

	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date January 2014	Doc. N°. GEOD_I401_d72	Rev. 0	Sheet I	Of 34
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	------------	----------

## Interferometria differenziale SAR e Tecnica PS

### Campo di stoccaggio di **SETTALA**

### Concessione STOGIT

**(Aggiornamento dati Novembre 2013)**

0		G. DELL'ELCE		A. MOSCONI	Jan 2014
<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 January 2014	Doc. N°. GEOD_I401_d72	Rev. 0	Sheet 2-2	Of 34
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

## **EXP - SGEG GEOD**

GEODYNAMICS Department

Autore:

Gianluca Dell'Elce

Gennaio 2014

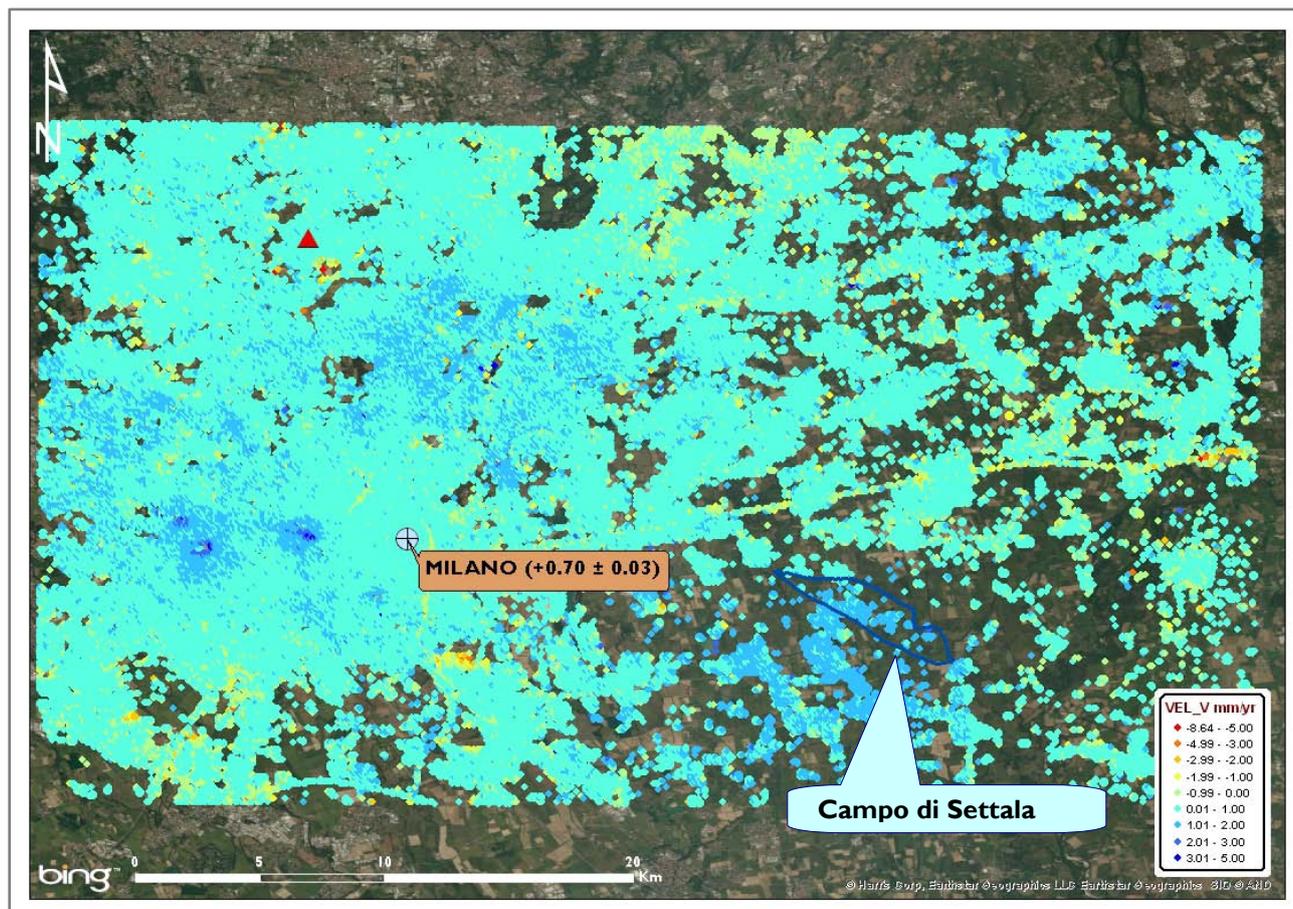
	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date January 2014	Doc. N°. GEOD_I401_d72	Rev. 0	Sheet 2-3	Of 34
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

## 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
<i>Indici di precisione</i> .....	2-7
<i>Elaborazione congiunta RADARSAT 1 - RADARSAT2</i> .....	2-8
<i>Immagini utilizzate</i> .....	2-9
<b>2 - ANALISI DEL CAMPO DI SETTALA</b> .....	<b>2-10</b>
<i>Dati GPS</i> .....	2-10
<i>Analisi REGIONAL</i> .....	2-12
<i>Analisi LOCAL</i> .....	2-16
<i>Analisi delle serie storiche dei punti scomposti</i> .....	2-22
Punto interno al giacimento – <u>0025N</u> .....	2-25
Punto interno al giacimento – <u>0028U</u> .....	2-26
Punto interno al giacimento – <u>002PN</u> .....	2-27
Punto esterno al giacimento – <u>00367</u> .....	2-28
Punto esterno al giacimento – <u>0008I</u> .....	2-29
Punto esterno al giacimento – <u>003IL</u> .....	2-30
<i>Dati CGPS</i> .....	2-32
<b>3 - ANALISI DELLE ELABORAZIONI</b> .....	<b>3-34</b>
<i>Analisi REGIONAL</i> .....	3-34
<i>Analisi LOCAL</i> .....	3-34
<i>Analisi delle serie storiche</i> .....	3-34

## Conclusioni

L'analisi interferometrica dei dati Radarsat attraverso la tecnica dei Permanent Scatterers sul campo di Settala per il periodo Ottobre 2003 – Novembre 2013 evidenzia una velocità verticale media all'interno del giacimento pari a +1.23 mm/anno, in linea con il report precedente (GEOD\_I302\_d42) e coerente con quanto evidenziato dal CGPS di Milano.



Variazioni Altimetriche +/- (mm/anno)	
Trend regionale (valori CGPS Milano)	Relative rispetto al trend regionale
<b>+ 0.70 mm/y</b>	<b>~ (+ 1.23 mm/y)</b>

Correlazione con il ciclo di stoccaggio		
Ampiezza media delle curve	SHIFT Temporale	Correlazione (con la curva di stoccaggio)
<b>~ 5-10 mm</b>	<b>&gt; 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 5-10 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 associabili all'attività di stoccaggio. Il solo punto 00367, situato all'esterno del campo, presenta una storia di formativa parzialmente correlabile alla curva cumulativa 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.

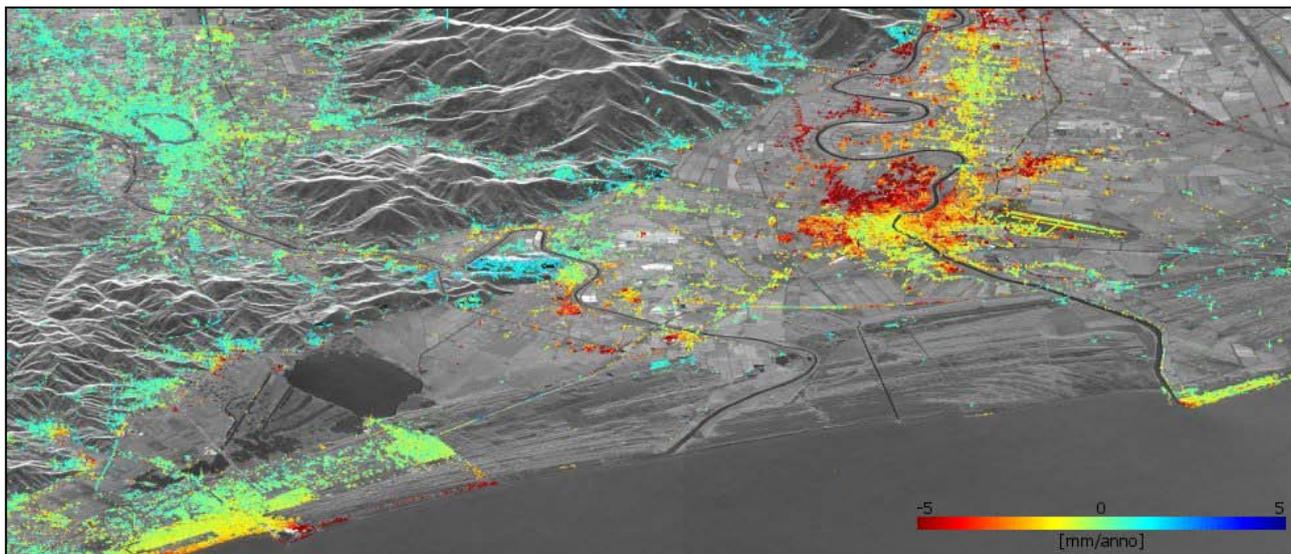


Fig.1 **Esempi di subsidenza nell'area di Pisa.**

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 January 2014	Doc. N°. GEOD_I401_d72	Rev. 0	Sheet 2-6	Of 34
--	----------------------------	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

## 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 senoide 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 January 2014	Doc. N°. GEOD_I401_d72	Rev. 0	Sheet 2-7	Of 34
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

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.

## Indici di precisione

I risultati PSInSAR e SqueeSAR si presentano con due indici di precisione, la cui comprensione è molto importante:

- **La deviazione standard (STD) della velocità.**
- **La coerenza temporale**

La deviazione standard (STD) è un noto parametro statistico, per definizione è un indice che misura il grado di dispersione di una popolazione di dati attorno al valore medio. Questa misura (indicata spesso con  $\sigma$ ) è solitamente utilizzata per quantificare il grado di precisione di un insieme di misure. Ipotizzando infatti di conoscere la deviazione standard e supponendo una distribuzione normale degli errori (ovvero gaussiana), il 95% dei valori tende ad essere incluso nell'intervallo  $\pm 2\sigma$  rispetto al valore medio. In assenza di errori sistematici, precisione e accuratezza coincidono. Nel caso di analisi PSInSAR<sup>TM</sup> e SqueeSAR<sup>TM</sup> la deviazione standard si riferisce alla velocità media dei PS/DS rispetto al punto di riferimento. La deviazione standard dipende da diversi fattori, in particolare di evidenziano i seguenti:

	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date January 2014	Doc. N°. GEOD_I401_d72	Rev. 0	Sheet 2-8	Of 34
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

1. Distanza fisica tra il PS/DS ed il punto di riferimento.
2. Qualità del punto di misura (coerenza di fase).
3. Qualità della stima della componente atmosferica.

La coerenza temporale (da non confondersi con la coerenza interferometrica), è un indice che misura quanto bene il moto stimato segue un modello analitico. Stabilire un modello analitico per il moto significa pensare il moto stesso secondo una certa funzione matematica. Le serie temporali delle analisi PSInSAR™ e SqueeSAR™ vengono confrontate con modelli di tipo polinomiale e sinusoidale (andamenti stagionali). La scelta del modello appropriato deve tener conto di alcuni fattori:

- Numero di immagini elaborate.
- Intervallo temporale tra la prima e l'ultima acquisizione.
- Eventuali lacune nell'acquisizione (ad esempio intervalli sporadici o regolari di assenza di acquisizioni).

Stabilito il modello matematico da utilizzare, ogni serie temporale di movimento viene confrontata con il modello, il risultato del confronto è l'indice detto **coerenza temporale**. Il valore  $I$  assume il significato che ogni misura contenuta nella serie temporale è perfettamente giustificata dal modello matematico, ed è ovviamente un caso limite. I dati creati dalle analisi PSInSAR™ e SqueeSAR™ vengono selezionati in base alla coerenza temporale, eliminando tutte le serie temporali che presentano una coerenza troppo bassa per garantire una interpretazione del risultato. La selezione dipende dai fattori sopra elencati, dunque varia da elaborazione ad elaborazione, ed è basata su test statistici che determinano il livello minimo di coerenza da ritenere accettabile (soglia minima di coerenza). Va infatti sottolineato che il valore assoluto di coerenza, fatti salvi i valori estremi 0 ed 1, non assume una valenza qualitativa a sua volta assoluta, bensì relativa alla combinazione dei fattori che determinano il 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).

## Elaborazione congiunta RADARSAT I – RADARSAT 2

Il satellite RSATI dell'Agenzia Spaziale Canadese (CSA), lanciato nel 1995 e non più operativo da Marzo 2013, lavora in banda C e la lunghezza d'onda del segnale radar, parametro fondamentale per applicazioni interferometriche, è pari a 56.564 mm.

Il satellite RSAT2, lanciato nel Dicembre 2007, rappresenta il proseguo della missione RSATI. Tuttavia, in fase di progettazione è stato deciso di utilizzare, per questa piattaforma, una frequenza di acquisizione leggermente diversa da quella del suo predecessore, corrispondente ad una lunghezza d'onda di 55.465 mm.

Questa seppur lieve differenza (poco più di un millimetro) impedisce l'utilizzo simultaneo di dati acquisiti da questi due satelliti nelle applicazioni interferometriche standard. La differente frequenza di acquisizione infatti introduce nell'interfeogramma generato tra un'immagine RSATI e Interferometria differenziale SAR e Tecnica PS

un'immagine RSAT2 un contributo di fase legato alla posizione sub-pixel del bersaglio a terra. Questo contributo risulta indipendente da pixel a pixel e causa interferogrammi così rumorosi da essere inutilizzabili.

Recentemente, l'algoritmo SqueeSAR™ è stato implementato con la possibilità di fare elaborazioni congiunte (stitching) di dati acquisiti da satelliti diversi, compresi RSAT-1 e RSAT-2, basato sulla possibilità di stimare e rimuovere questo contributo.

Prima dell'introduzione dello stitching nelle elaborazioni di aggiornamento dei siti Stogit, sono stati effettuati alcuni test finalizzati a valutare l'impatto della sovrapposizione temporale tra due dataset di satelliti diversi sulla qualità dei risultati ottenuti e determinare l'intervallo minimo di sovrapposizione necessario per garantire un servizio di monitoraggio integrato che consenta di contenere i costi aggiuntivi legati all'introduzione della piattaforma RSAT2.

Senza entrare nei dettagli tecnici relativi al complesso algoritmo sviluppato, i test effettuati hanno confermato la possibilità di un'elaborazione congiunta di dati acquisiti da questi due satelliti, evidenziando che, indipendentemente dalla sovrapposizione temporale tra i due dataset, l'elemento più importante per garantire la qualità dell'elaborazione congiunta è rappresentato dal numero di immagini di RSAT1 e di immagini RSAT2 utilizzate nell'elaborazione. È infatti il numero di immagini in ciascuno dei due dataset, più che la loro sovrapposizione temporale, a garantire una corretta stima del contributo pixel-dipendente. Per un diretto confronto delle misure di spostamento risultanti per entrambe le piattaforme, ai fini del controllo qualità, si è comunque deciso di mantenere una sovrapposizione di almeno 8 immagini.

