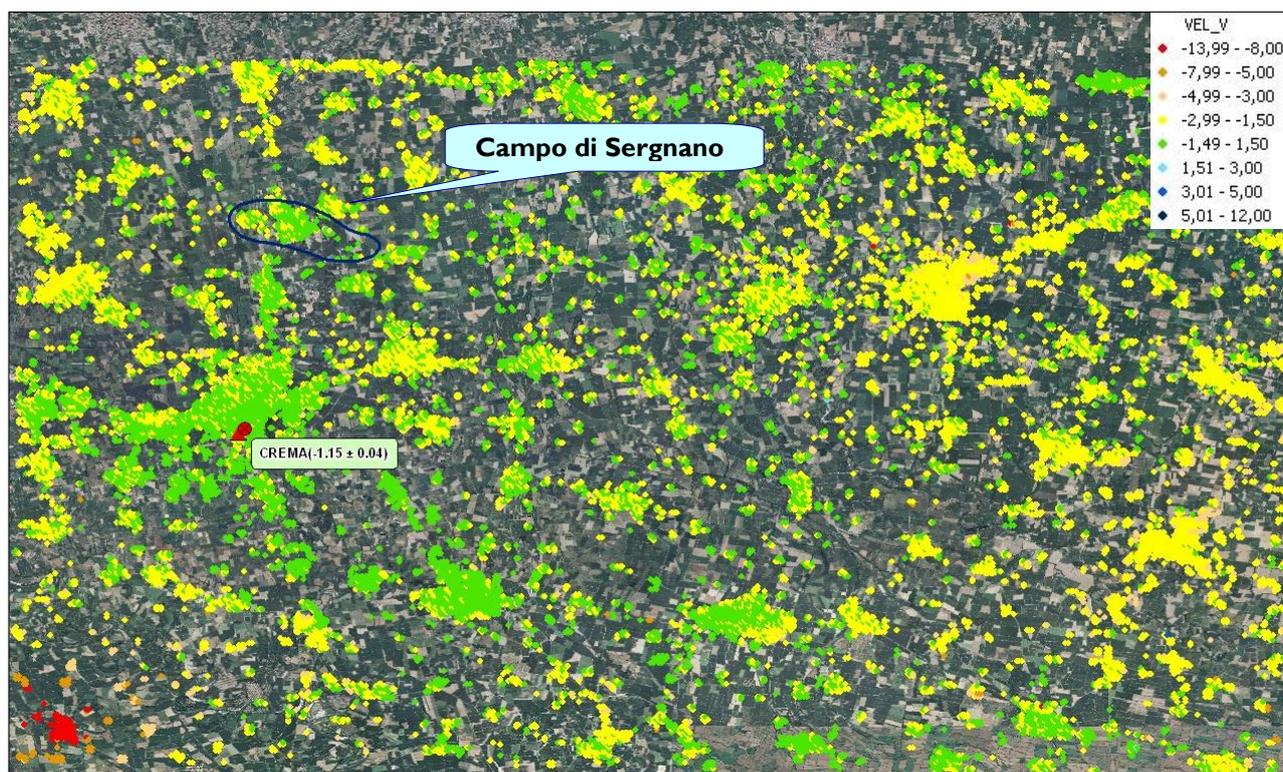
Febbraio 2011

## Indice

	<b><u>Conclusioni</u></b> .....	2-4
<b>1 - INTRODUZIONE</b> .....		<b>2-5</b>
<i>La Tecnica PS (PSInSAR™)</i> .....		2-5
<i>Il brevetto della Tecnica PS</i> .....		2-6
<i>Recenti sviluppi nella tecnologia: analisi di non linearità stagionali</i> .....		2-6
<i>Tipologia delle analisi PS proposte</i> .....		2-6
<b>2 - ANALISI DEL CAMPO DI SERGNANO</b> .....		<b>2-8</b>
<i>Dati GPS</i> .....		2-8
<i>Analisi REGIONAL</i> .....		2-10
<i>Analisi LOCAL</i> .....		2-13
<i>Analisi delle serie storiche dei punti scomposti</i> .....		2-18
Punto interno al giacimento – <u>001AU</u> .....		2-20
Punto interno al giacimento – <u>001VY</u> .....		2-21
Punto esterno al giacimento – <u>00257</u> .....		2-22
Punto esterno al giacimento – <u>000D2</u> .....		2-23
Punto esterno al giacimento – <u>002NV</u> .....		2-24
Punto esterno al giacimento – <u>0019T</u> .....		2-25
<b>3 - ANALISI DELLE ELABORAZIONI</b> .....		<b>3-27</b>
<i>Analisi REGIONAL</i> .....		3-27
<i>Analisi LOCAL</i> .....		3-27
<i>Analisi delle serie storiche</i> .....		3-27

## Conclusioni

L'analisi interferometrica dei dati Radarsat attraverso la tecnica dei Permanent Scatterers sul campo di Sergnano per il periodo Ottobre 2003 – Ottobre 2010 evidenzia una velocità verticale media all'interno del giacimento coerente con quanto evidenziato dal CGPS di Crema.



Variazioni Altimetriche +/- (mm/anno)		Correlazione con il ciclo di stoccaggio		
Trend regionale (valori CGPS Crema)	Relative rispetto al trend regionale	Ampiezza delle curve	SHIFT Temporale	Correlazione (con la curva di stoccaggio)
<b>- 1.15 mm/y</b>	<b>~ (- 0.3 mm/y)</b>	<b>~ 10-12 mm</b>	<b>&lt; 30 gg</b>	<b>ELEVATA</b>

Le serie storiche dei punti selezionati all'interno del giacimento presentano un'elevata correlazione con la curva cumulativa di stoccaggio, con oscillazioni medie di circa 10 millimetri.

Tale correlazione non viene riscontrata per le serie storiche dei punti selezionati all'esterno dei limiti di giacimento per i quali le deformazioni verticali analizzate non sembrano essere in alcun modo associabili all'attività di stoccaggio.

## I - Introduzione

### La Tecnica PS (PSInSAR™)

La Tecnica PS, sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano (Brevetto Italiano N. MI99A001154 e sue estensioni internazionali), è uno strumento dalle caratteristiche uniche per l'analisi di deformazioni superficiali quali subsidenze, frane, faglie sismiche e per la misurazione di spostamenti di singoli edifici.

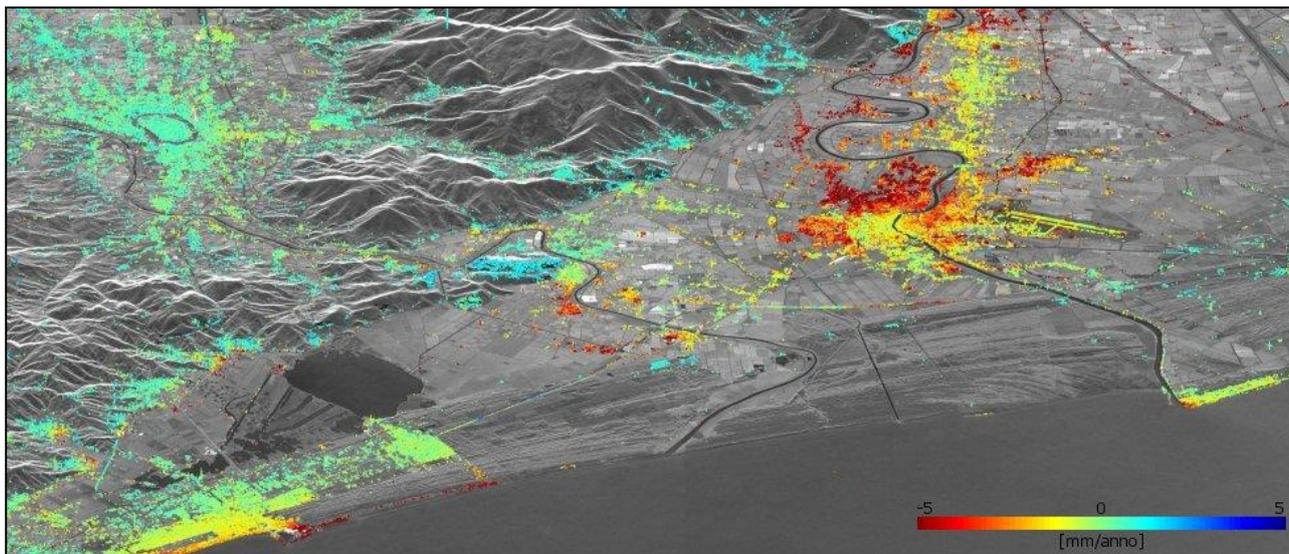


Fig.1 **Esempi di subsidenza nell'area di Pisa.**

L'analisi di dati acquisiti ripetutamente nel tempo su una stessa area di interesse da sensori radar satellitari consente l'individuazione di alcuni bersagli al suolo (denominati PS) su cui risultano possibili misure di spostamento estremamente accurate.

L'idea di base è semplice: il radar ad ogni acquisizione misura la distanza sensore-bersaglio al suolo. Avendo a disposizione sequenze di immagini sulla stessa zona e lungo la stessa orbita registrate in istanti di tempo successivi, è possibile mettere in evidenza (almeno per certi oggetti) l'evoluzione di eventuali spostamenti. I PS corrispondono solitamente a manufatti, parti di edifici, elementi metallici, ma anche rocce affioranti od altri elementi naturali possono mostrare caratteristiche tali da renderne possibile il monitoraggio. L'elevata densità di punti di misura, soprattutto in corrispondenza di centri abitati (densità oltre 500 PS/km<sup>2</sup>), ha permesso di evidenziare i possibili impieghi della Tecnica PS legati al monitoraggio dei fabbricati ed al controllo della stabilità di singole strutture. Le caratteristiche peculiari della Tecnica PS, 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 di dati di ineguagliabile valore, mettono in luce la complementarità del suo utilizzo con tecniche ormai consolidate quali la livellazione ottica e le misurazioni GPS.

	eni S.p.A. e&p division	Date February 2011	Doc. N°. GEOD_I102_d02	Rev. 0	Sheet 2-6	Of 27
--	----------------------------	-----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

## Il brevetto della Tecnica PS

Frutto di un lungo cammino di ricerca svolto presso il Dipartimento di Elettronica del Politecnico di Milano, l'algoritmo di elaborazione di dati radar satellitari per l'individuazione e la stima dei moti di diffusori permanenti, denominato comunemente "Tecnica PS" è stato brevettato in Italia nel 1999. Il titolare del brevetto è il Politecnico di Milano e i suoi inventori sono il Prof. Fabio Rocca, il Prof. Claudio Prati e l'Ing. Alessandro Ferretti.

Successivamente sono state approvate le estensioni presso l'Unione Europea e gli Stati Uniti d'America e sono in via di approvazione definitiva quelle in Australia e Giappone.

## Recenti sviluppi nella tecnologia: analisi di non linearità stagionali

Il nuovo software utilizzato nel corso delle ultime consegne per STOGIT differisce dalle versioni precedenti per una innovativa procedura di stima e rimozione della componenti atmosferiche che, come noto, risulta uno dei punti chiave delle analisi PS.

In effetti, l'utilizzo del modello lineare utilizzato in sede di "svolgimento" delle fasi, comportava una significativa sottostima degli effetti di moto stagionali e non lineari.

Il nuovo algoritmo risulta particolarmente vantaggioso qualora le componenti di moto siano bene rappresentabili come somma di una funzione polinomiale (tipicamente di ordine inferiore al quarto) più una componente stagionale (ovvero una sinusoidale con periodo annuale). Nelle versioni precedenti del software alcune componenti di moto che mostravano una forte correlazione spaziale ed un andamento spiccatamente non-lineare potevano essere sottostimate in quanto parzialmente interpretate come componenti atmosferiche.

E' stata inoltre ulteriormente sviluppata la procedura per la selezione del caposaldo radar di riferimento, consentendo all'operatore (pur senza alcuna informazione a priori sulla distribuzione e tipologia di moto cui è soggetta l'area di interesse) di valutare più opzioni e scegliere così quella più consona all'applicazione.

## Tipologia delle analisi PS proposte

Le analisi proposte sono:

**LOCAL PS Analysis** : indagini locali che mirano all'estrazione del massimo contenuto informativo dai dati radar e si applicano ad aree di dimensioni limitate.

Sono particolarmente indicate per lo studio di versanti in frana, per l'individuazione e la misura degli spostamenti di singole strutture quali dighe, condotte forzate o altri rilevati e per l'analisi della stabilità di singoli edifici. L'intervento dell'operatore è di fondamentale importanza per ottimizzare la scelta dei parametri dell'elaborazione e per analizzare in dettaglio i vari passi della catena di produzione in modo tale da poter rilevare informazione anche in presenza di disturbi non totalmente rimovibili.

	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date February 2011	Doc. N°. GEOD_I102_d02	Rev. 0	Sheet 2-7	Of 27
---	--	-----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

Poiché la quantità di dati da processare non è eccessiva, è possibile condurre analisi molto onerose da un punto di vista computazionale, quali la ricerca di moti non-lineari mediante l'utilizzo di modelli matematici complessi, oppure l'individuazione di PS con caratteristiche di stabilità variabili nel tempo (Semi-PS e Temp-PS).

Il dato contiene, oltre al trend di deformazione medio stimato su tutto il periodo di analisi, la totalità delle serie storiche estratte; se ne ricava estrema utilità per l'analisi dell'evoluzione del moto nel tempo, potendo porre in evidenza il valore della dimensione temporale che il dato contiene.