## Immagini utilizzate

L'analisi condotta ha previsto l'elaborazione di due dataset di immagini acquisite dai satelliti RSAT1 e RSAT2, sia in geometria ascendente che discendente tra Ottobre 2003 e Novembre 2013.

In particolare, per l'elaborazione ascendente sono state processate le immagini RSAT1 disponibili fino alla dismissione del satellite (ultima immagine ascendente 26/03/2013) insieme ad ulteriori 16 immagini RSAT2, di cui 10 si sovrappongono al dataset RSAT1. Per l'elaborazione discendente sono state processate le immagini RSAT1 disponibili fino alla dismissione del satellite (ultima immagine discendente 06/03/2013) insieme ad ulteriori 15 immagini RSAT2, di cui 8 si sovrappongono al dataset RSAT1.

Si noti che per il dataset discendente non sono state acquisite le ultime due immagini pianificate, del 20/10/2013 e del 13/11/2013 e pertanto il dataset risulta aggiornato al 26/09/2013.

In Tabella I sono riportati i dettagli dei due dataset, con il numero totale di immagini elaborate.

	Geometria	Track RSAT1/2	N° immagini	Periodo
Dataset 1	Ascending	T147/66	138	09/10/2003-09/11/2013
Dataset 2	Descending	T197/116	136	13/10/2003-26/09/2013

Tabella I. **Dataset elaborati per il presente aggiornamento.**

## 2 - ANALISI DEL CAMPO DI SETTALA

### 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 Settala, 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 ERSAF (Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e Foreste della Regione Lombardia) 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 15 Maggio 2005 al 31 Ottobre 2013, 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 CGPS utilizzato in questa relazione è installato sul tetto dell'edificio "Nave" del Politecnico di Milano, circa 3 chilometri a nord-est del centro cittadino.



Fig.3 Localizzazione del GPS di Milano su ortofoto, particolare dell'antenna GPS e stima di velocità della componente verticale.

## Analisi REGIONAL

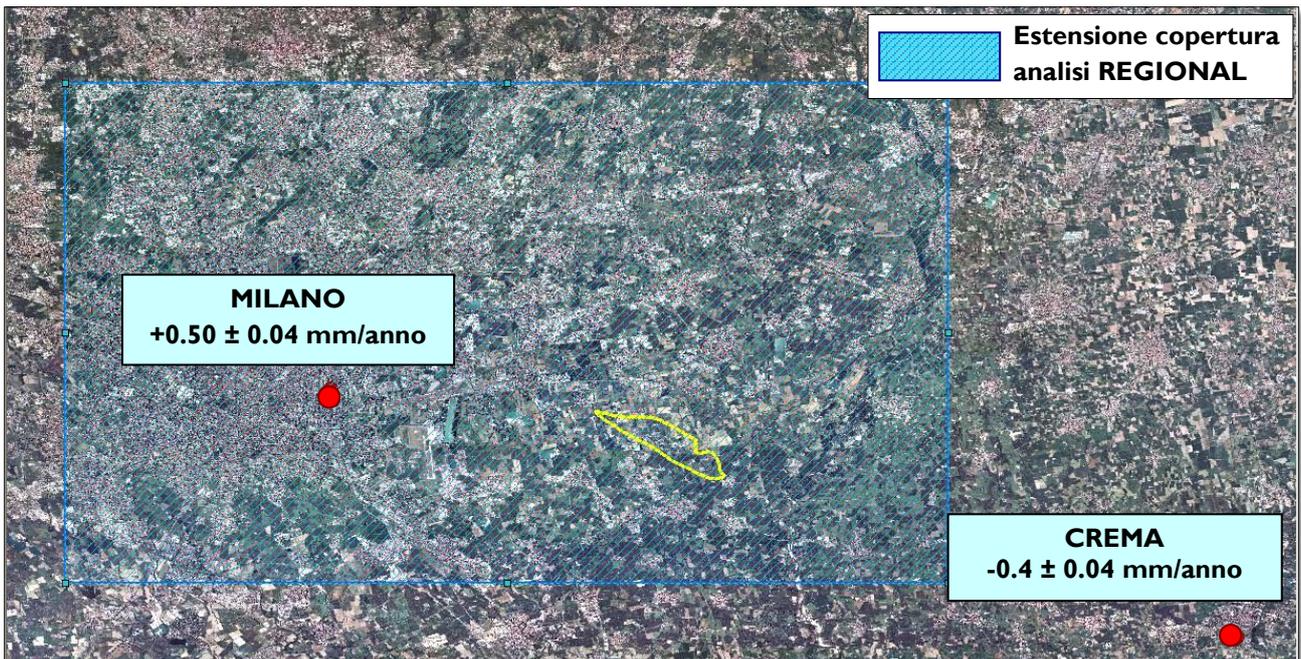


Fig.4 Localizzazione su ortofoto a colori dei CGPS acquisiti. Il rettangolo a righe azzurre evidenzia l'estensione dell'analisi standard REGIONAL che interessa, oltre al giacimento di Settala, il CGPS di Milano, i cui valori sono stati poi utilizzati per la calibrazione.

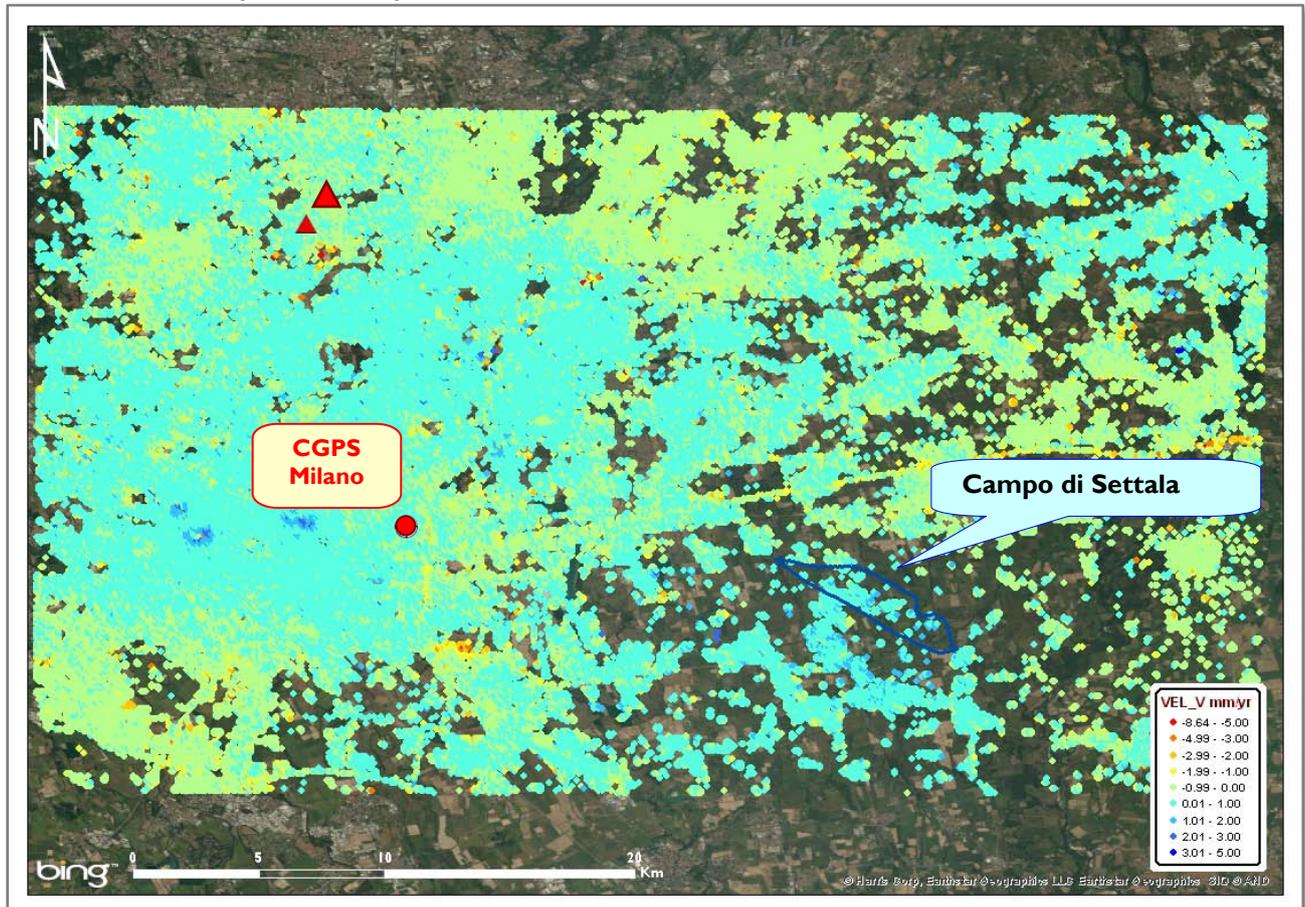


Fig.5 Visualizzazione dei dati dell'analisi REGIONAL in scala di colori. I valori presentati si riferiscono al solo vettore verticale risultato dalla scomposizione dei dati originali. In rosso la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione e del GPS di Milano utilizzato per la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

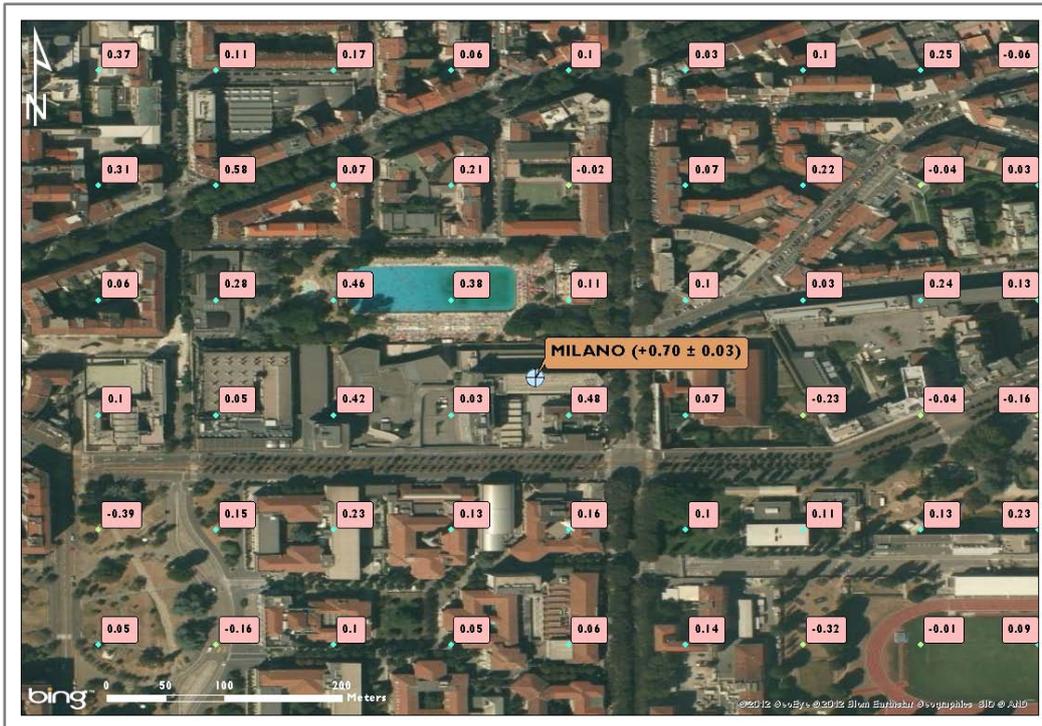


Fig.6 *In rosa i punti dell'analisi REGIONAL scomposti secondo il vettore verticale, nell'immediato intorno del CGPS di Milano, con i relativi valori originali.*

Come si osserva in fig. 6, la media dei punti dell'analisi REGIONAL nell'intorno del CGPS di Milano genera un valore pari a 0.15 mm/y. Di conseguenza, la correzione da apportare ai valori scomposti REGIONAL risulta essere di +0.55 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 +0.55 mm/anno.*

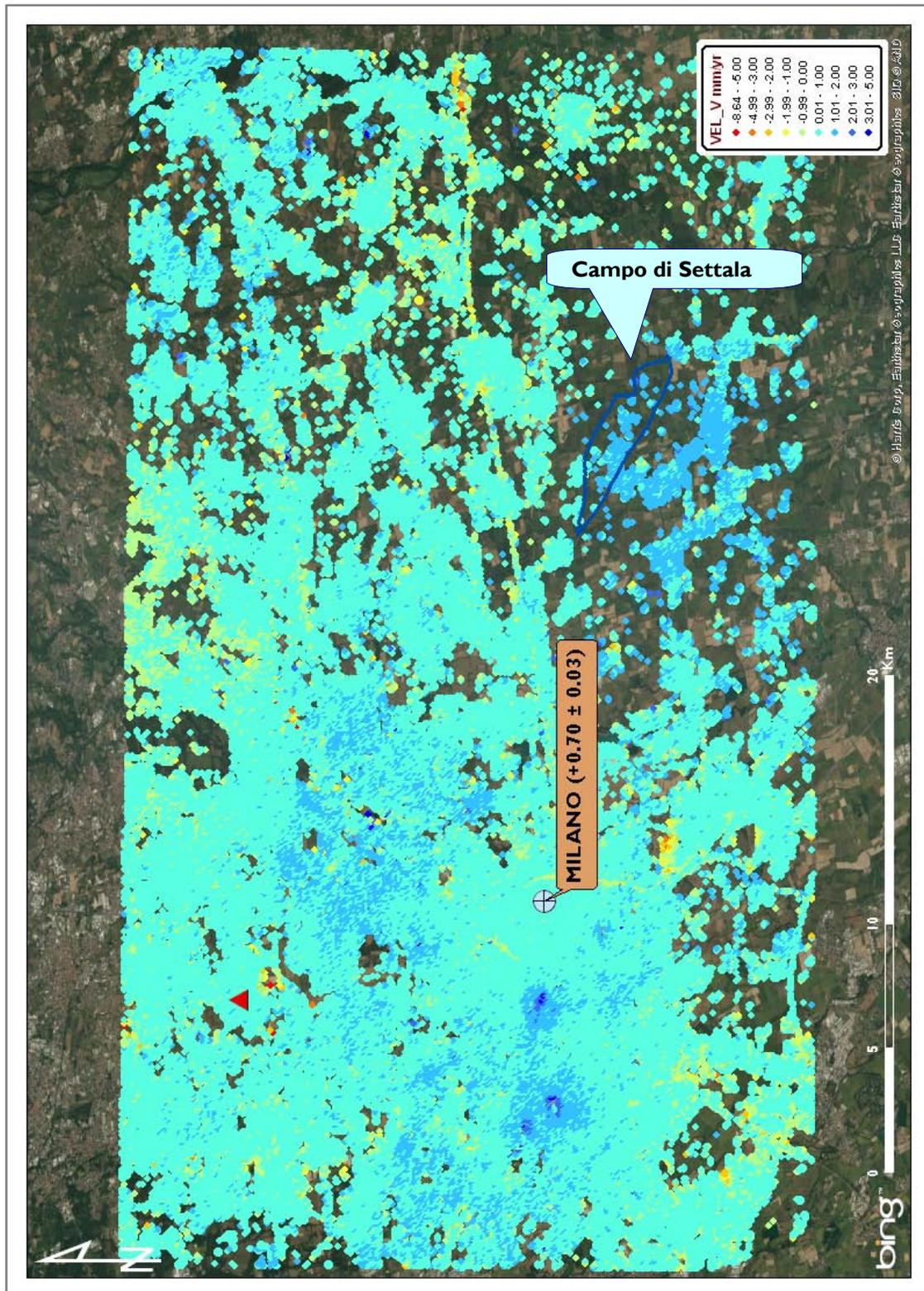


Fig.8 Visualizzazione in scala di colore dei dati REGIONAL scomposti secondo il vettore verticale. In evidenza la localizzazione del CGPS di Milano, utilizzato per la calibrazione dei valori Radarsat 1 e 2 a scala regionale, e i limiti del giacimento di Settala.

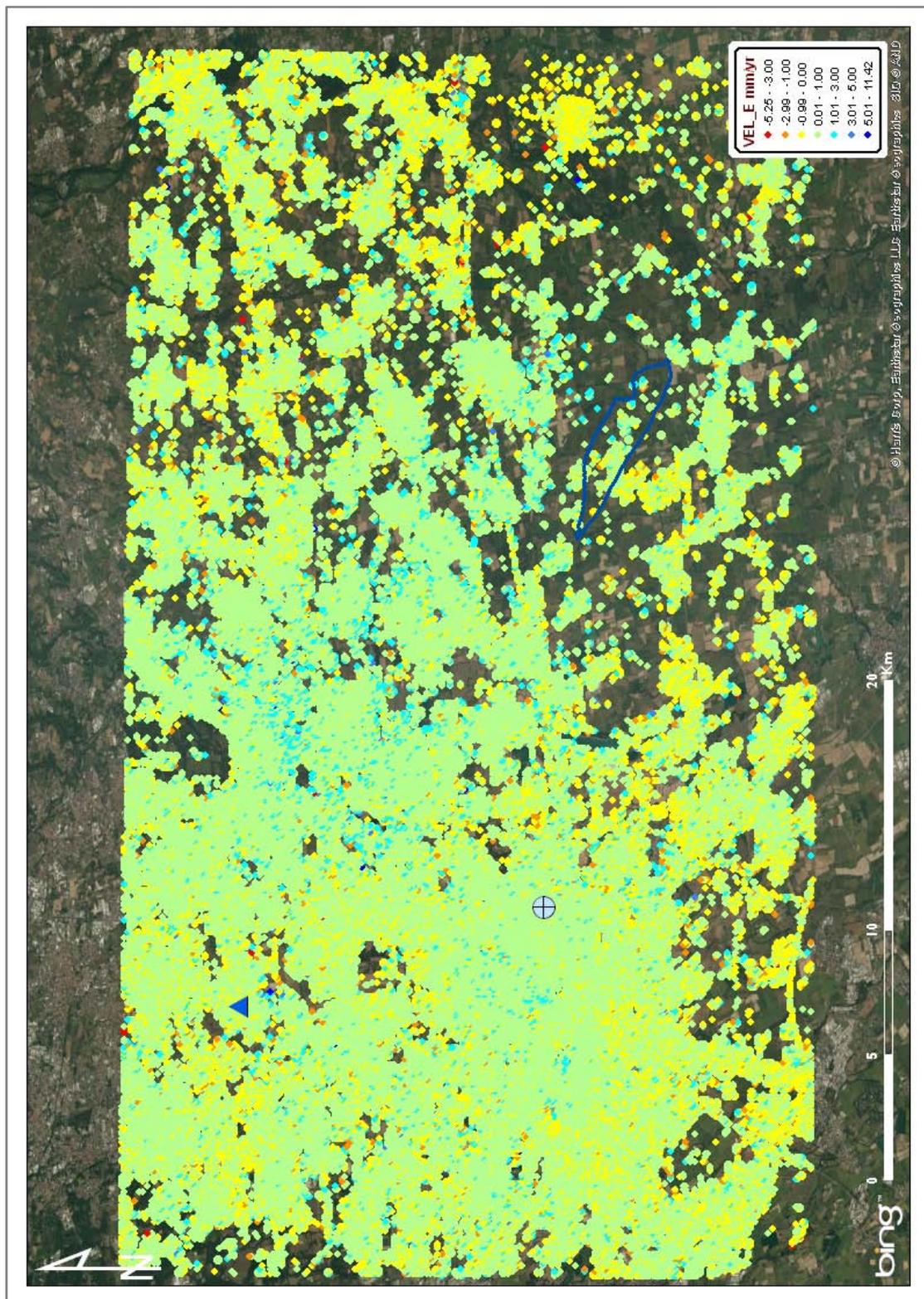


Fig.9 Dettaglio dei valori di velocità orizzontali dei punti scomposti del rilievo Regional, il triangolo blu indica il punto di riferimento.

## Analisi LOCAL

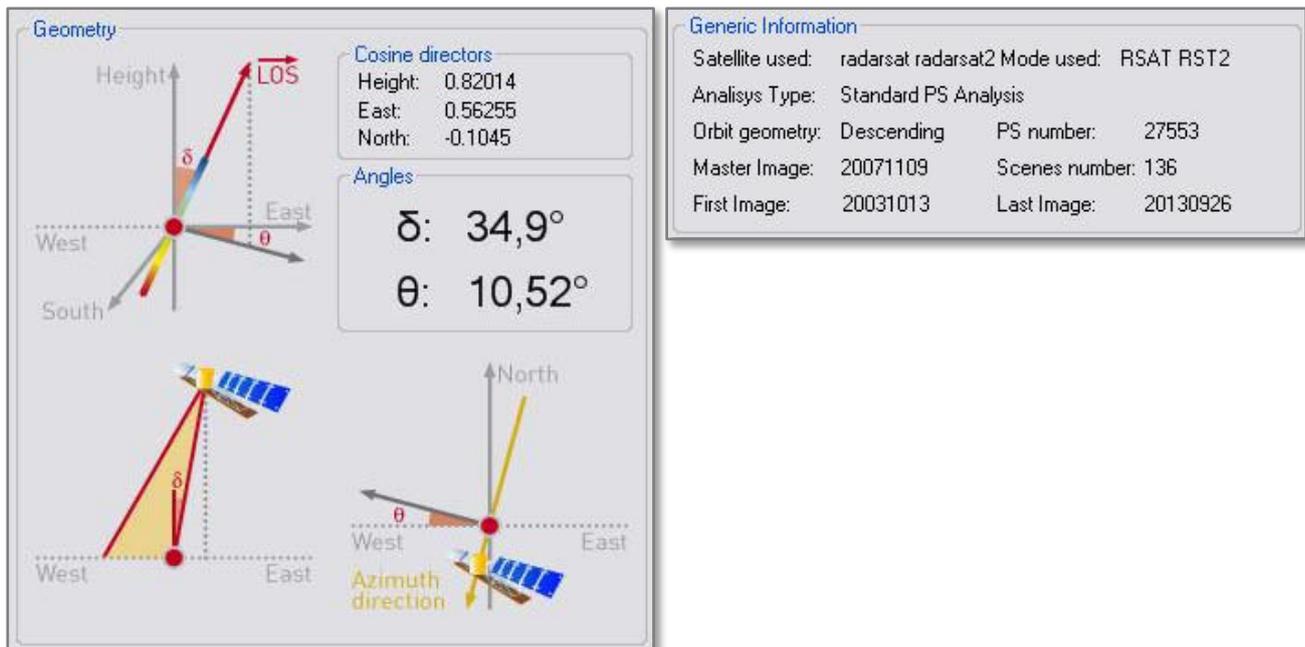
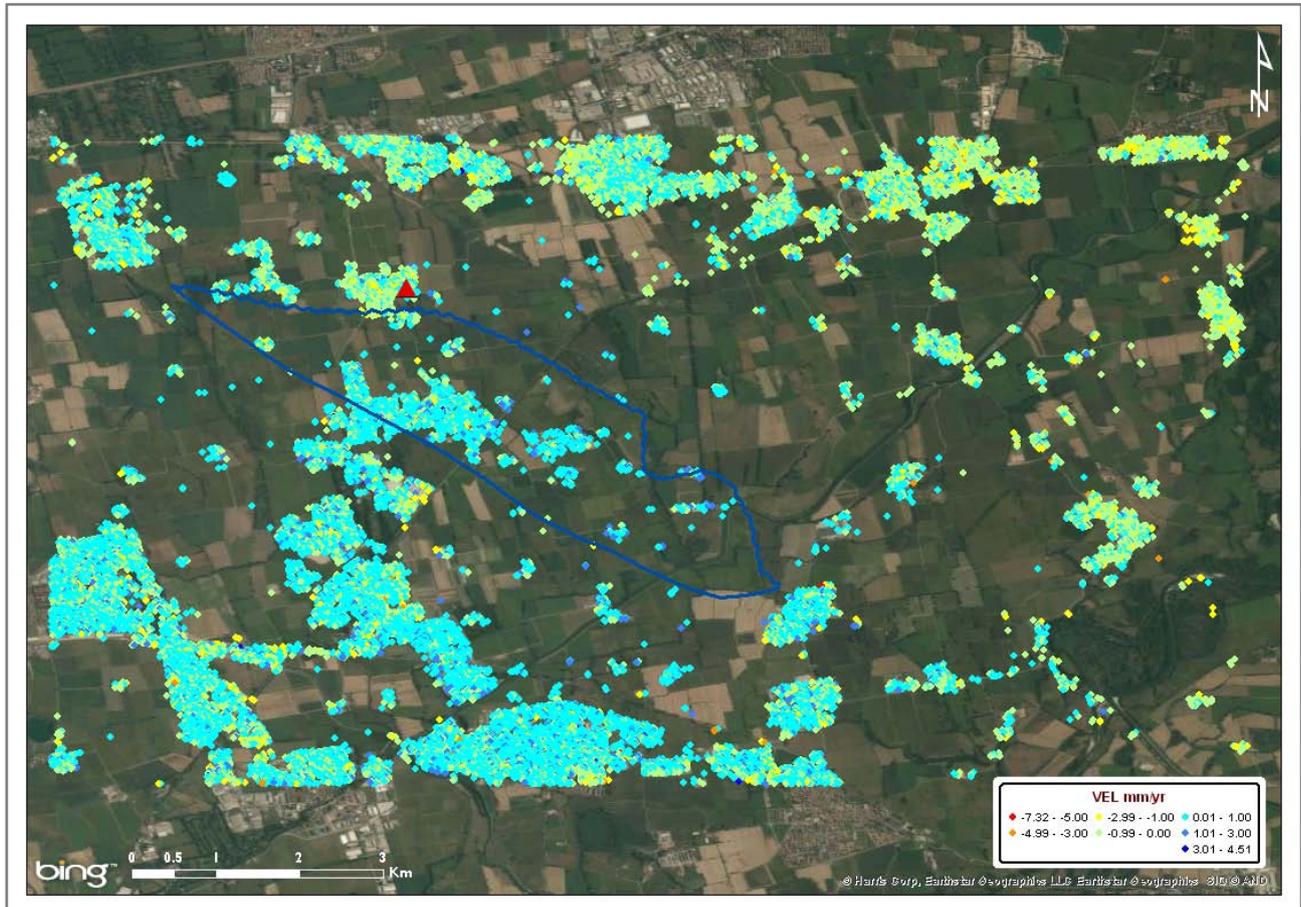


Fig.10 Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo LOCAL per i PS riconosciuti in modalità discendente. In basso, i parametri dell'acquisizione e una rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.

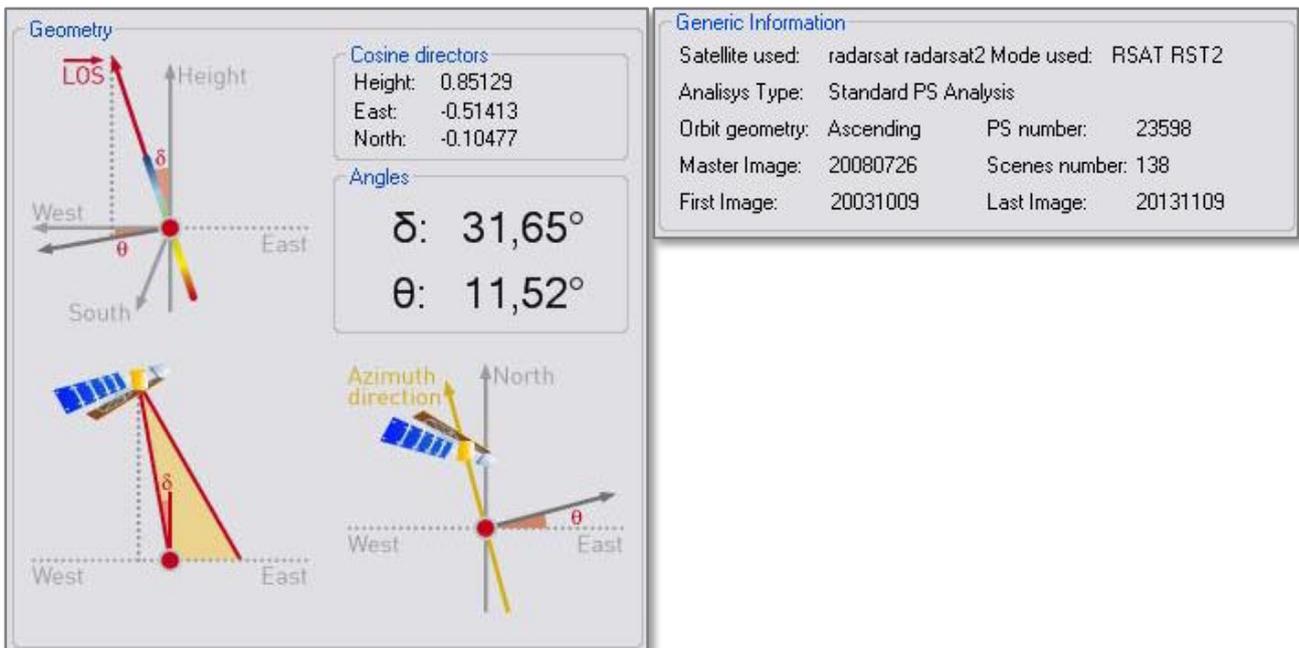
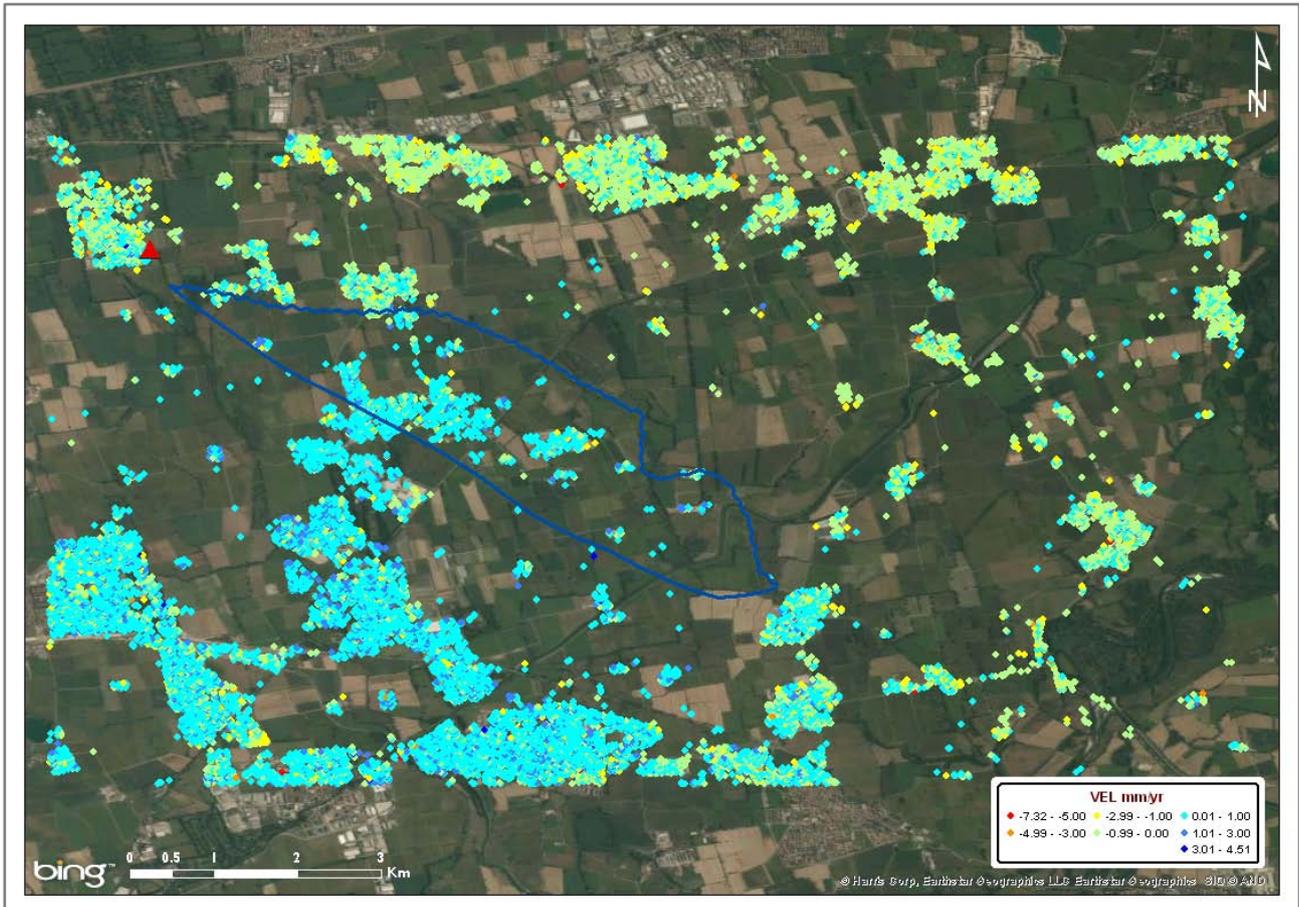