**REGIONAL PS Analysis** : l'elaborazione a livello territoriale si presenta come uno strumento operativo molto utile e dalle straordinarie potenzialità per caratterizzare fenomeni di deformazione estesi quali subsidenze e faglie sismiche.

Ad oggi sono le analisi maggiormente diffuse e sono già state utilizzate con successo su decine di migliaia di Km<sup>2</sup> in varie tipologie di ambiente: da aree alpine o appenniniche a deserti, da pianure ad aree densamente urbanizzate.

La quantità di dati da processare è decisamente cospicua e la catena di produzione è progettata in modo tale che l'elaborazione sia semi-automatica. L'intervento dell'operatore viene limitato alla definizione dei principali parametri e ai controlli di qualità sui passi intermedi.

La procedura utilizzata, fortemente automatizzata e corredata da una fitta rete di controlli di qualità, consente di estrarre misure di deformazione su aree molto estese.

## 2 - ANALISI DEL CAMPO DI SERGNANO

### Dati GPS



Fig.2 **Ubicazione delle tre stazioni GPS appartenenti alla rete regionale di stazioni GNSS permanenti della Fondazione IREALP. In evidenza i limiti del campo di stoccaggio di Sergnano, oggetto del presente studio.**

Con lo scopo di ottenere valori di velocità verticali assoluti da utilizzare per la calibrazione del monitoraggio Radarsat, sono stati acquistati da “Fondazione IREALP” i dati relativi a tre stazioni GNSS appartenenti alla rete presente sul territorio regionale lombardo.

Le tre stazioni GPS, di cui sono stati stimati i movimenti di lungo periodo, dal 13 maggio 2005 al 9 ottobre 2010, sono situate in prossimità di edifici pubblici nei centri urbani di Milano, Dalmine e Crema.

I dati sono stati analizzati nell’ambito di una rete di riferimento costituita da nove stazioni IGS/EPN.

In particolare, il GPS utilizzato in questa relazione è installato sul tetto dell’Istituto per Geometri “Pacioli”, situato a Sud del centro di Crema (CR).

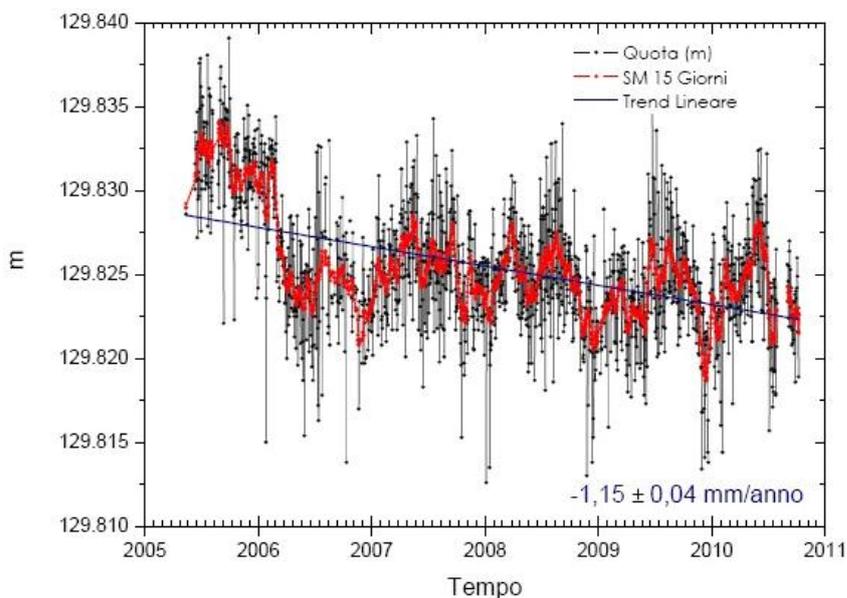


Fig.3 Localizzazione del GPS di Crema su ortofoto, particolare dell'antenna GPS e stima di velocità della componente verticale. Rappresentazione delle soluzioni giornaliere (punti neri) e di una soluzione smussata (linea rossa) ottenuta applicando una media a finestra mobile di ampiezza pari a 15 giorni. La retta blu indica la stima del trend lineare.

## Analisi REGIONAL

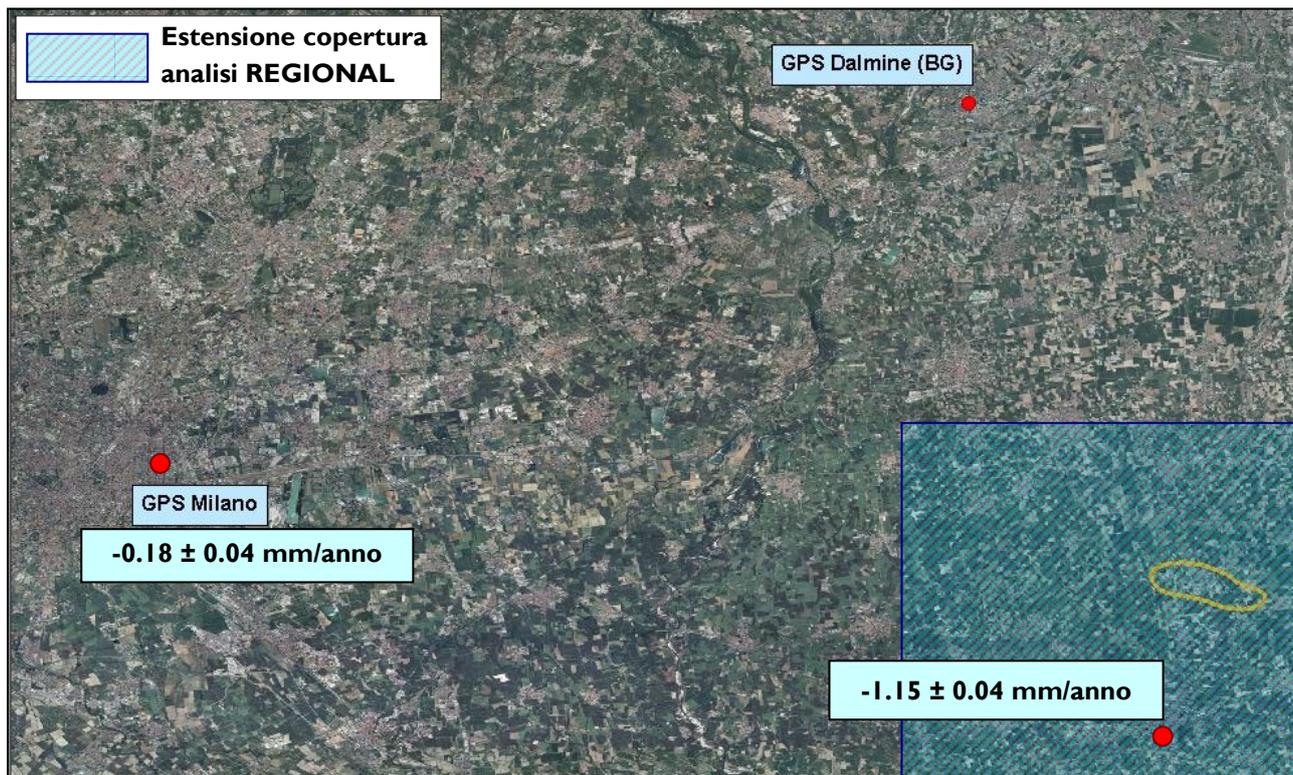


Fig.4 Localizzazione su ortofoto a colori dei GPS acquisiti. Il rettangolo a righe azzurre evidenzia l'estensione dell'analisi standard REGIONAL che interessa, oltre al giacimento di Sergnano, il GPS di Crema, i cui valori sono stati poi utilizzati per la calibrazione.

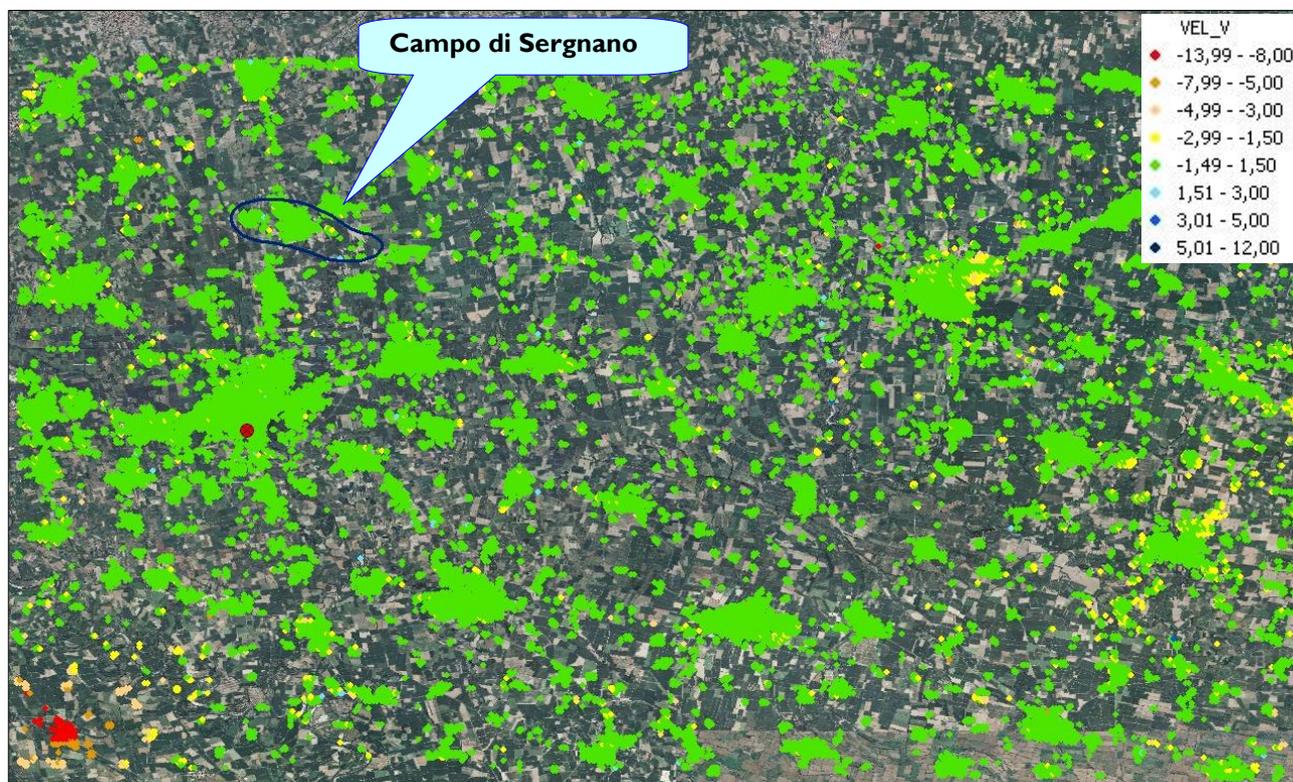


Fig.5 Visualizzazione dei dati dell'analisi REGIONAL in scala di colori. I valori presentati si riferiscono al solo vettore verticale risultato dalla scomposizione dei dati originali. In rosso la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione e del GPS di Crema utilizzato per la calibrazione del dataset.



Fig.6 *In rosa i punti dell'analisi REGIONAL scomposti secondo il vettore verticale, nell'immediato intorno del CGPS di Crema, con i relativi valori originali.*

Come si osserva in fig. 6, la media dei punti dell'analisi REGIONAL nell'intorno del CGPS di Crema genera un valore di circa 0.07 mm/y. Di conseguenza, la correzione da apportare ai valori scomposti REGIONAL risulta essere di -1.22 mm/y. 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.7 *Dati REGIONAL scomposti: in rosa i valori originali ed in verde quelli corretti di -1.22 mm/anno.*

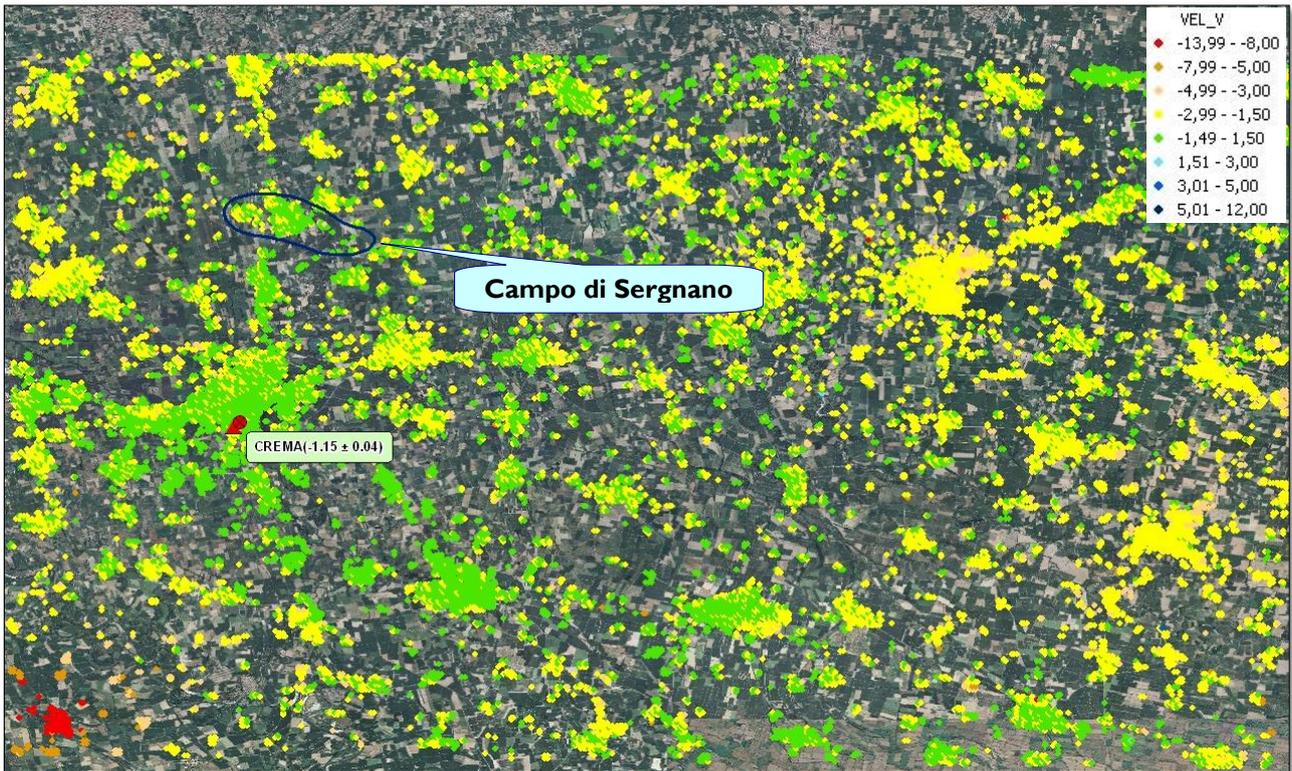


Fig.8 *Visualizzazione in scala di colore dei dati REGIONAL scomposti secondo il vettore verticale. In evidenza la localizzazione del GPS di Crema, utilizzato per la calibrazione dei valori Radarsat a scala regionale, e i limiti del giacimento di Sergnano.*

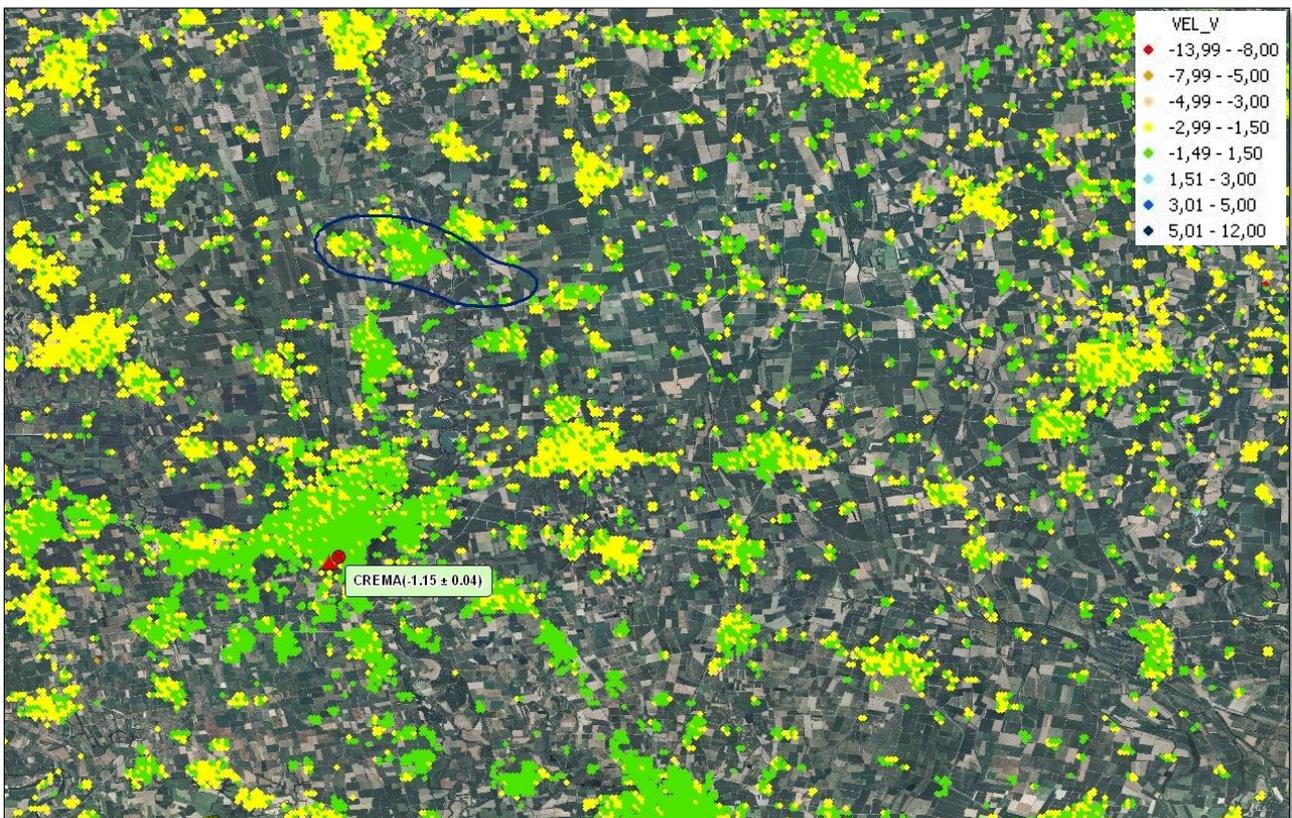


Fig.9 *Dettaglio dei valori di velocità verticali sull'area del giacimento di stoccaggio di Sergnano.*

## Analisi LOCAL

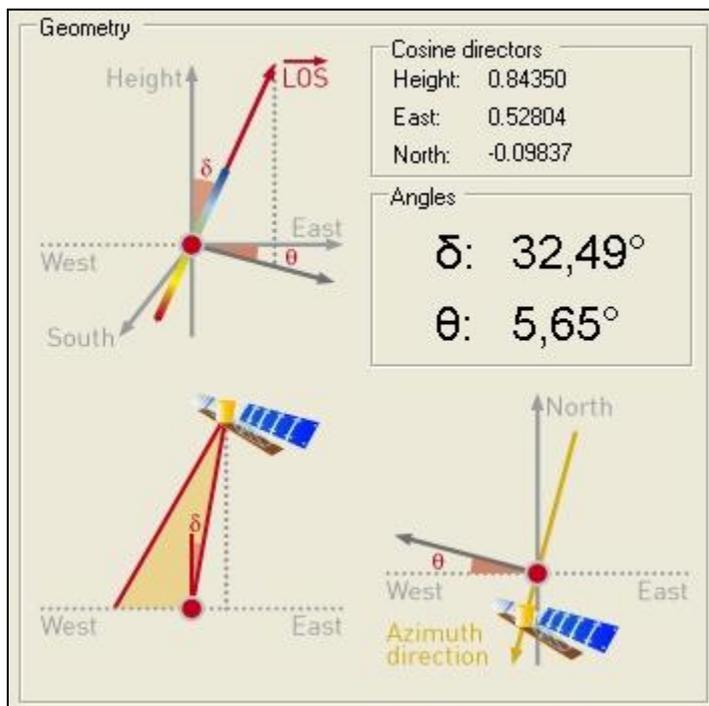


Fig.10 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo LOCAL per i PS riconosciuti in modalità discendente. In basso, i parametri dell'acquisizione e una rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.

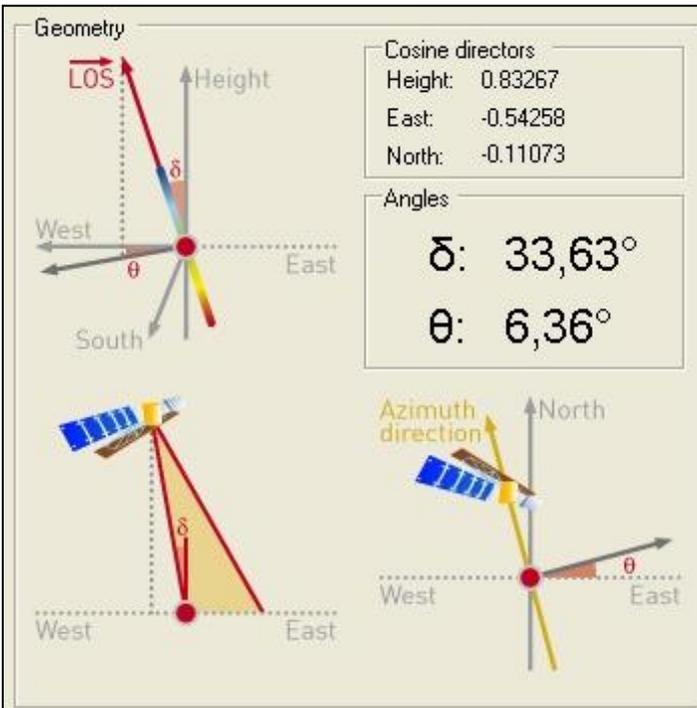


Fig. 11 **Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo LOCAL per i PS riconosciuti in modalità ascendente. In basso, i parametri dell'acquisizione e una rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.**

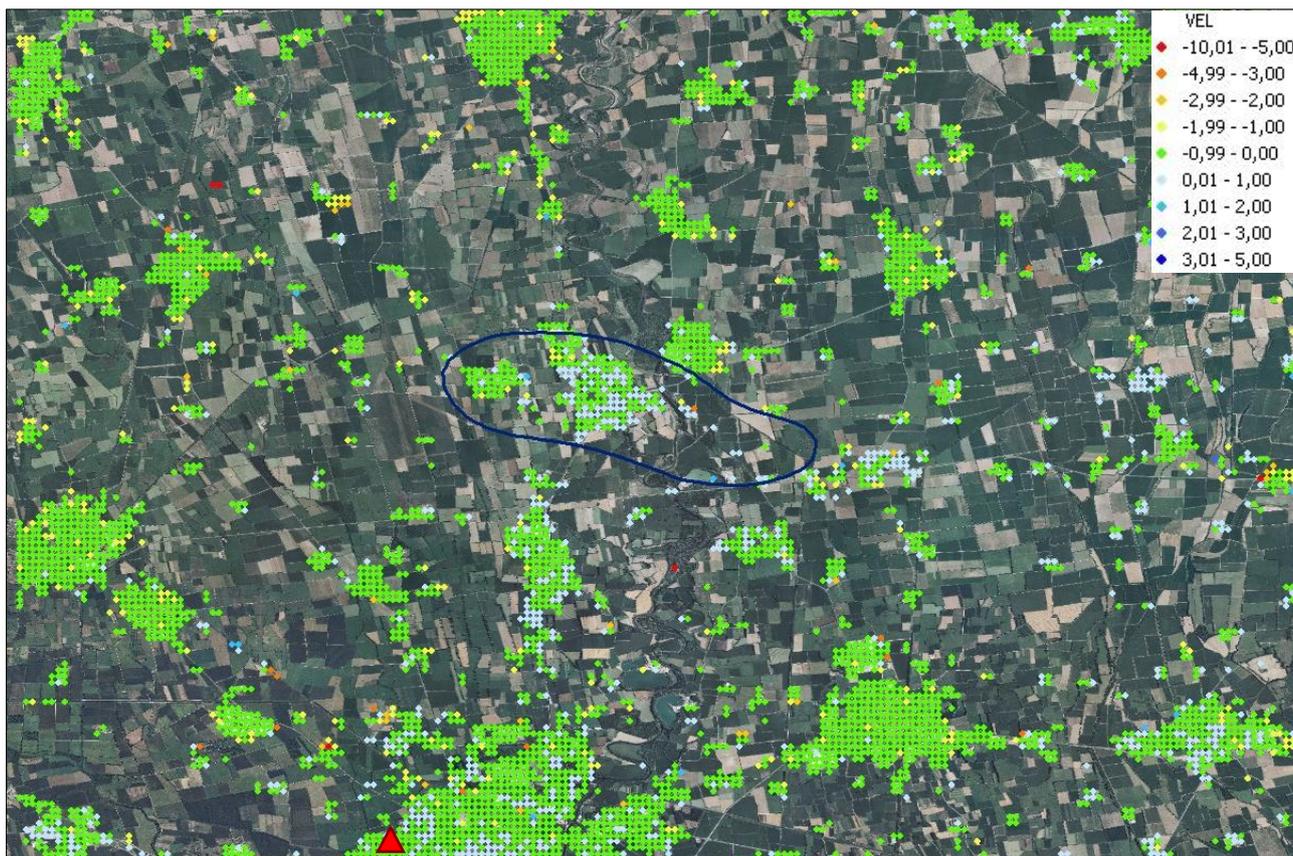


Fig.12 *Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti del rilievo LOCAL, così come registrati dal satellite prima della calibrazione.*