Fig.11 **Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo LOCAL per i PS riconosciuti in modalità ascendente. In basso, i parametri dell'acquisizione e una rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.**

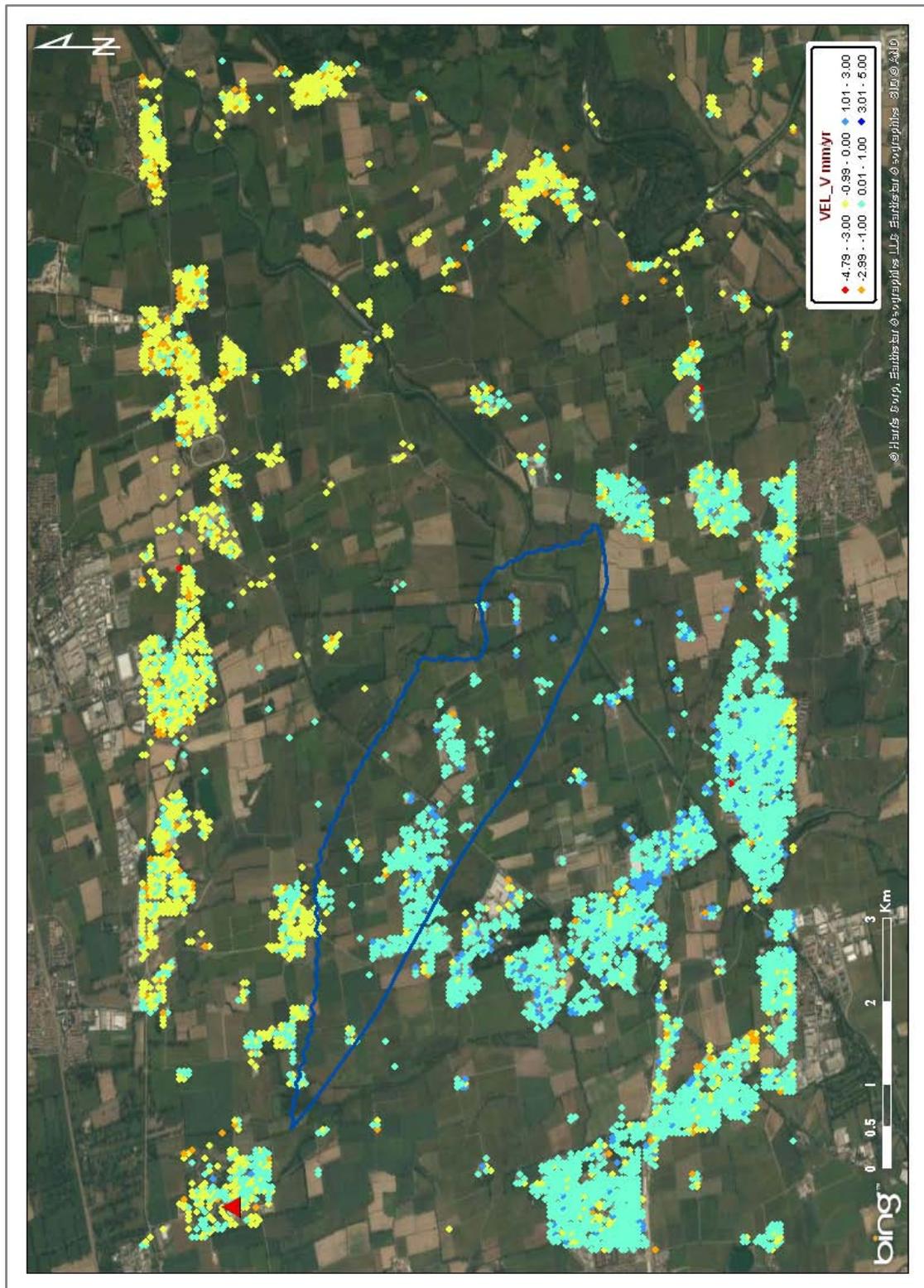


Fig.12 *Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti del rilievo LOCAL, così come registrati dal satellite prima della calibrazione.*



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 Milano.

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 Milano.

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 +0.58 mm/anno.

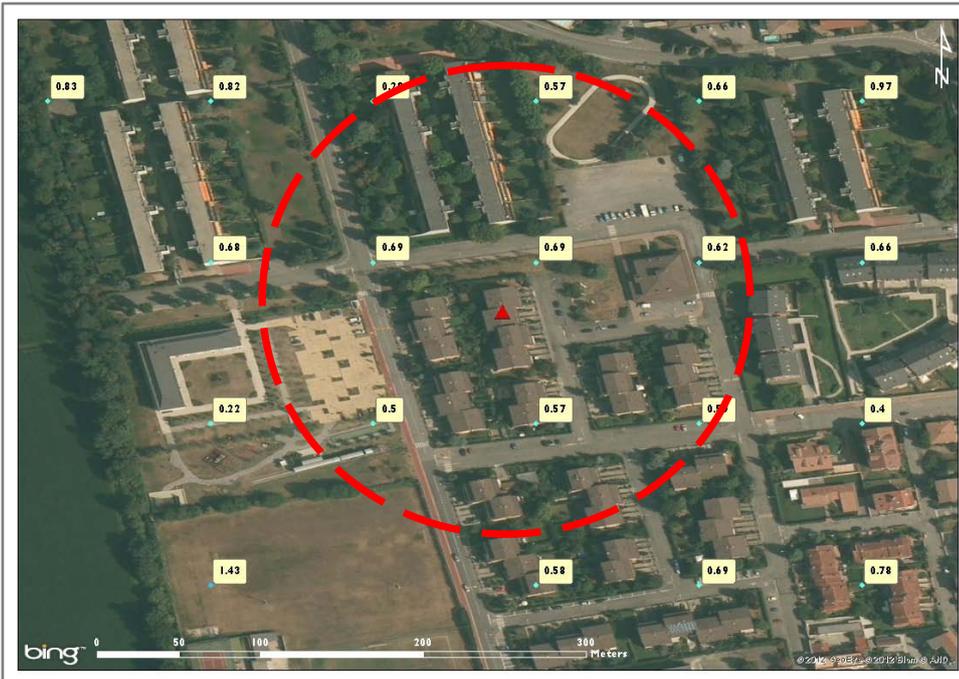


Fig.14 *Visualizzazione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione LOCAL con indicazione dei punti REGIONAL più vicini. L'area per la quale è stata calcolata la media delle velocità verticali è delimitata da un cerchio avente un raggio di circa 150 metri.*

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 +0.58 mm/anno.*

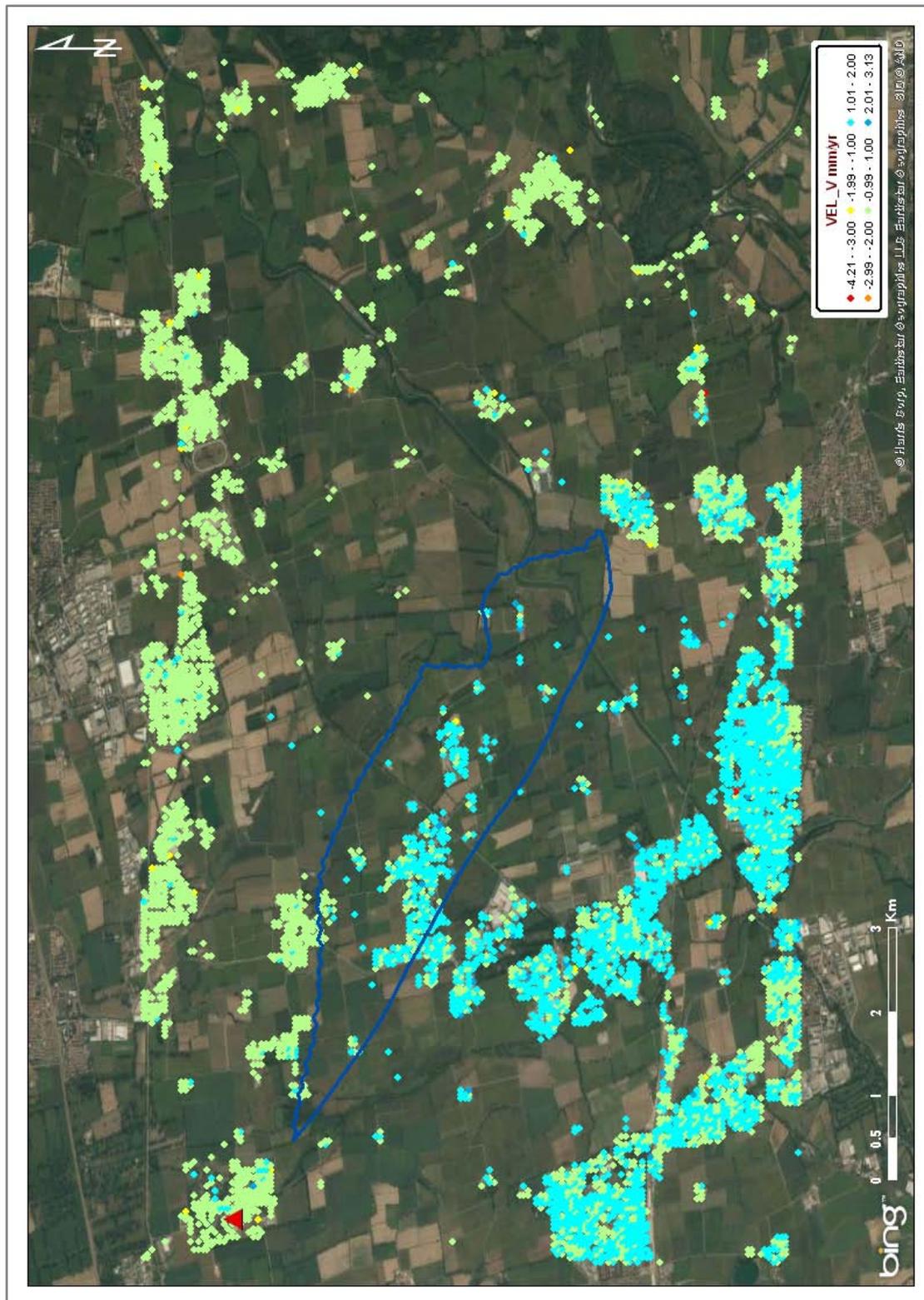
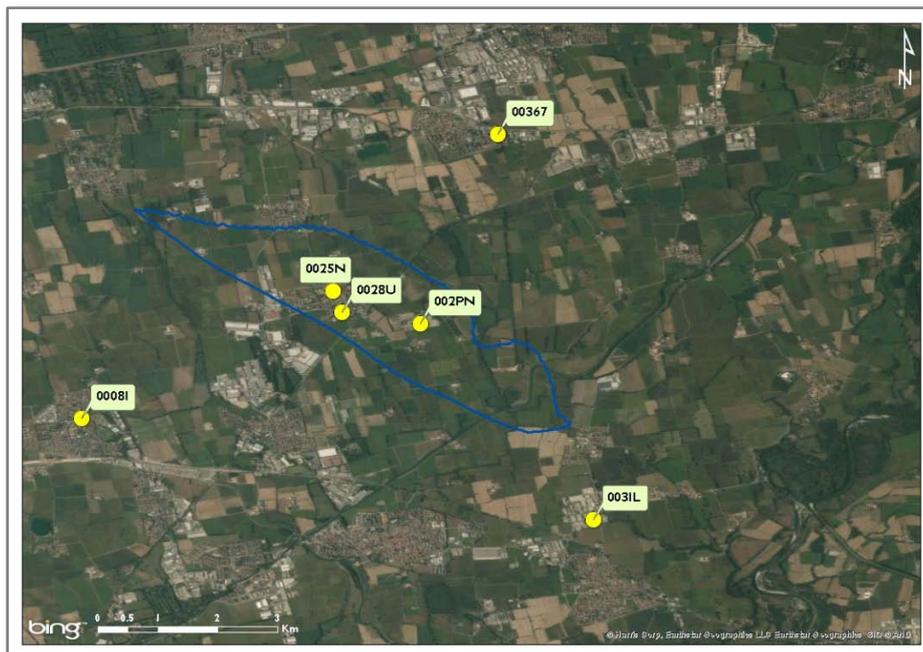


Fig.16 *Visualizzazione in scala di colori dei valori di velocità verticale relativi all'analisi LOCAL dopo la variazione di +0.58 mmlanno effettuata sull'intero dataset. Il triangolo rosso indica la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità.*