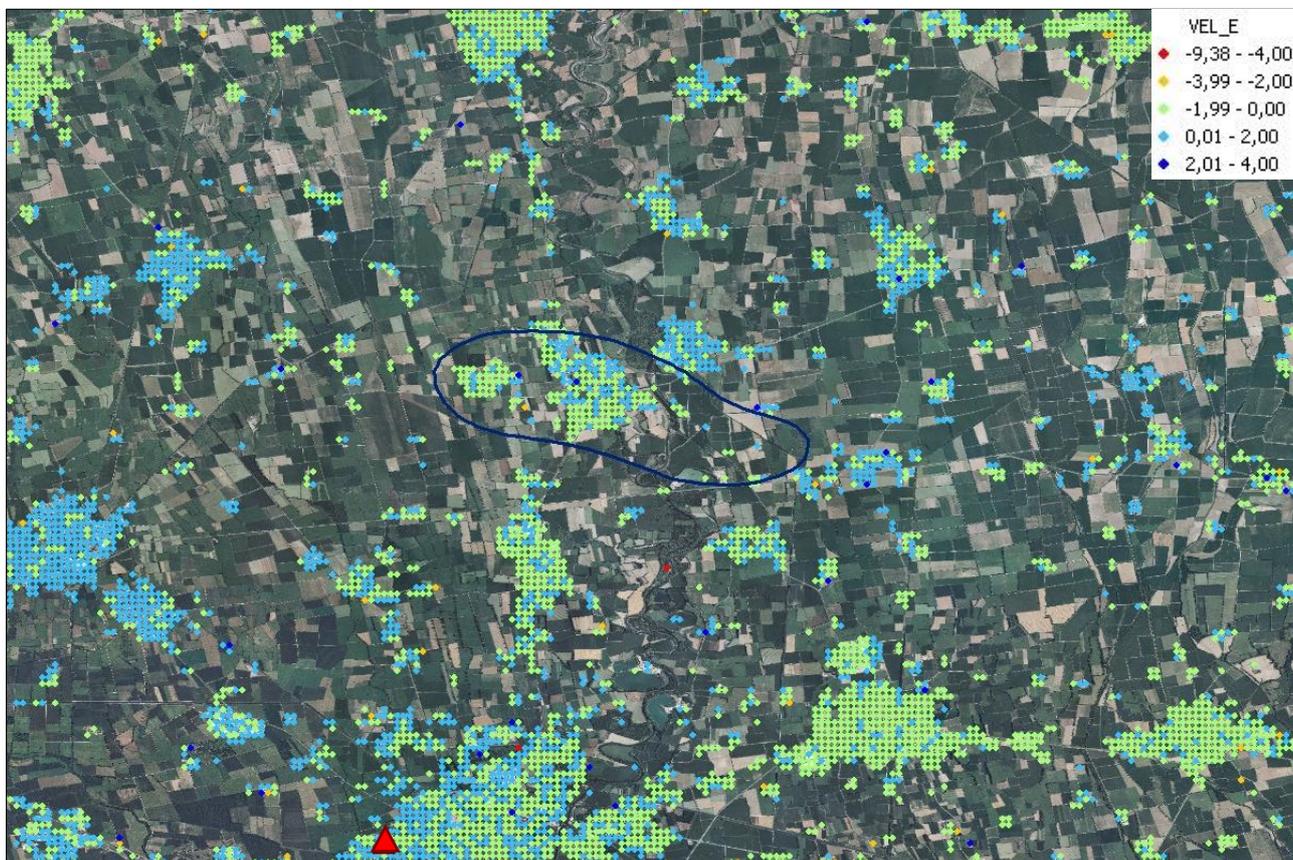


Fig.13 *Visualizzazione in scala di colori delle velocità orizzontali dei punti scomposti del rilievo LOCAL.*

I valori di velocità verticale di ogni singola cella si possono correlare ai dati ottenuti dalla scomposizione dei dati dell'analisi REGIONAL, a loro volta calibrati con il dato ottenuto dal CGPS di Crema.

Per ottenere un'uniformità di valori si è deciso di integrare le differenti analisi partendo dalle considerazioni fatte precedentemente e considerando attendibile il dataset dello studio REGIONAL calibrato per mezzo del valore del CGPS di Crema.

Come si può osservare in figura 14 la differenza tra il punto di riferimento dello studio LOCAL (punto supposto per convenzione con velocità uguale a zero) e la velocità verticale dei punti dell'analisi REGIONAL ad esso più vicini, risulta essere di circa -1,3 mm/anno.

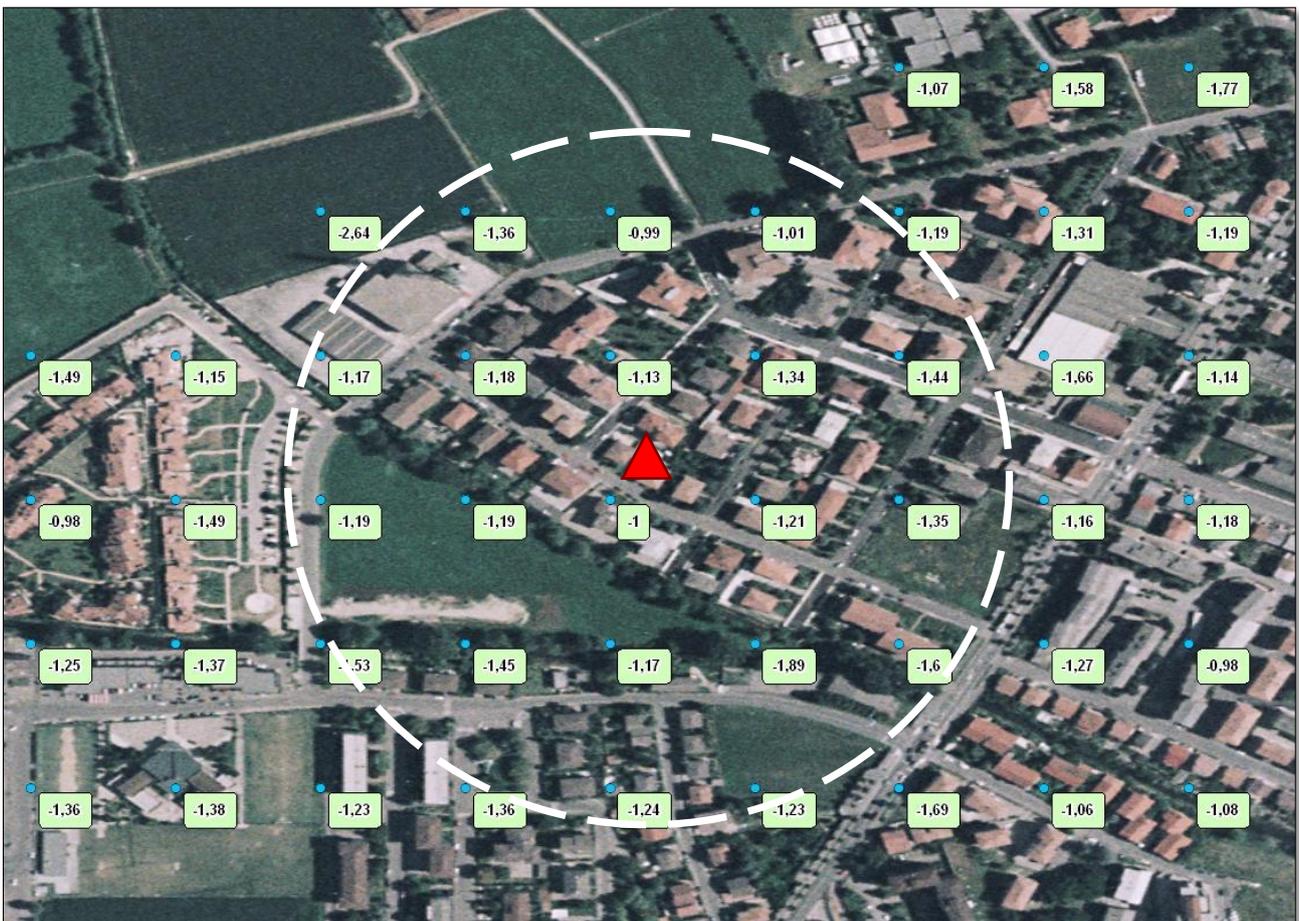


Fig.14 **Visualizzazione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione LOCAL con indicazione dei punti REGIONAL più vicini. L'area per la quale è stata calcolata la media delle velocità verticali è delimitata da un cerchio avente un raggio di circa 200 metri.**

Per effettuare l'integrazione tra i due studi è stato quindi sommato questo valore a tutti i punti dell'analisi Advanced (fig. 15).



Fig.15 **Dati LOCAL scomposti: in rosa i valori originali ed in verde quelli corretti di -1.3 mm/anno.**

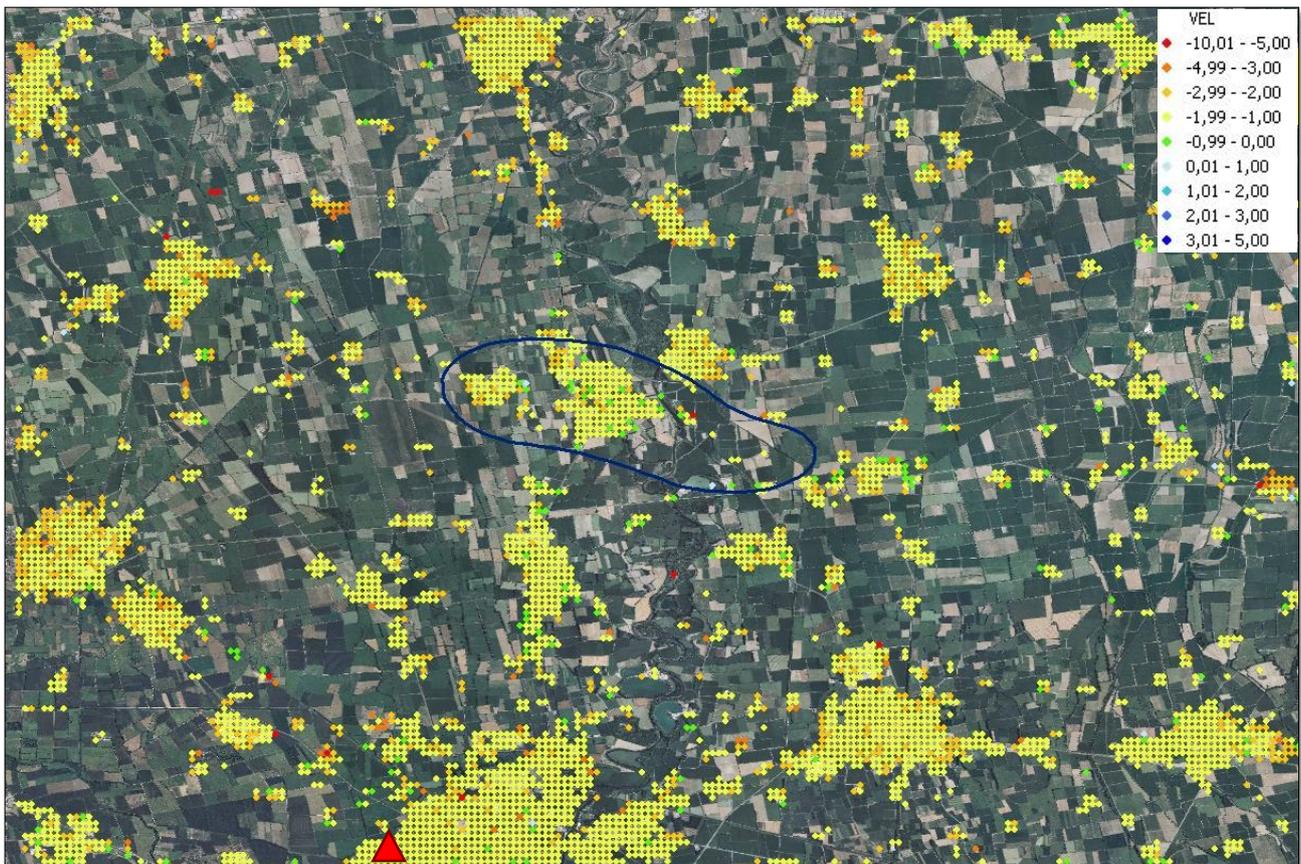
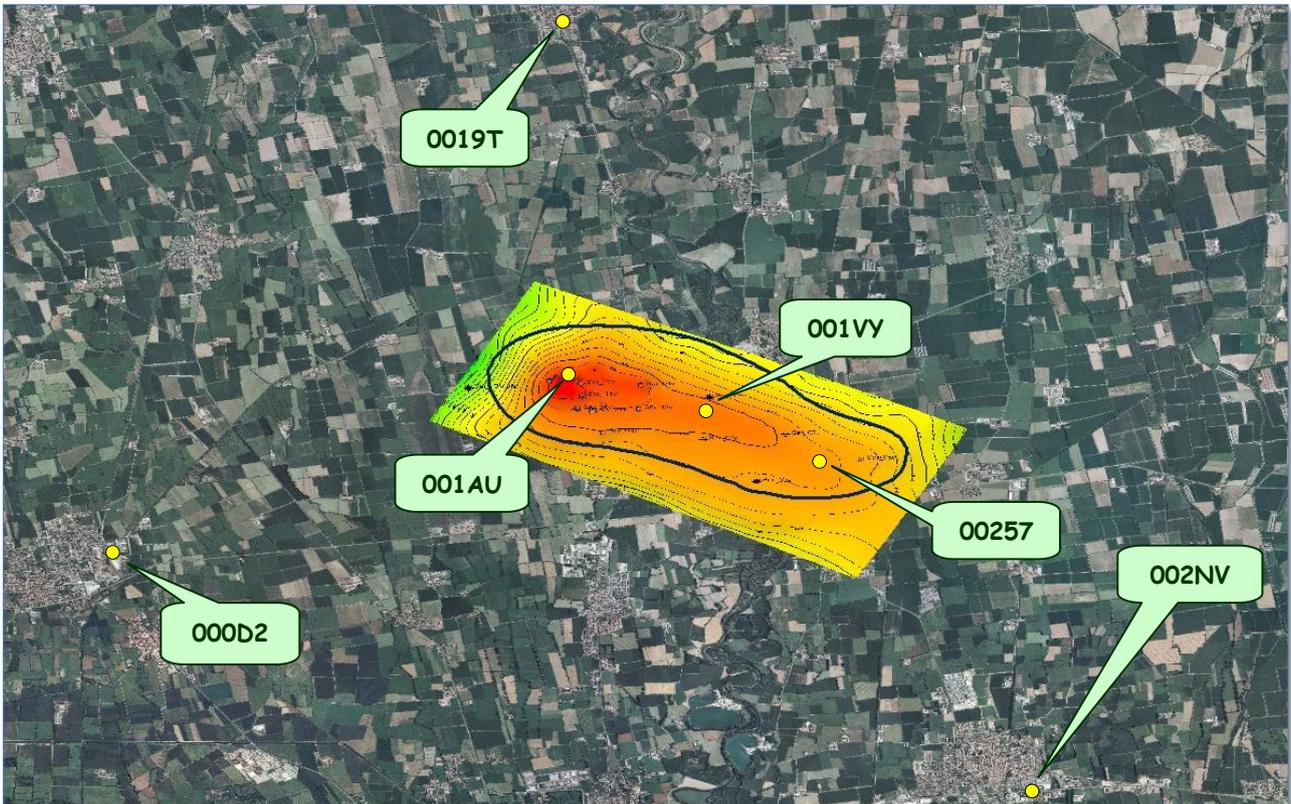


Fig.16 **Visualizzazione in scala di colori dei valori di velocità verticale relativi all'analisi LOCAL dopo la variazione di -1.3 mm/anno effettuata sull'intero dataset. Il triangolo rosso indica la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità.**

## Analisi delle serie storiche dei punti scomposti



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 del Radarsat ogni 24 giorni). In questo modo è possibile avere, oltre alle variazioni altimetriche relative di quel punto rispetto al punto di riferimento, anche gli spostamenti mensili di quel singolo punto nel periodo considerato.

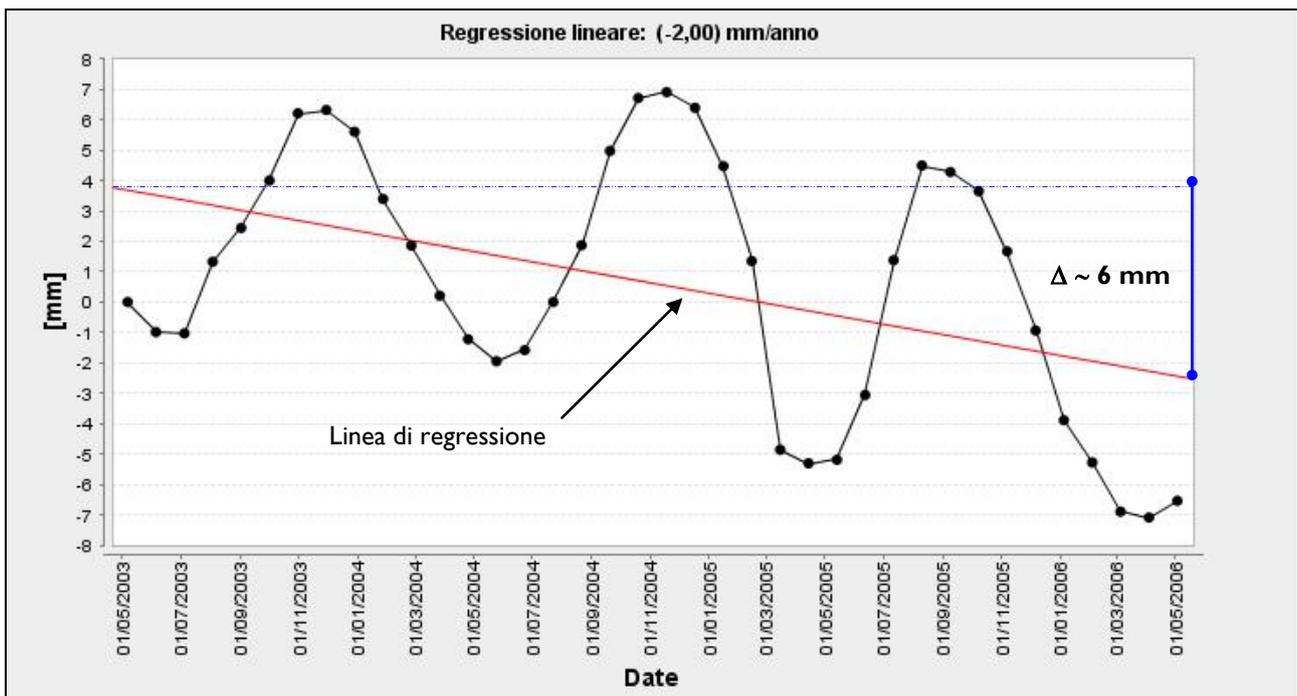


Fig.17 Esempio di serie storica con valori di subsidenza di circa 2 mm/anno.

In questo progetto oltre alle velocità sono state scomposte anche le serie storiche. Per ogni cella di risoluzione 100 m per 100 m si avrà quindi l'andamento della variazione altimetrica nel tempo e la velocità verticale, già calcolata in mm/anno, ottenuta dalla retta di regressione lineare (si veda esempio fig. 17 e 18).

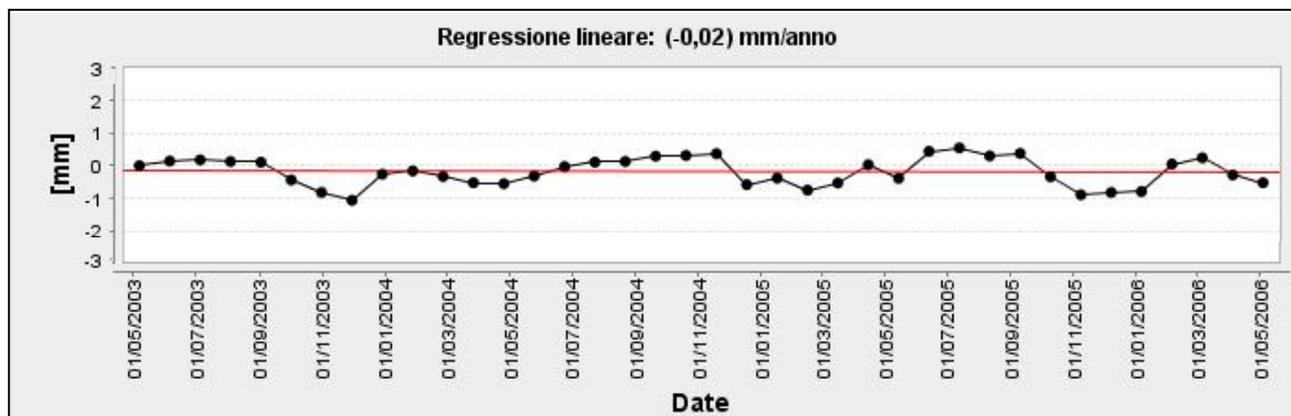


Fig.18 *Esempio di serie storica con valori di regressione lineare nulla.*

A titolo di esempio nelle pagine successive si mostra l'andamento delle serie storiche scomposte di 6 punti ottenuti sempre da griglia regolare, risoluzione 100m per 100m.

Tre dei sei punti sono stati presi in prossimità del top strutturale, mentre gli altri tre ad una distanza tale che si suppone essersi esaurito l'effetto dello stoccaggio. Per ognuna delle serie storiche si evidenzia la cella relativa ed il numero di PS ascendenti e discendenti che hanno reso possibile la scomposizione. La scelta delle serie storiche di esempio è stata definita in base al numero minimo di PS ascendenti e discendenti all'interno della cella di risoluzione. Si parte infatti dal presupposto che ad un alto numero di PS corrisponda un livello di accuratezza maggiore del dato scomposto. Per tale motivo in questo lavoro si è scelto di considerare i soli punti che presentano un numero elevato di Permanent Scatterers ascendenti e discendenti all'interno della cella di scomposizione. Ognuna delle curve viene inoltre paragonata con la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Sergnano (fig. 19).

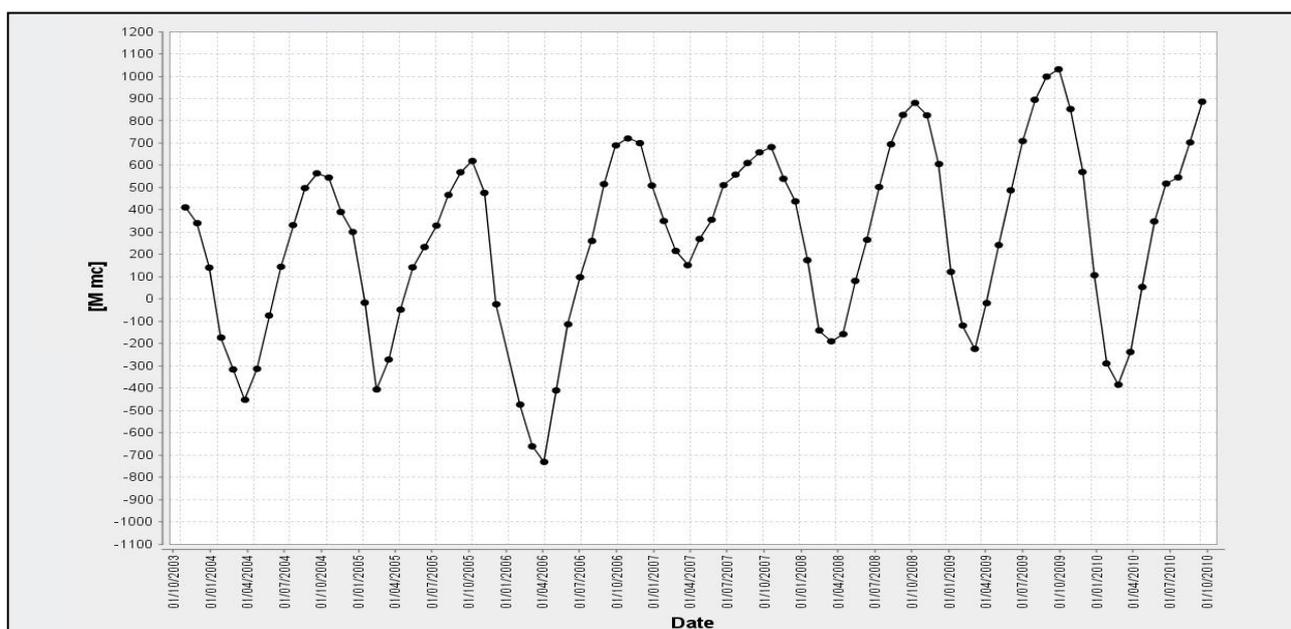
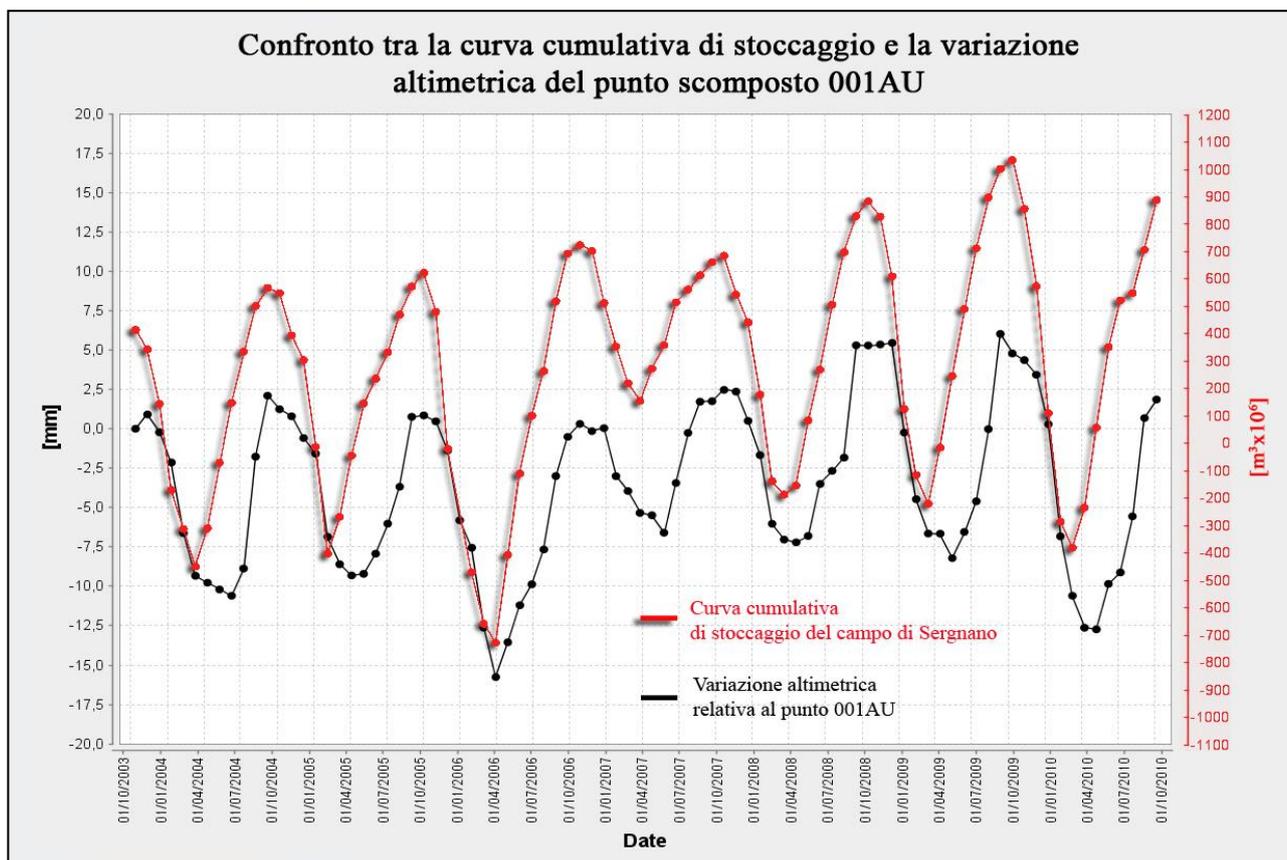
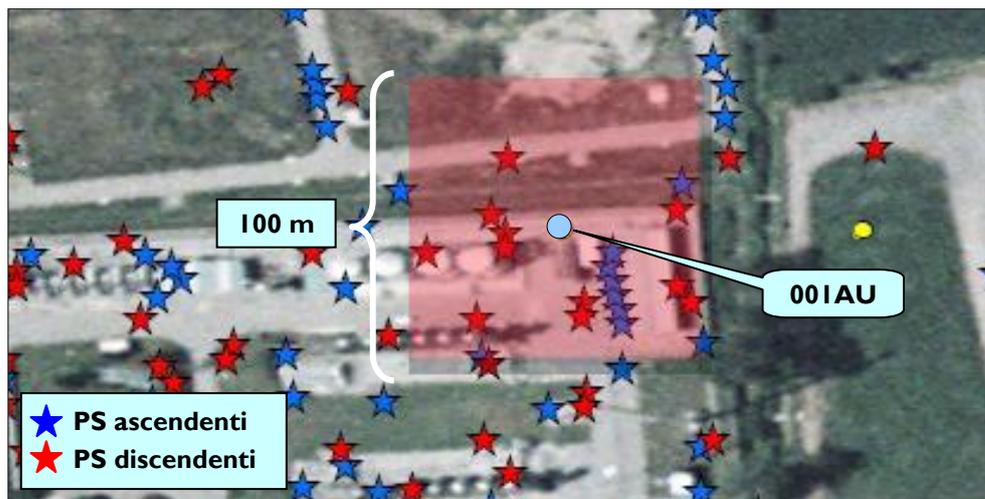