## 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.

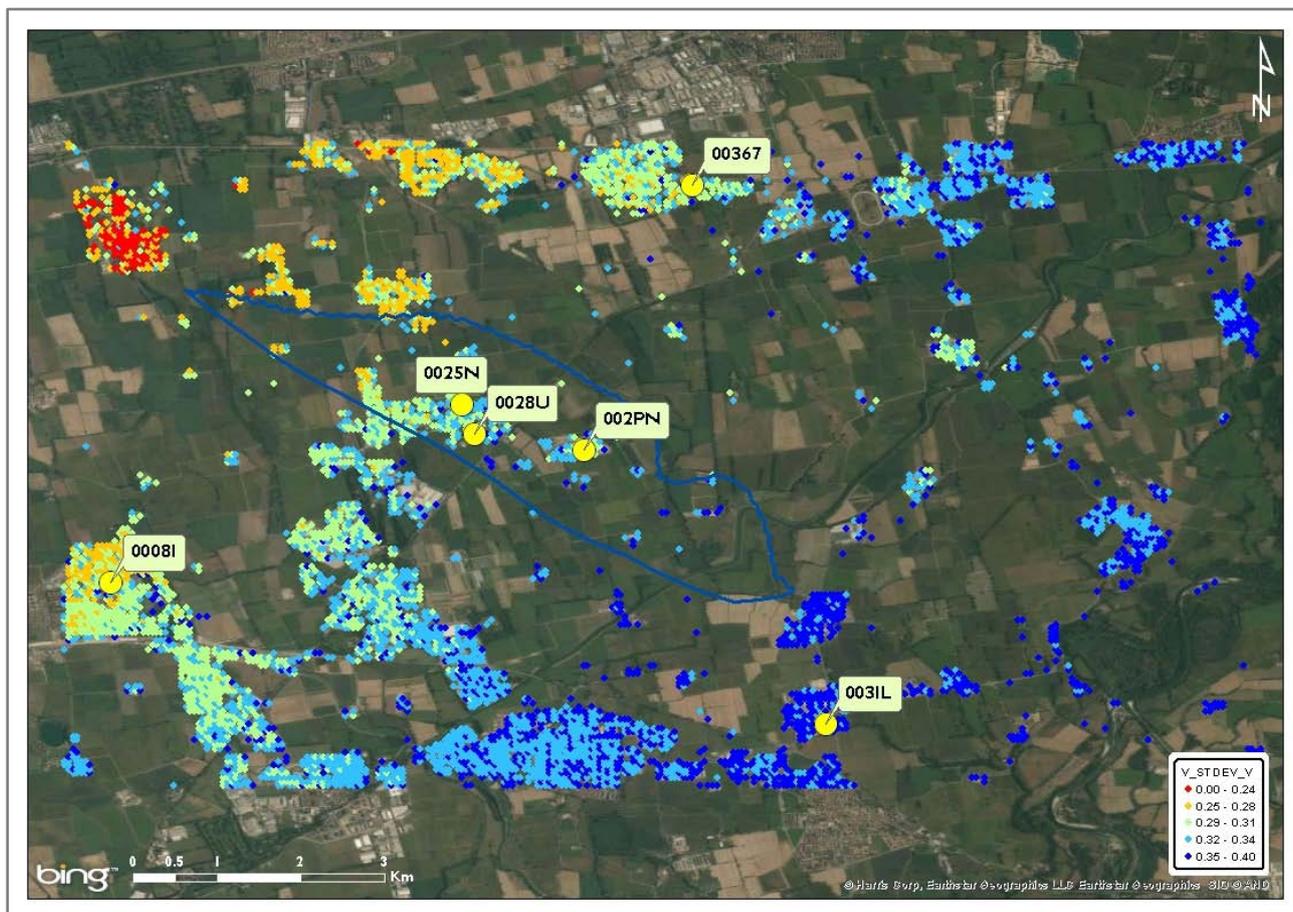


Fig.17 **Rappresentazione grafica della Deviazione Standard della velocità verticale.**

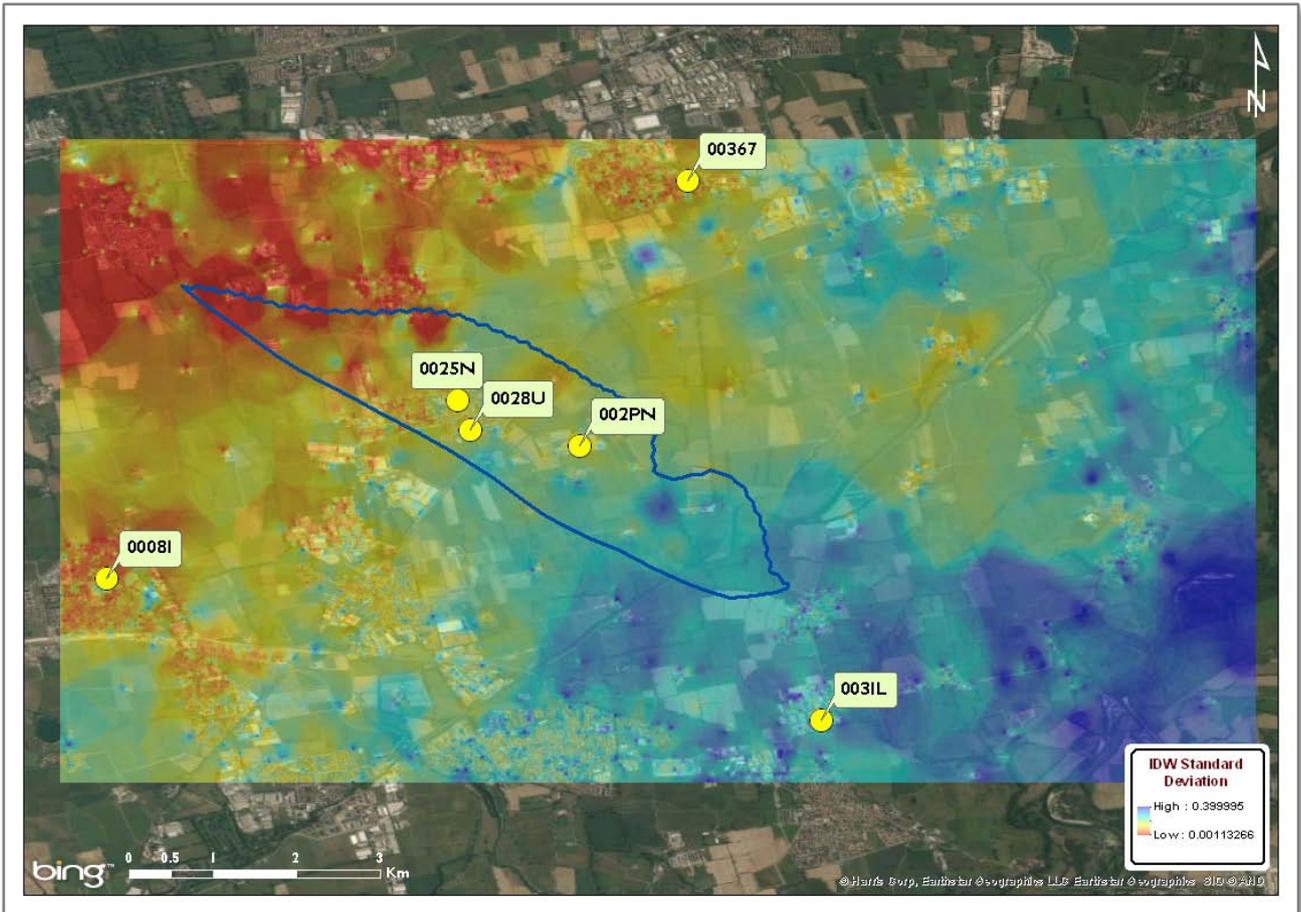


Fig.18 **Interpolazione secondo il metodo di "Inverse Distance Weighted" della deviazione standard delle velocità verticali.**

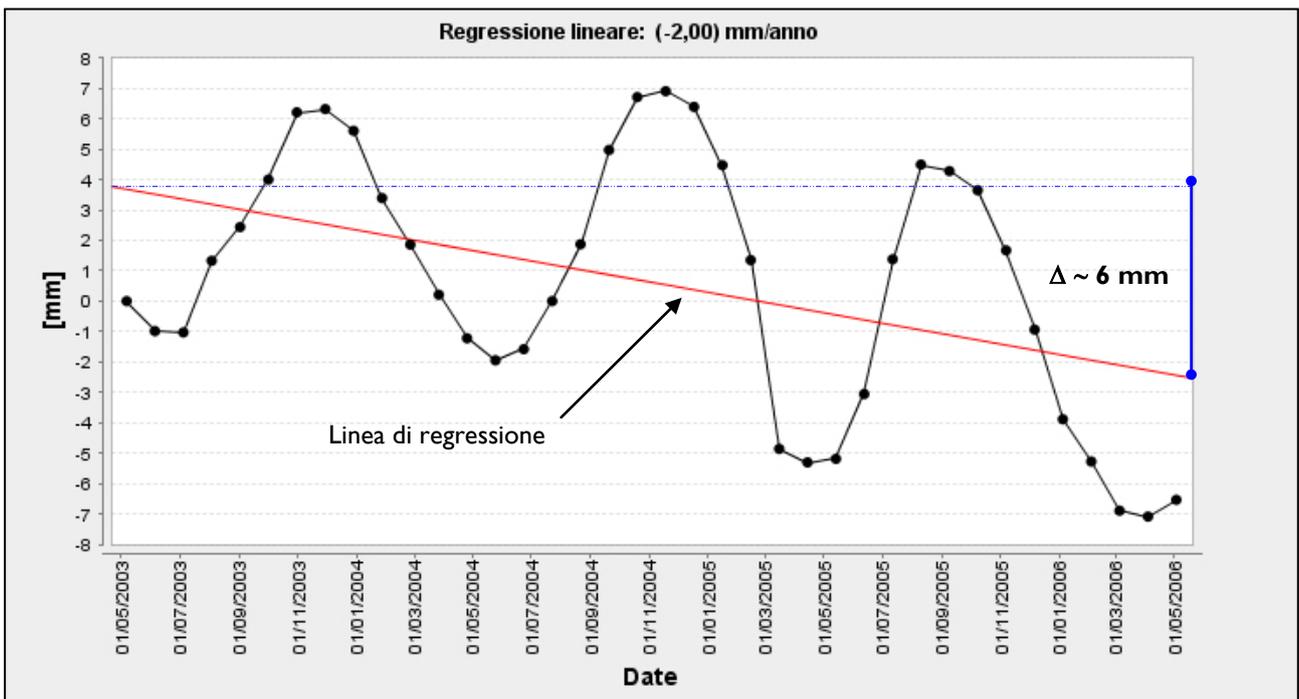


Fig.19 **Esempio di serie storica con valori di subsidenza di circa 2 mm/anno.**

In questo progetto oltre alle velocità sono state scomposte anche le serie storiche. Per ogni cella di risoluzione 50 m per 50 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. 19 e 20).

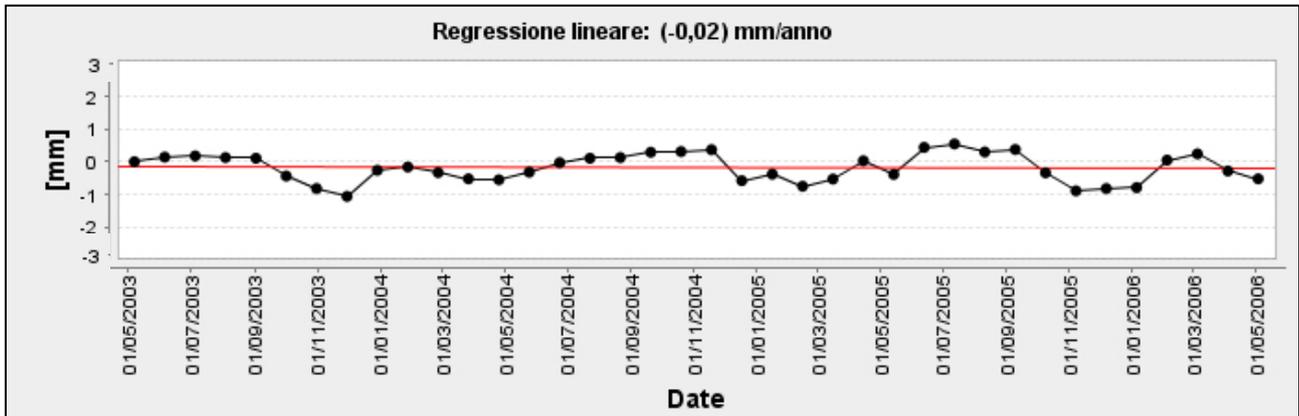


Fig.20 Esempio di serie storica con valori di regressione lineare nulla.

A titolo di esempio nelle pagine successive si mostra l'andamento delle serie storiche scomposte di 6 punti ottenuti sempre da griglia regolare, risoluzione 50m per 50m.

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 coerenza riferita sia alla geometria ascendente che discendente. La scelta delle serie storiche di esempio è stata definita in base agli "indici di precisione", più precisamente in base alla sua deviazione standard (fig. 17 e 18), mantenendo, ove possibile, la stessa posizione del PS usata nei report precedenti. Ognuna delle curve viene inoltre paragonata con la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Settala (fig. 21).