Fig.19 *Curva cumulativa di stoccaggio del campo a gas di Sergnano (unità di misura in  $m^3 \times 10^6$ ).*

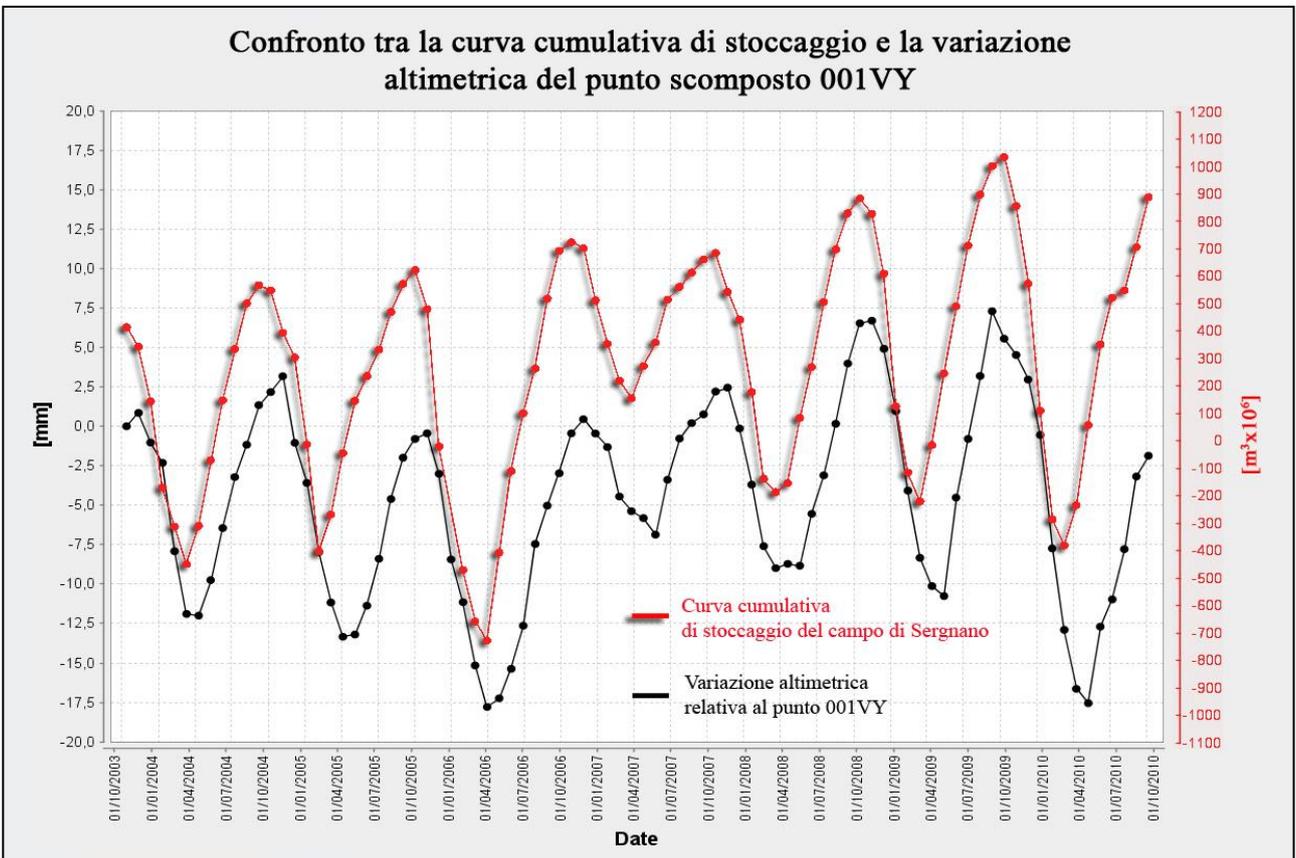
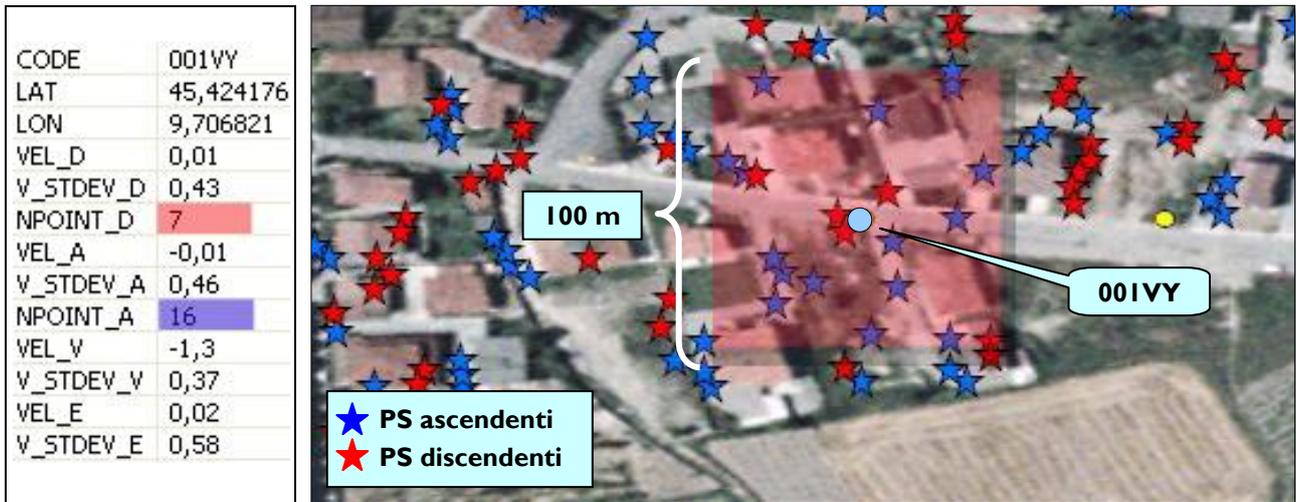
**Punto interno al giacimento – 001AU**

CODE	001AU
LAT	45,428668
LON	9,689752
VEL_D	-0,05
V_STDEV_D	0,31
NPOINT_D	12
VEL_A	-0,03
V_STDEV_A	0,46
NPOINT_A	10
VEL_V	-1,35
V_STDEV_V	0,32
VEL_E	-0,01
V_STDEV_E	0,51



**Fig.20** Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 001AU e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano.

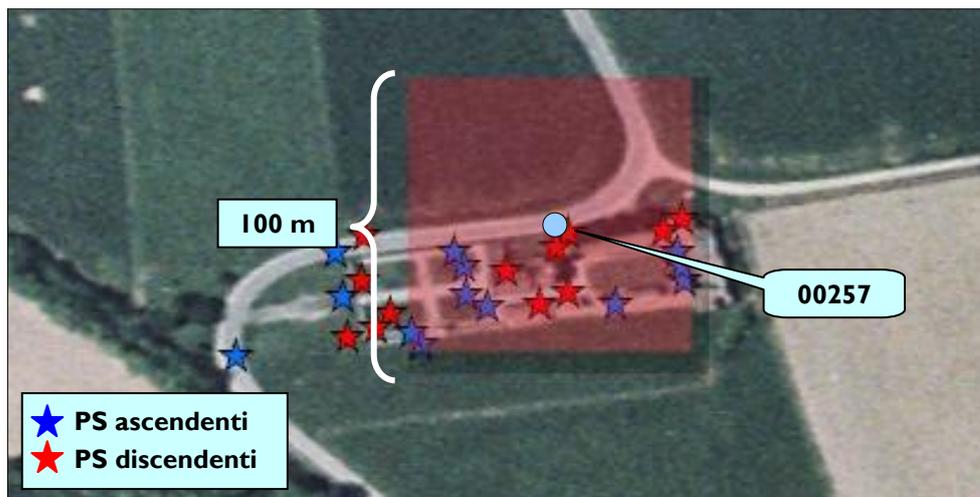
**Punto interno al giacimento – 001VY**



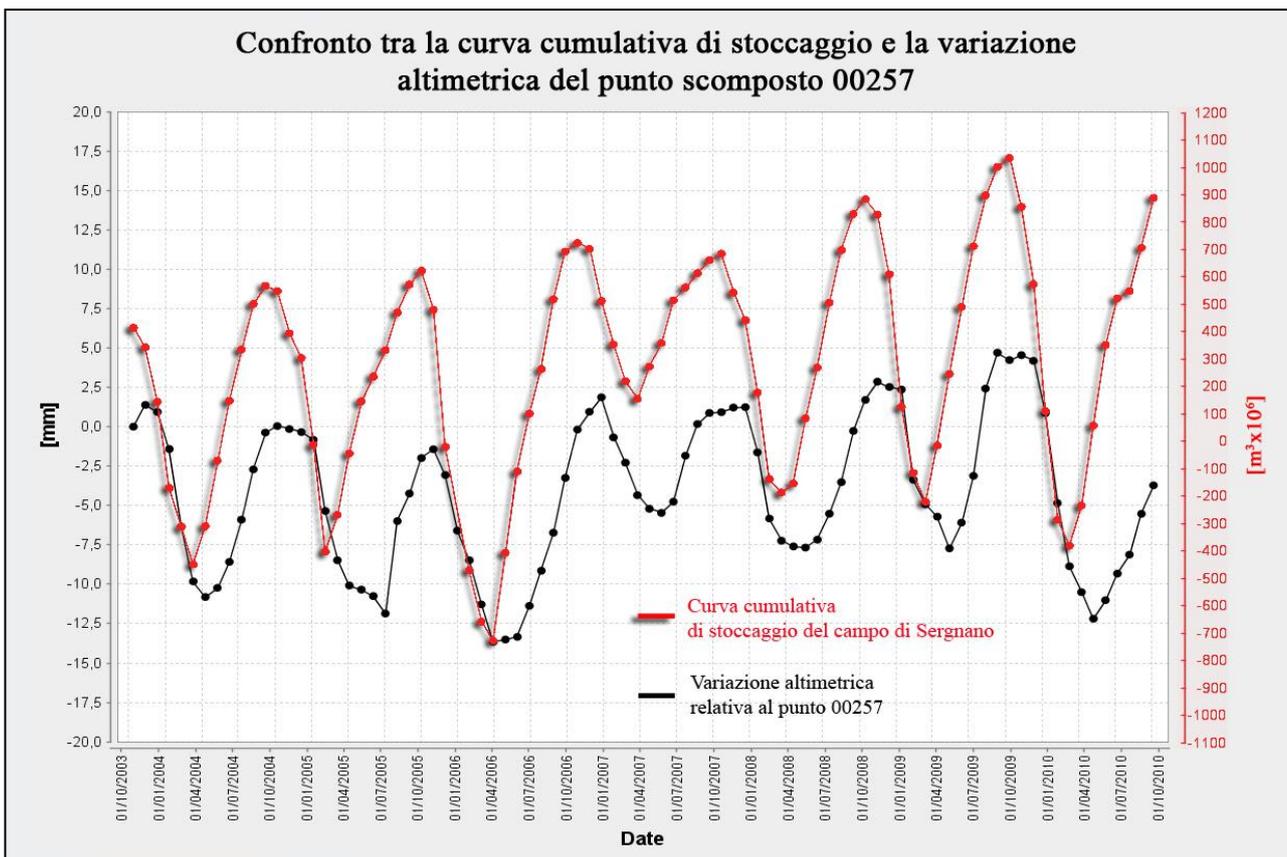
**Fig.21 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 001VY e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano.**

**Punto esterno al giacimento – 00257**

CODE	00257
LAT	45,417888
LON	9,721194
VEL_D	0
V_STDEV_D	0,41
NPOINT_D	7
VEL_A	0,13
V_STDEV_A	0,38
NPOINT_A	10
VEL_V	-1,22
V_STDEV_V	0,33
VEL_E	-0,13
V_STDEV_E	0,52

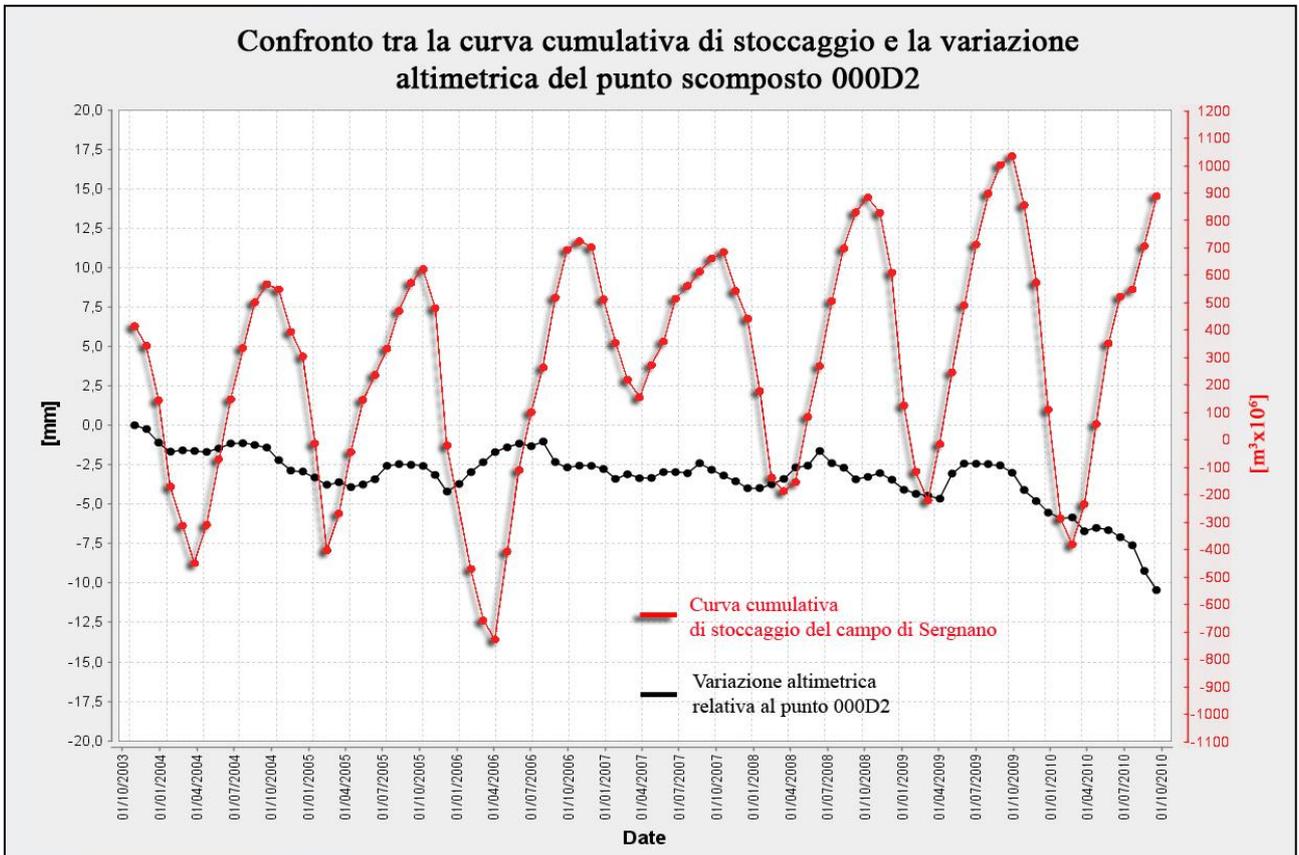
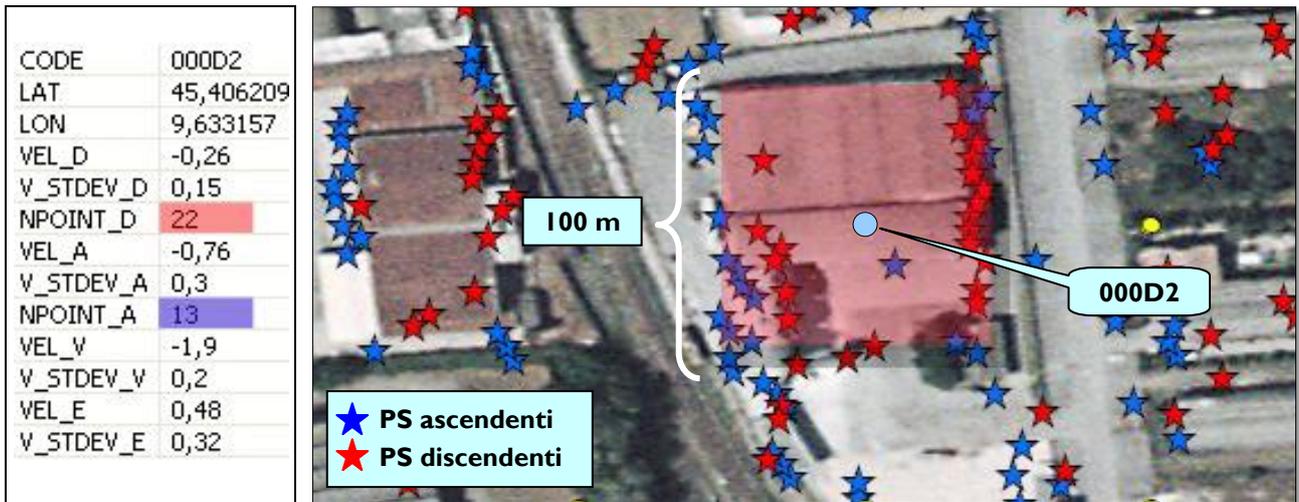


**Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e la variazione altimetrica del punto scomposto 00257**



**Fig.22 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 00257 e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano.**

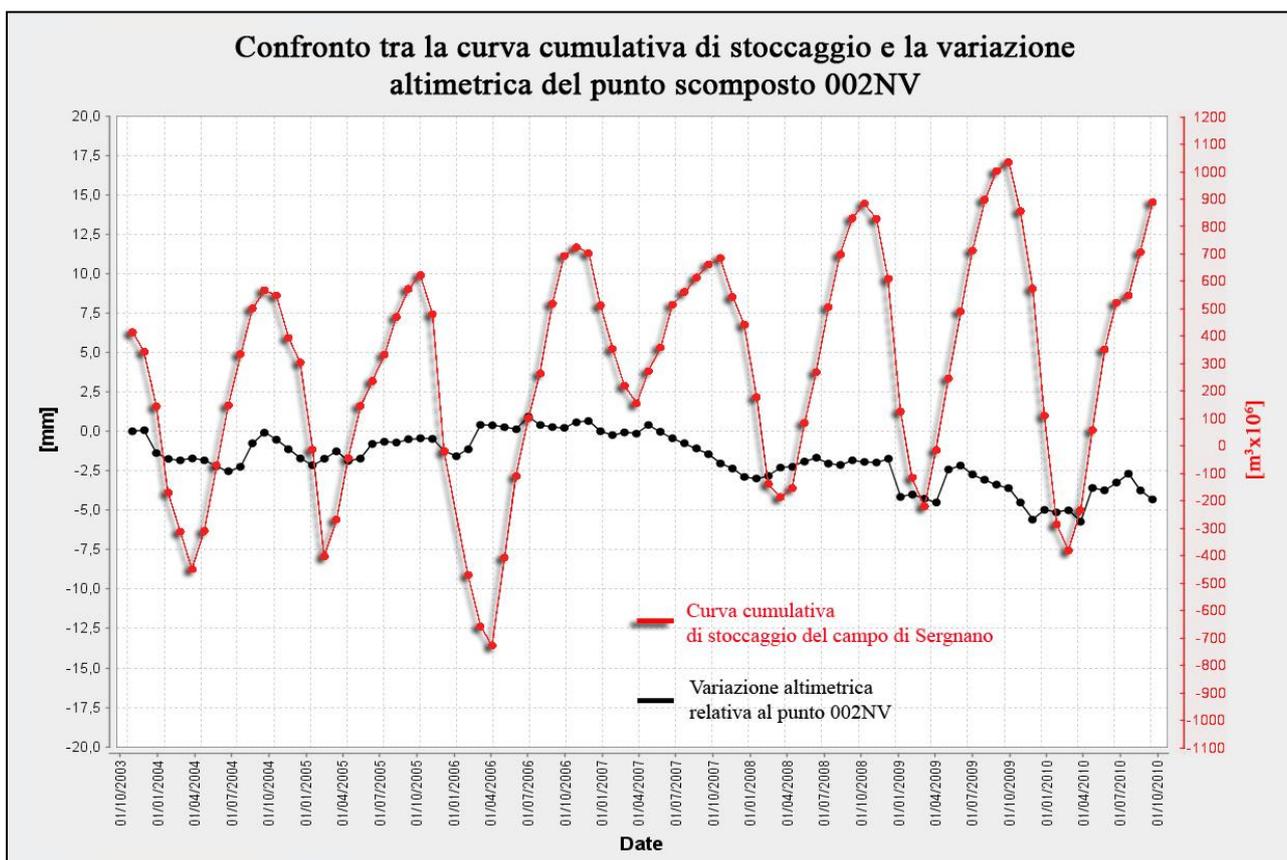
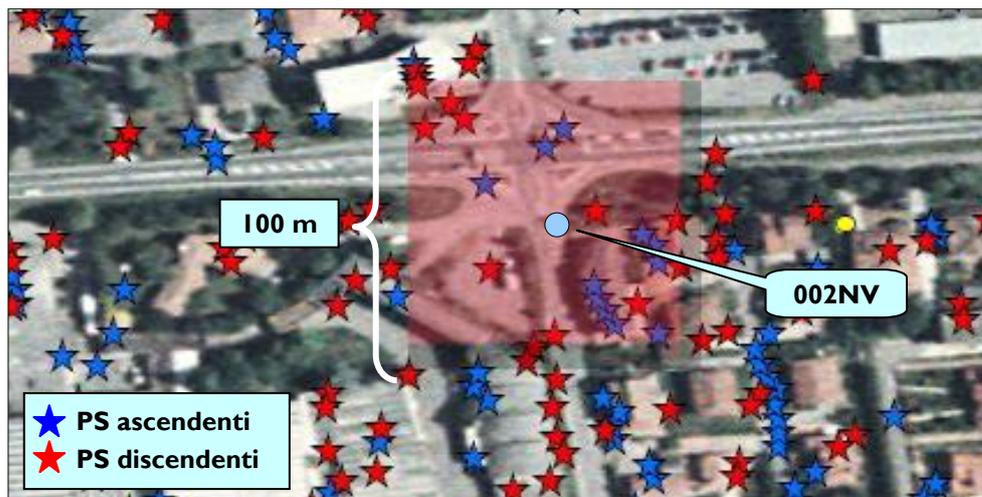
**Punto esterno al giacimento – 000D2**



**Fig.23** Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 000D2 e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano.