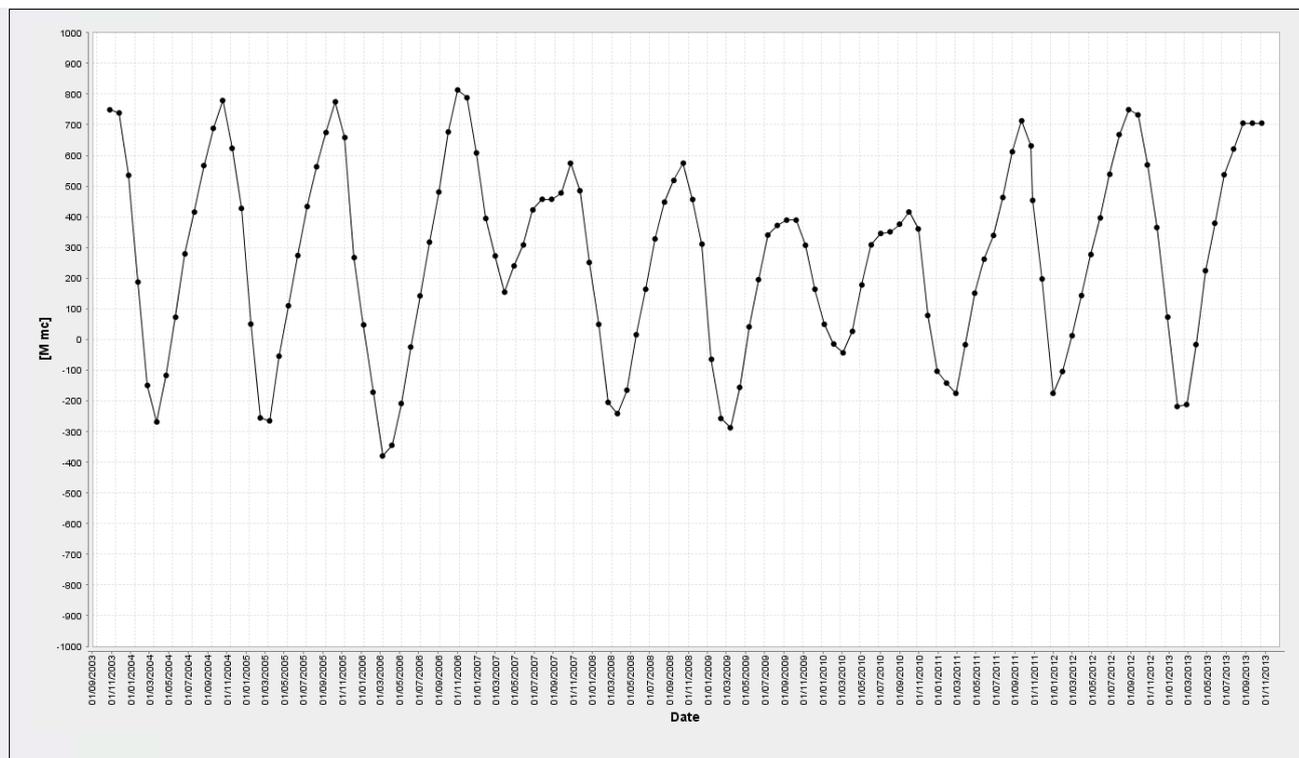
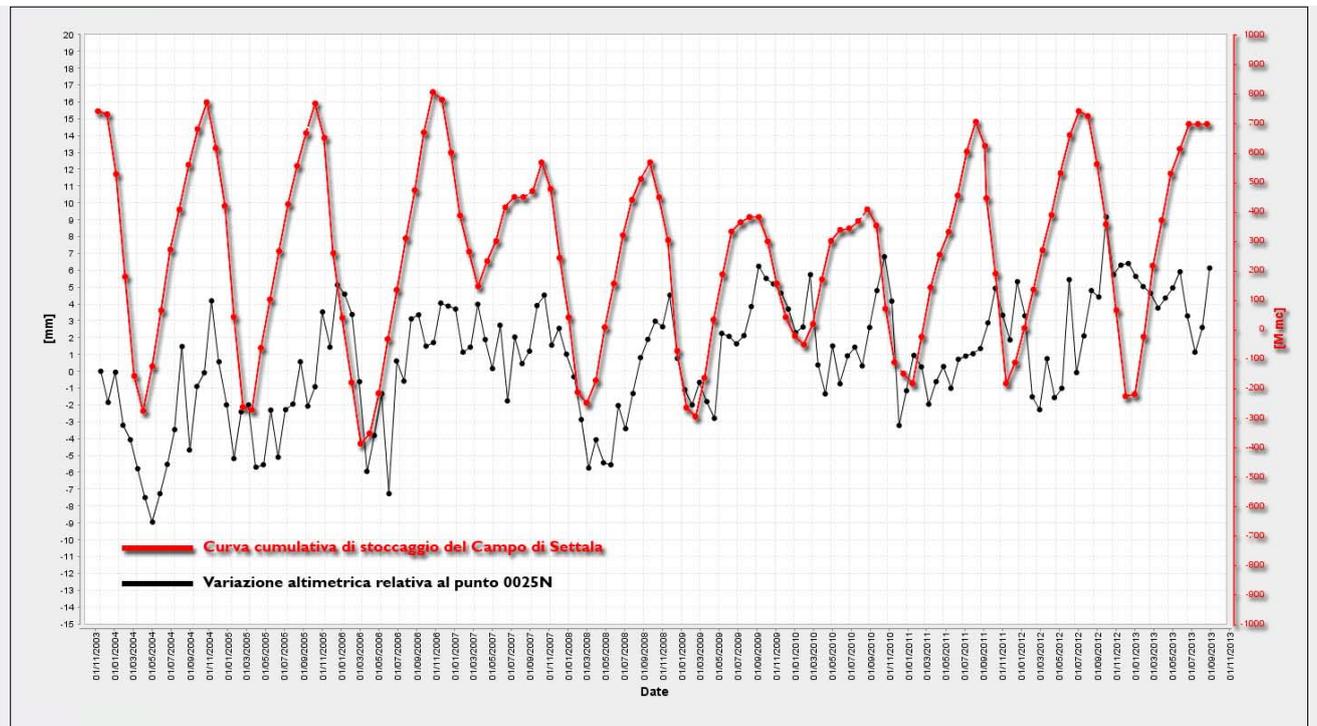
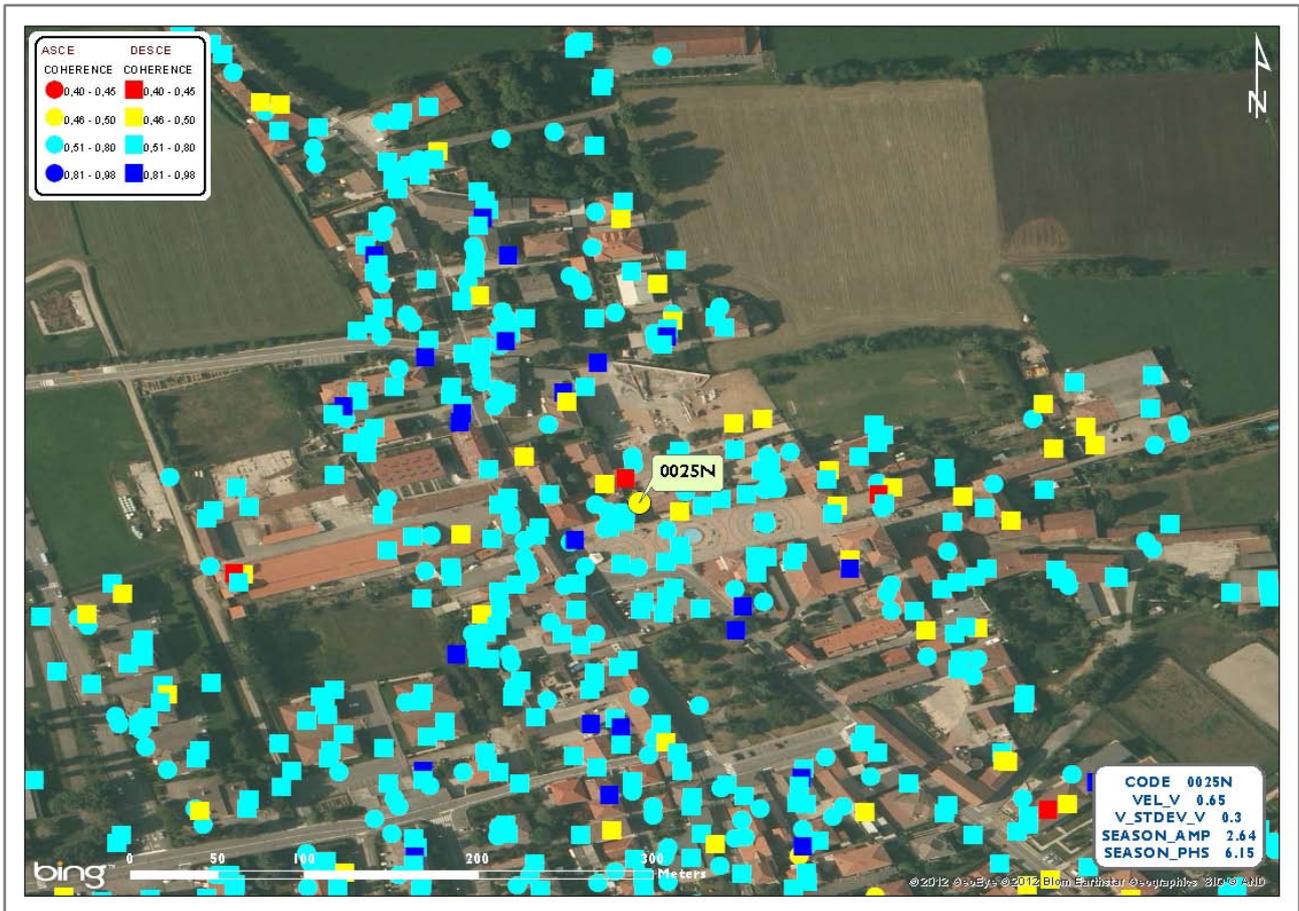


Fig.21 Curva cumulativa di stoccaggio del campo a gas di Settala (unità di misura in  $m^3 \times 10^6$ ).

**Punto interno al giacimento – 0025N**



**Fig.22 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 0025N e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settila.**

### Punto interno al giacimento – 0028U

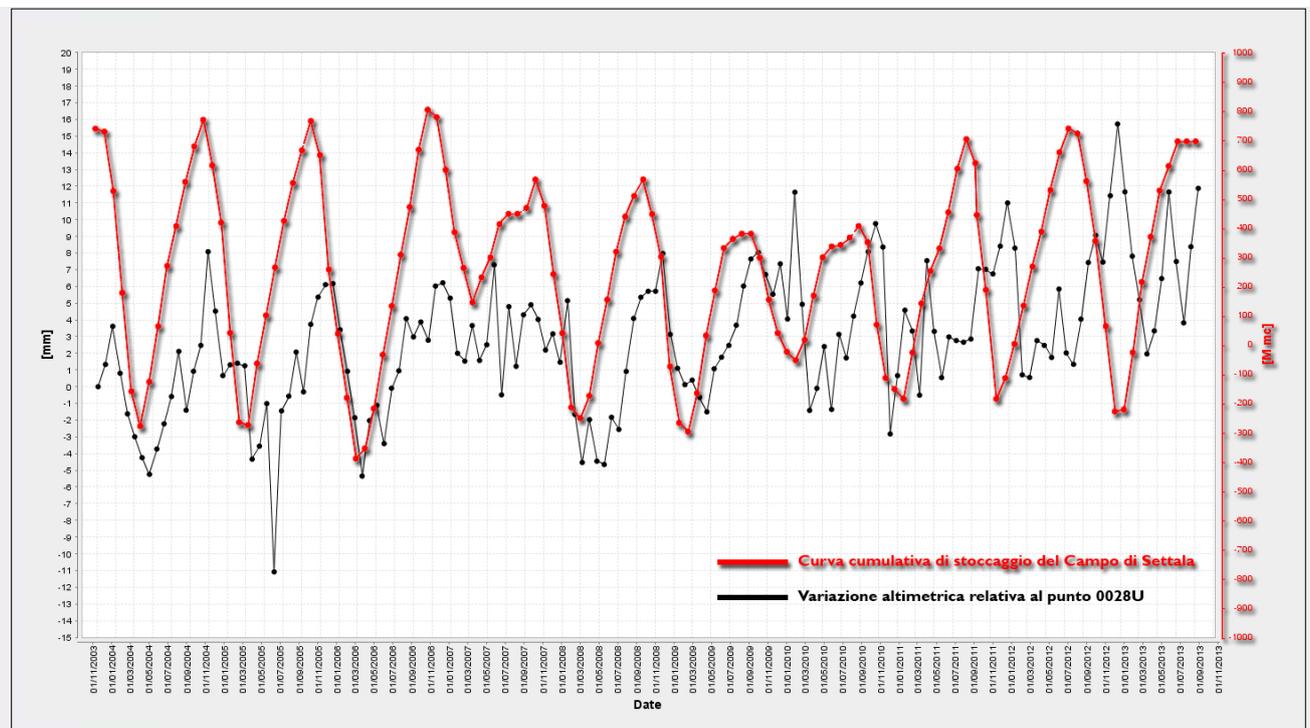
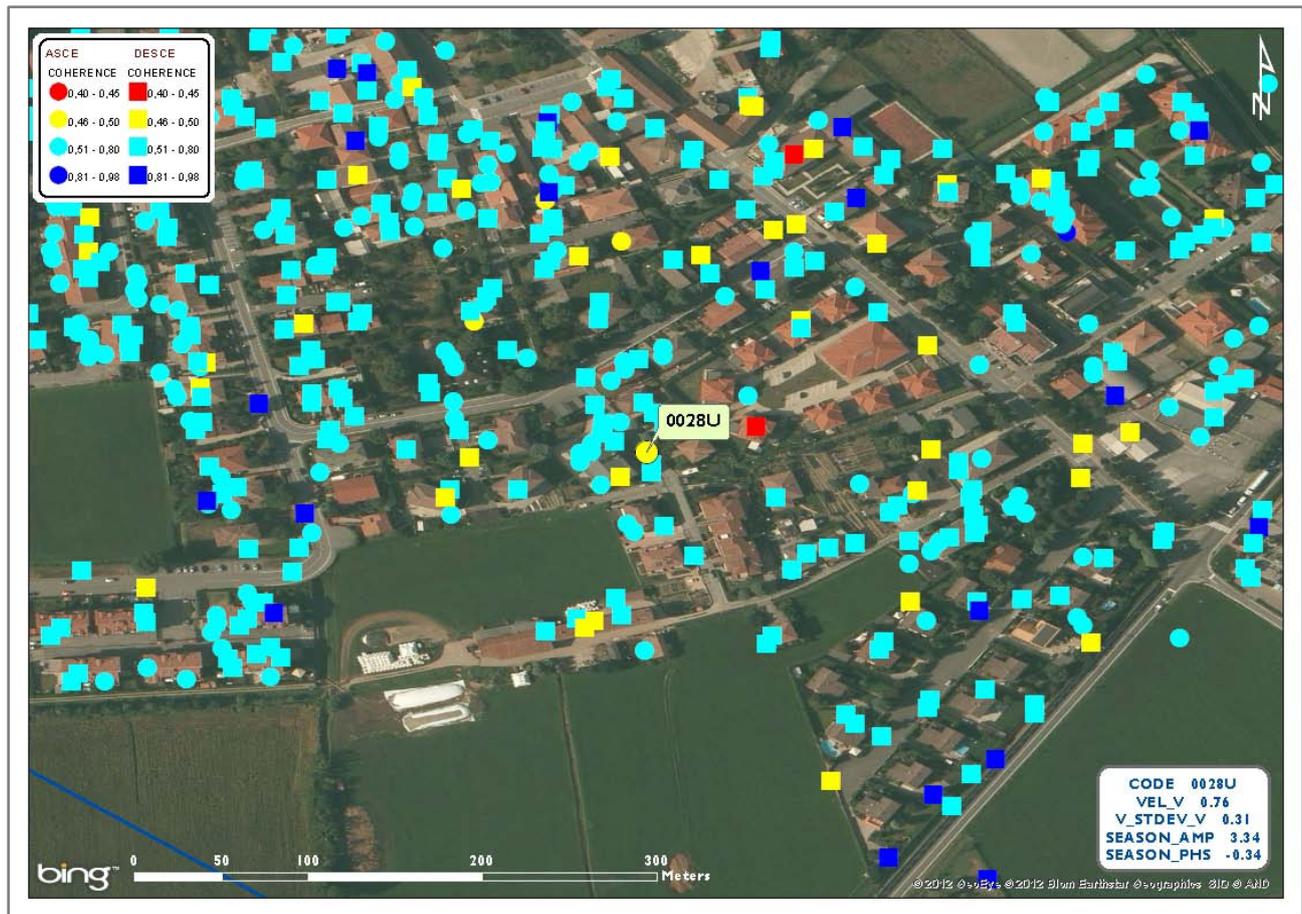


Fig.23 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 0028U e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settila.



**Punto esterno al giacimento – 00367**

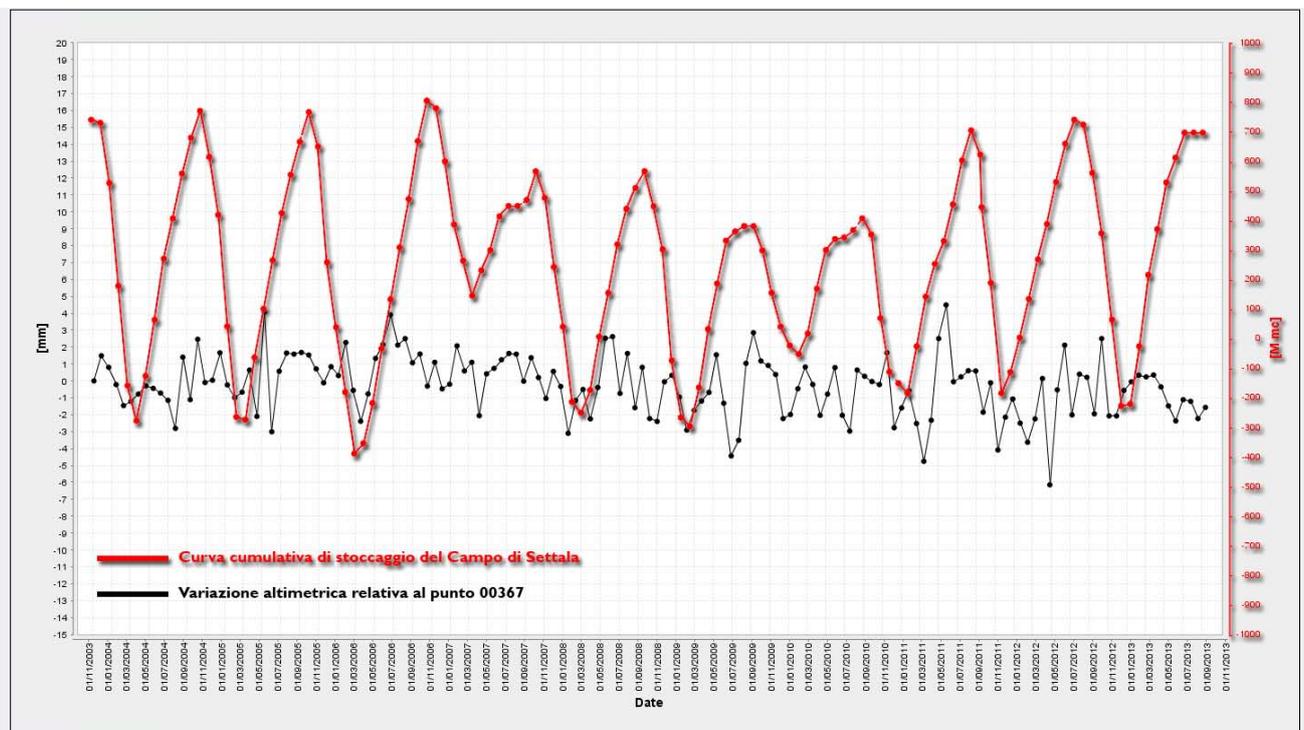
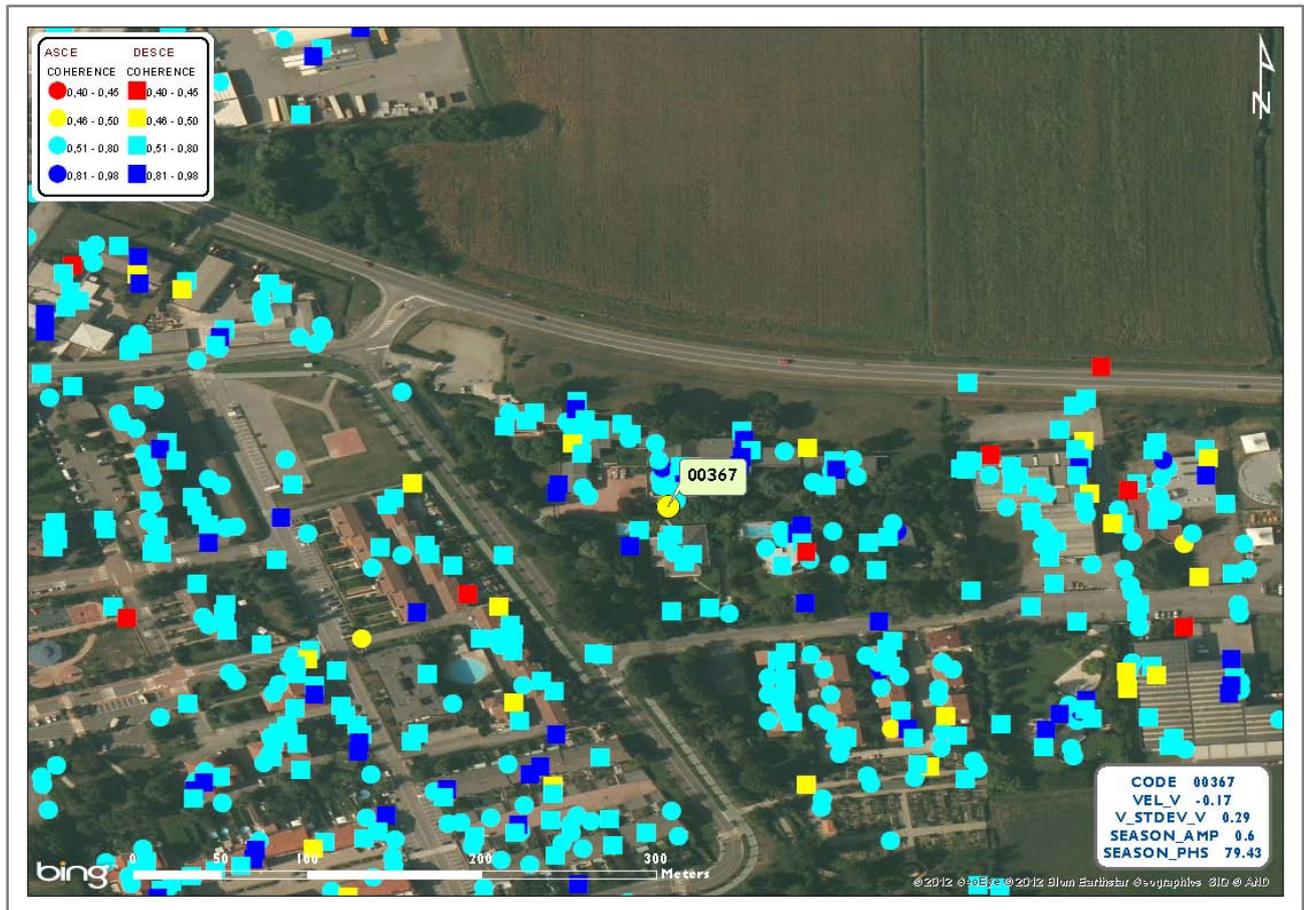
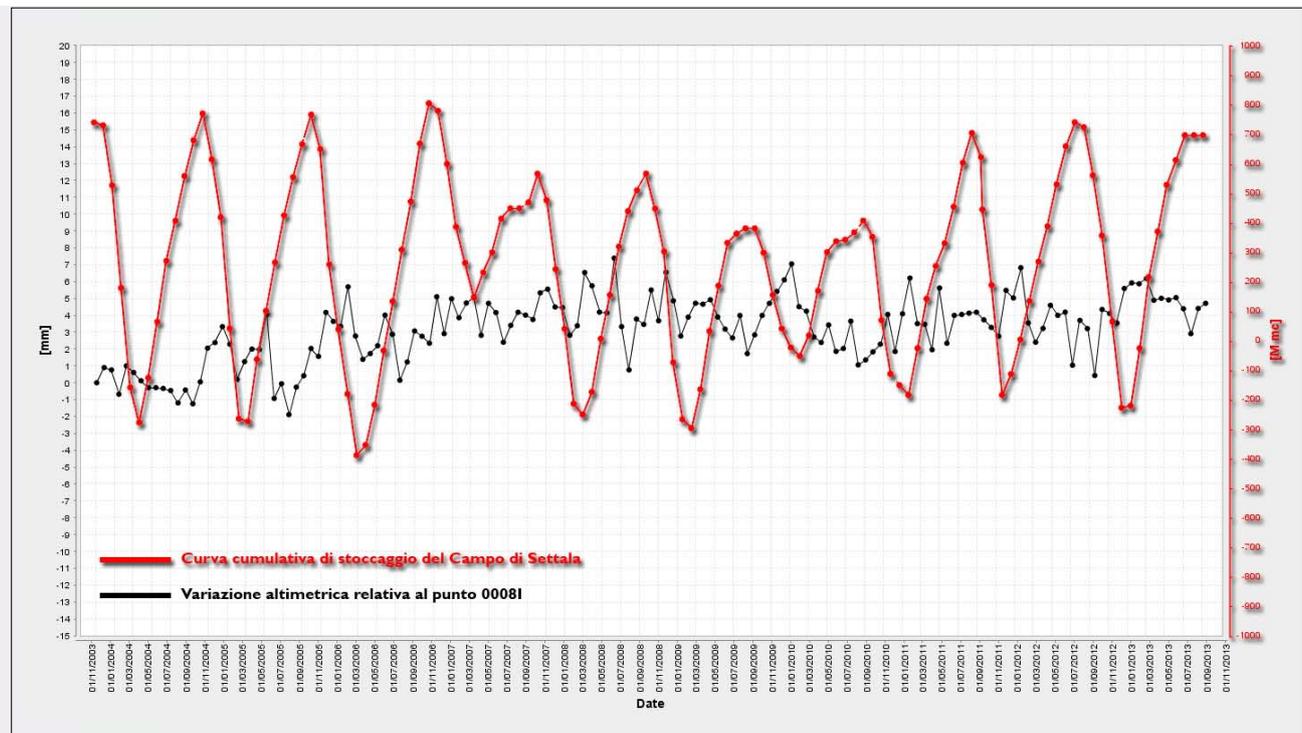
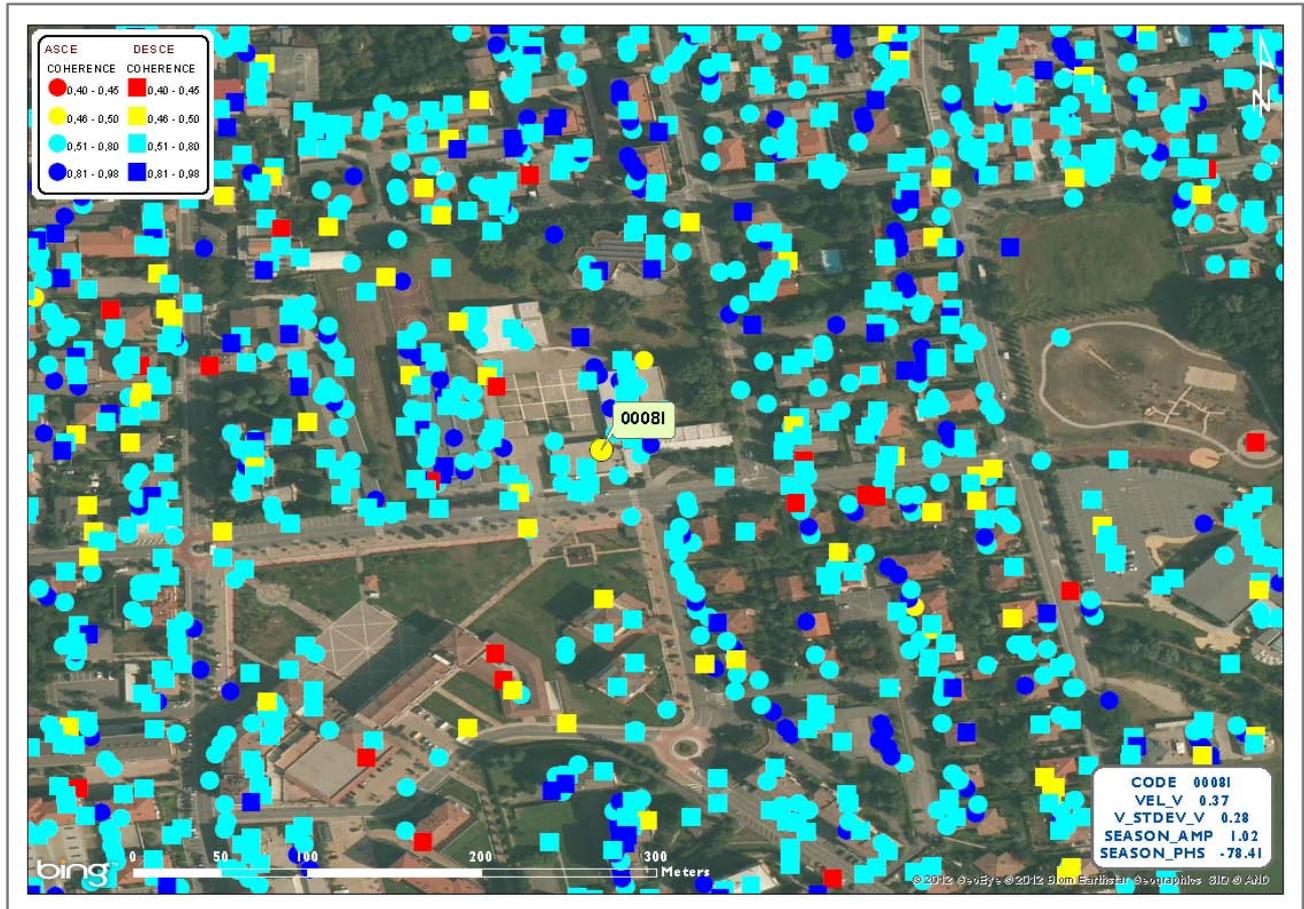