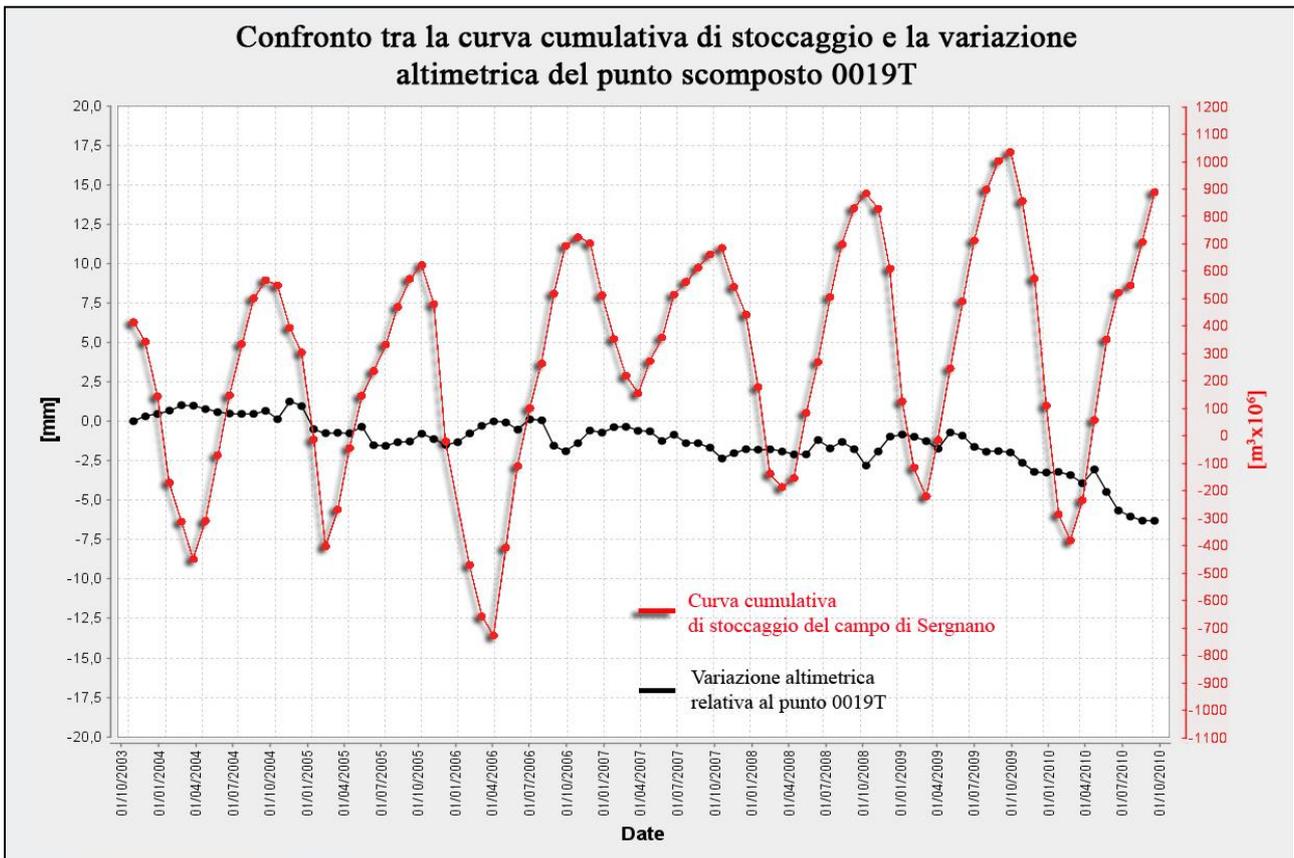
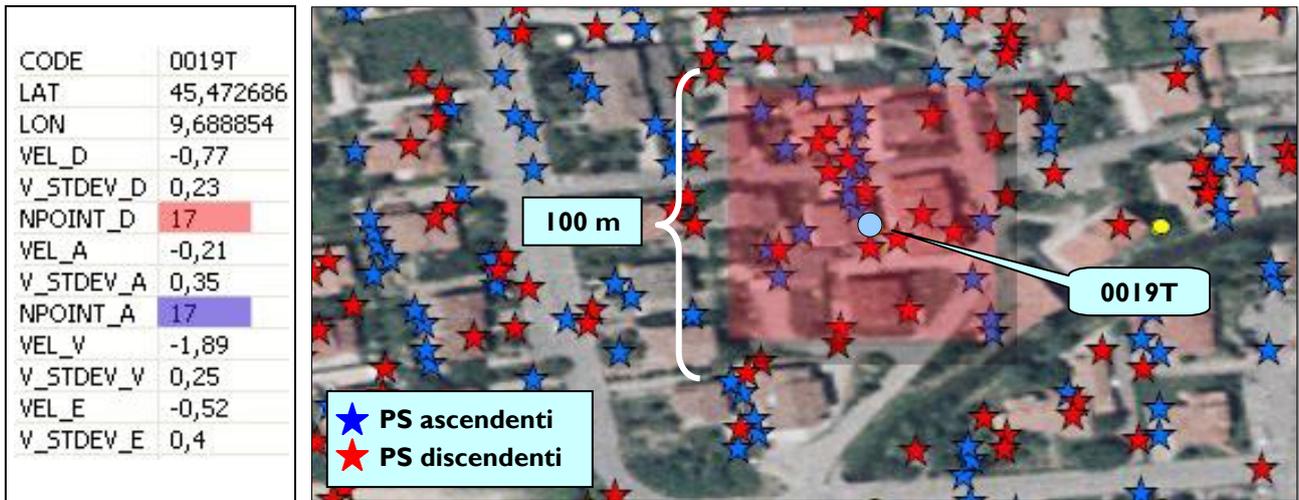
**Punto esterno al giacimento – 002NV**

CODE	002NV
LAT	45,376564
LON	9,747246
VEL_D	-0,52
V_STDEV_D	0,23
NPOINT_D	12
VEL_A	-0,41
V_STDEV_A	0,22
NPOINT_A	11
VEL_V	-1,86
V_STDEV_V	0,19
VEL_E	-0,1
V_STDEV_E	0,3



**Fig.24 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 002NV e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano.**

**Punto esterno al giacimento – 0019T**



**Fig.25 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 0019T e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano.**

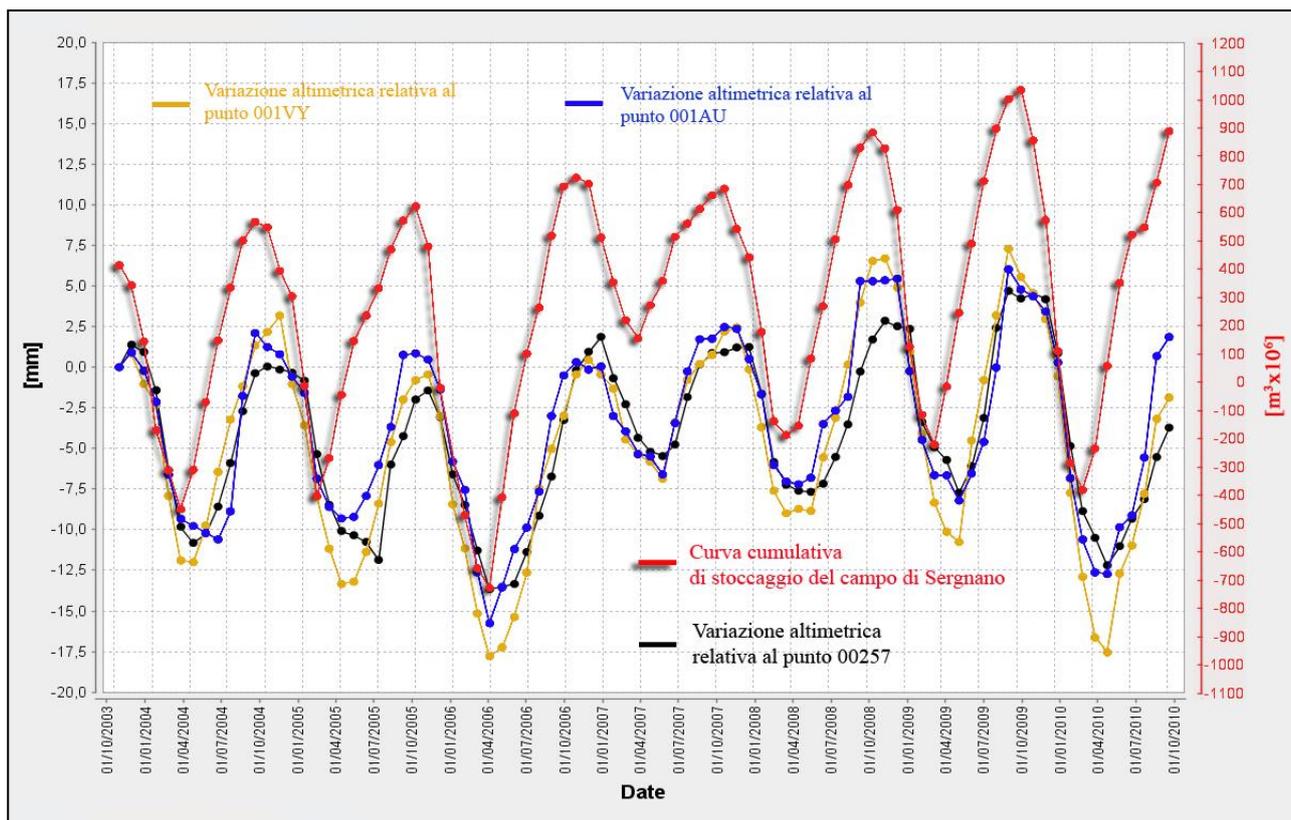


Fig.26 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano e le serie storiche dei punti scelti all'interno dei limiti del campo.

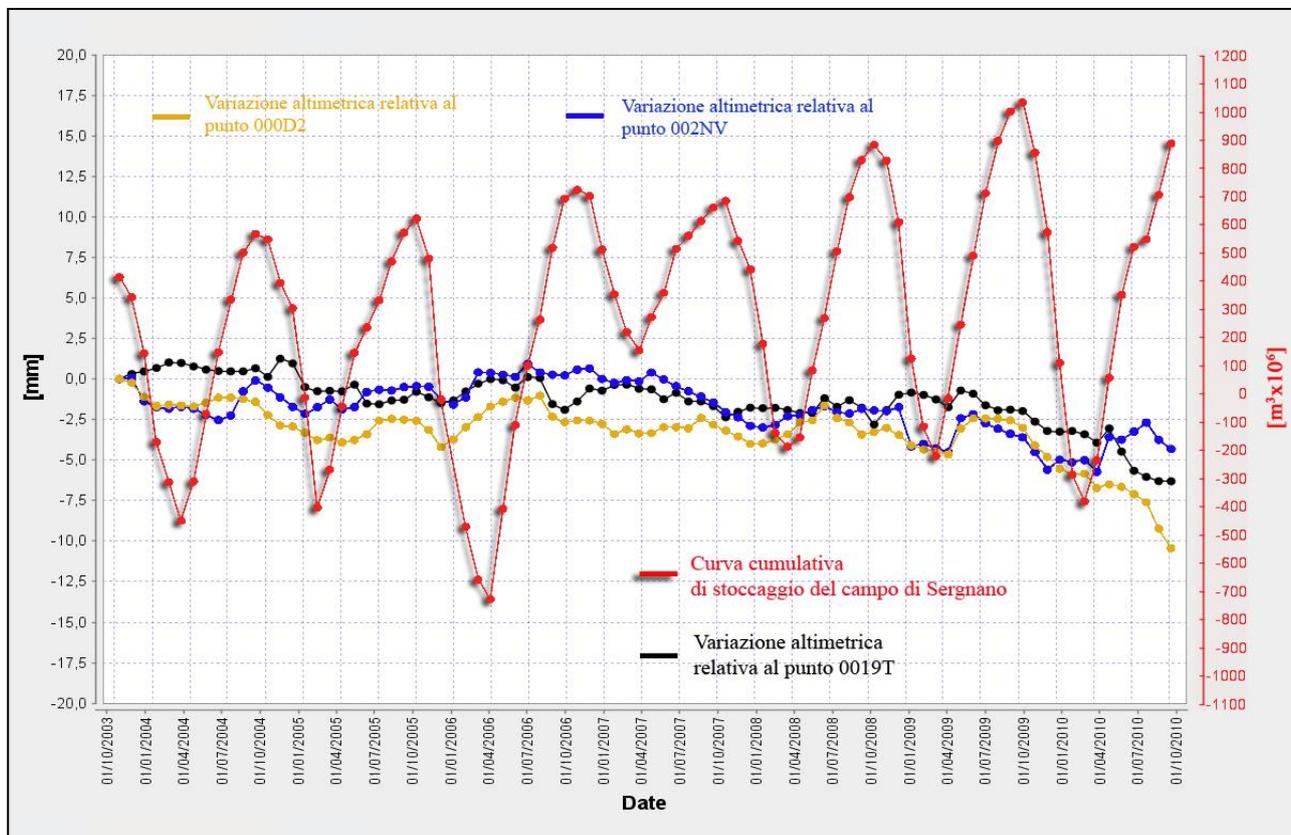


Fig.27 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Sergnano e le serie storiche dei punti scelti all'esterno dei limiti del campo.

	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date February 2011	Doc. N°. GEOD_I102_d02	Rev. 0	Sheet 3-27	Of 27
---	--	-----------------------	---------------------------	-----------	---------------	----------

## 3 - Analisi delle elaborazioni

### Analisi REGIONAL

L'analisi standard a scala regionale (fig. 8 e 9), calibrata mediante l'utilizzo del GPS di Crema, evidenzia come il giacimento di stoccaggio di Sergnano sia interessato da velocità verticali che si attestano mediamente intorno a -1.4 mm/anno, perfettamente in linea sia con quanto riscontrato nella precedente relazione (GEOD\_0912\_d78) che con le velocità verticali registrate dal CGPS di Crema per il medesimo periodo (-1.15 mm/anno).

### Analisi LOCAL

L'analisi locale effettuata sull'area occupata dal giacimento di Sergnano (fig. 16) mostra valori di velocità verticali perfettamente in linea con quanto riscontrato sia con l'analisi REGIONAL che mediante il CGPS di Crema, con una media all'interno dei limiti del campo pari a circa -1.5 mm/anno.

Questi valori risultano leggermente più negativi rispetto a quanto osservato nella precedente relazione (velocità di deformazione verticale all'interno del campo di circa -0.8 mm/anno).

Tale minima discrepanza, oltre a rientrare nel range di errore di misura del sistema, potrebbe essere dovuta alla variazione della posizione del punto di riferimento che, a partire da questo studio, verrà posizionato circa 5 Km più a sud; questo accorgimento, contestualmente al sensibile allargamento dell'area di acquisizione, è stato introdotto per meglio comprendere, anche mediante l'analisi delle serie storiche, eventuali fenomeni di deformazione correlabili con l'attività di stoccaggio a distanze superiori rispetto a quanto fatto fino ad oggi.

Anche l'analisi delle velocità orizzontali sul lungo periodo (fig. 13) non sembra evidenziare alcun comportamento particolare riconducibile all'attività presente all'interno del giacimento.

### Analisi delle serie storiche

L'analisi delle serie storiche dei punti localizzati all'interno del giacimento (fig. 26) mostra una correlazione abbastanza elevata tra le variazioni altimetriche dei punti selezionati e la curva cumulativa di stoccaggio.

Le serie storiche dei punti interni presentano tutte oscillazioni comprese tra i 7 e i 12 millimetri e uno shift temporale con la curva di stoccaggio che non supera mai i 30 giorni.

Lo stesso grado di correlazione con la curva di stoccaggio non viene riscontrato per le serie storiche dei tre punti esterni ai limiti di giacimento per i quali non sono riconoscibili periodicità e ampiezze elevate (fig. 27).