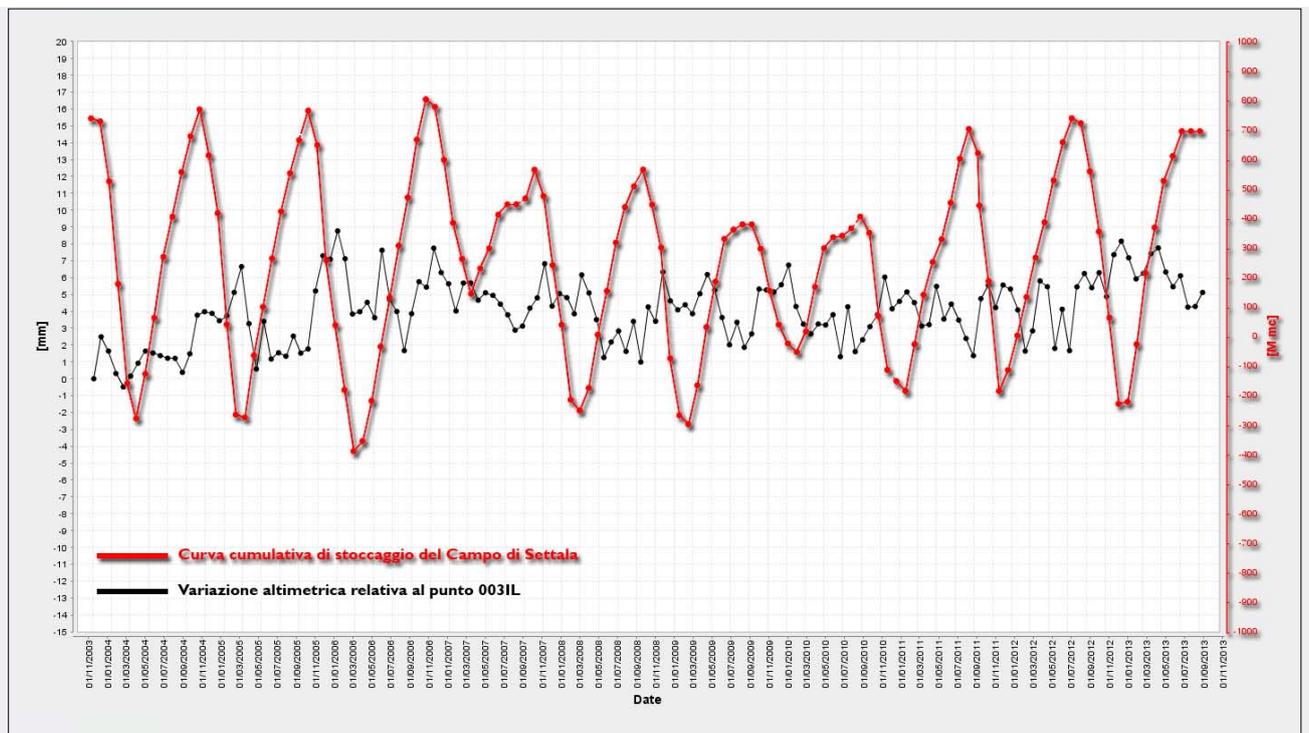
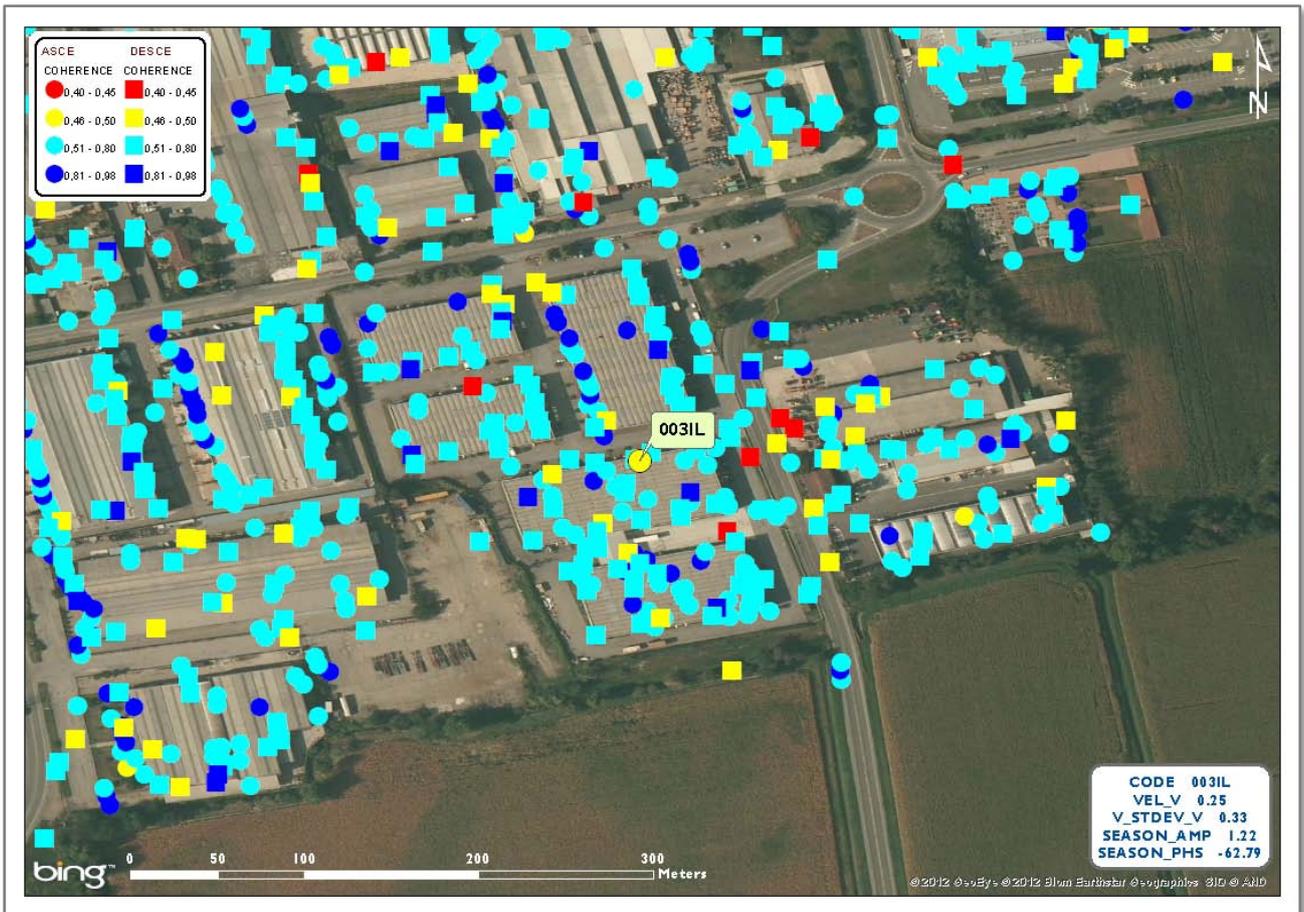
Fig.25 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 00367 e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settila.

**Punto esterno al giacimento – 00081**



**Fig.26 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 00081 e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala.**

**Punto esterno al giacimento – 003IL**



**Fig.27 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto 003IL e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settila.**

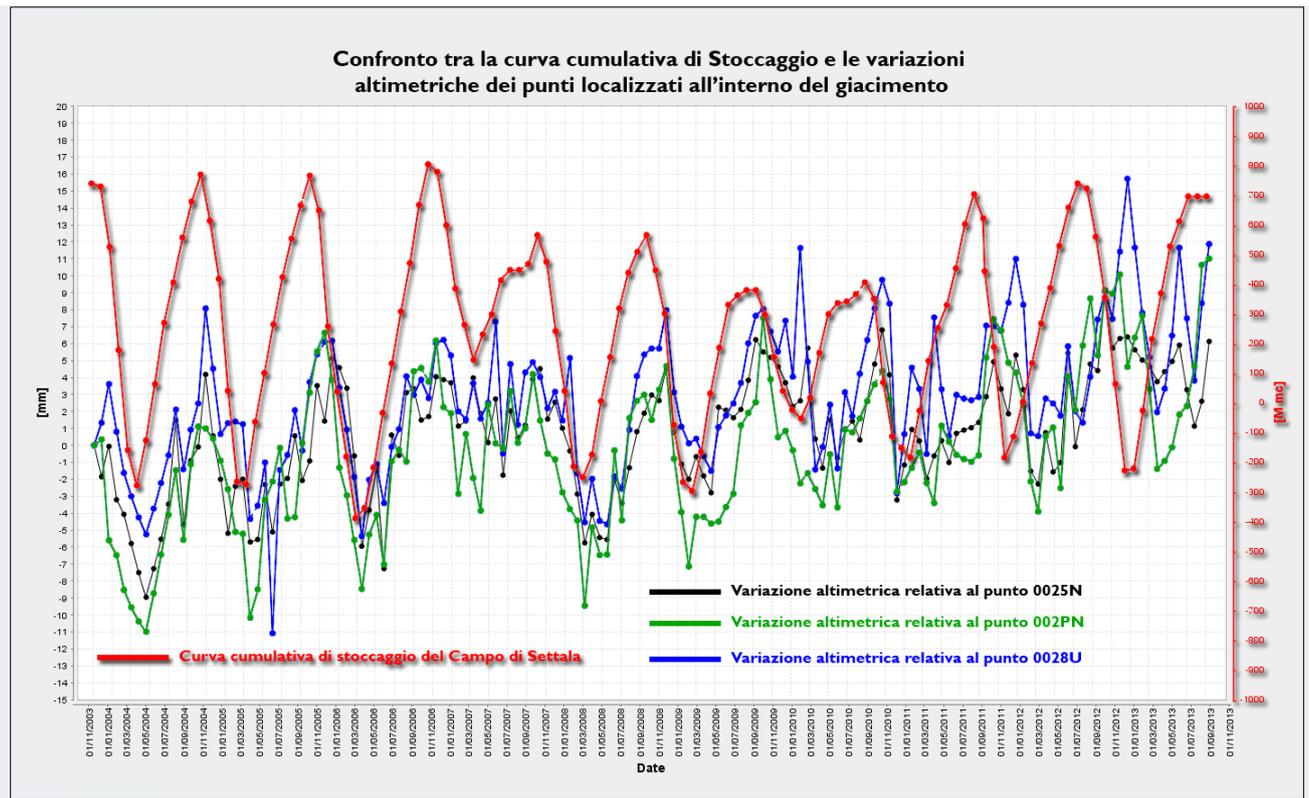


Fig.28 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala e le serie storiche dei punti scelti all'interno dei limiti del campo.

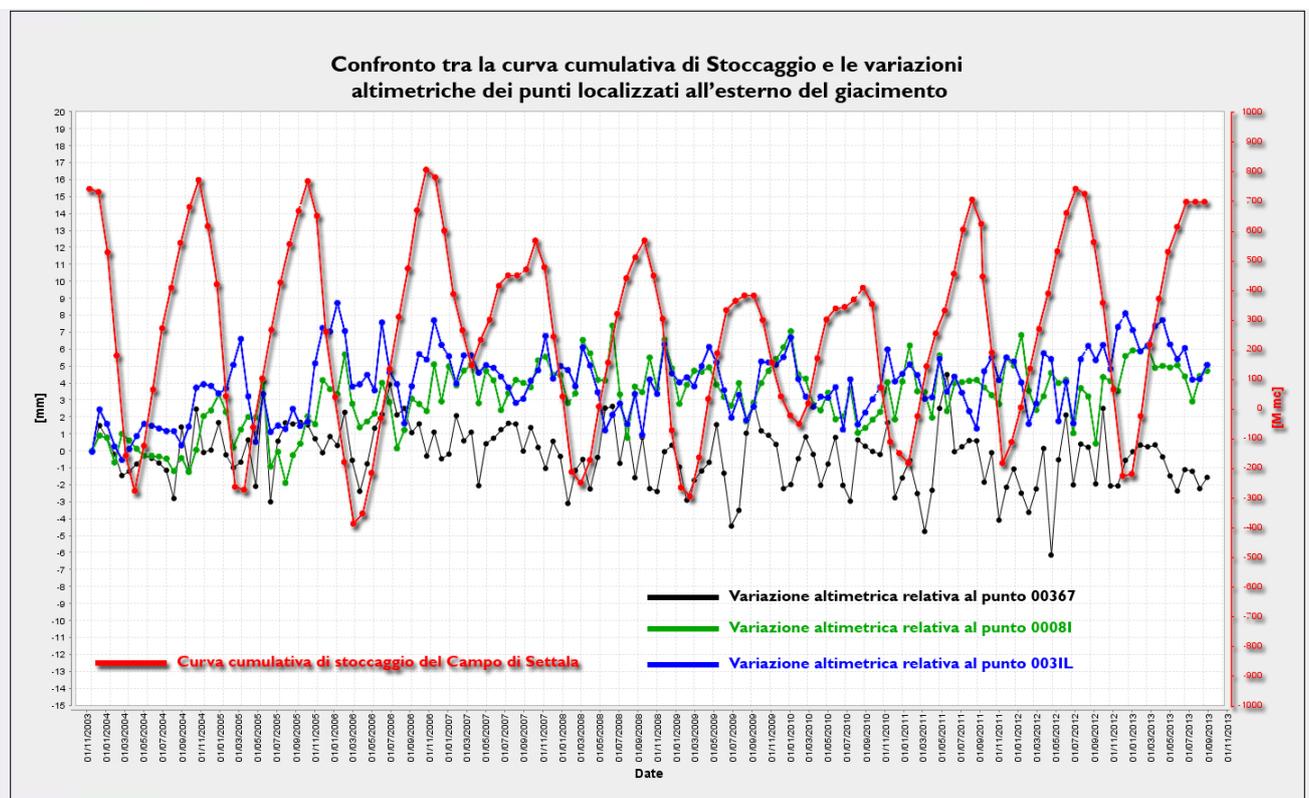


Fig.29 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Settala e le serie storiche dei punti scelti all'esterno dei limiti del campo.

## Dati CGPS

Al fine di ottenere valori di velocità assoluti da utilizzare per la calibrazione del dato SAR, dato che risulta relativo al punto di riferimento scelto, nel mese di dicembre 2008 è stato installata una stazione CGPS di monitoraggio in continuo presso la Centrale Gas Stogit di Settala (MI).

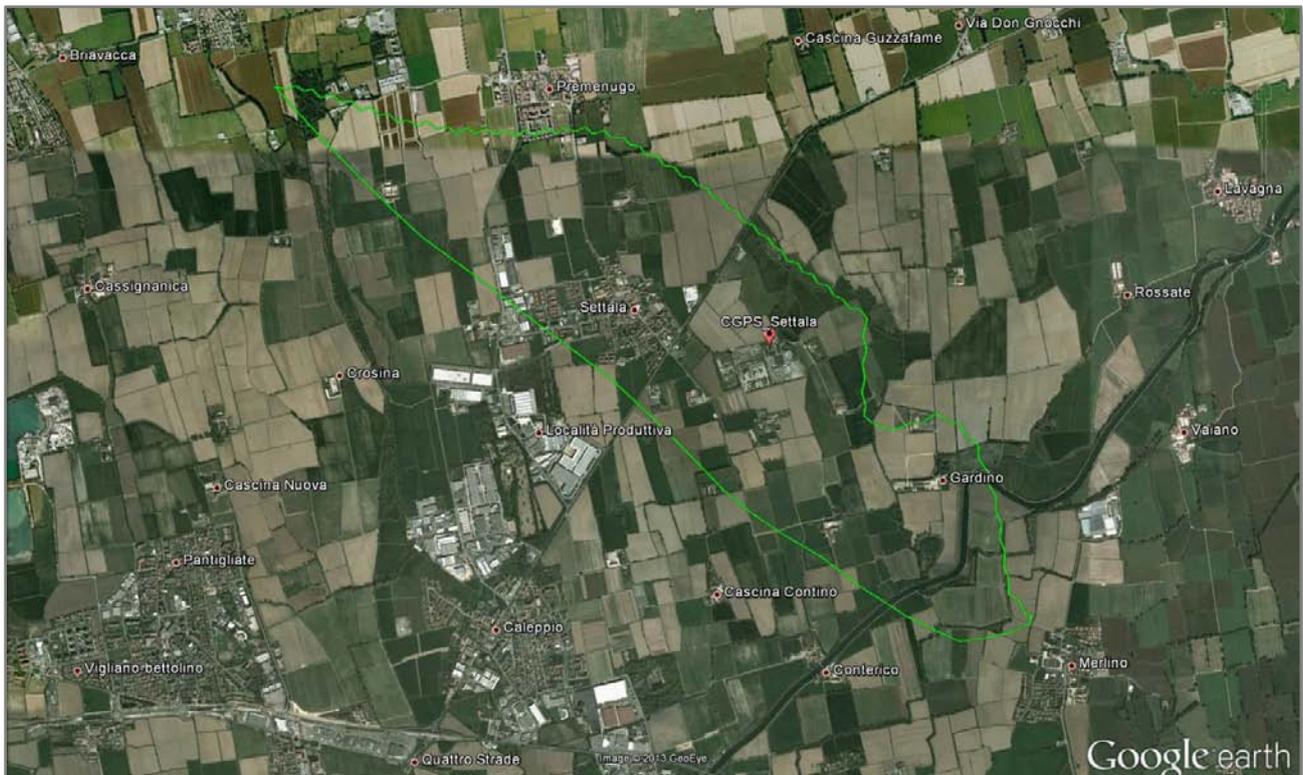


Fig.30 Localizzazione del CGPS di Settala situato all'interno della Centrale Gas Stogit.

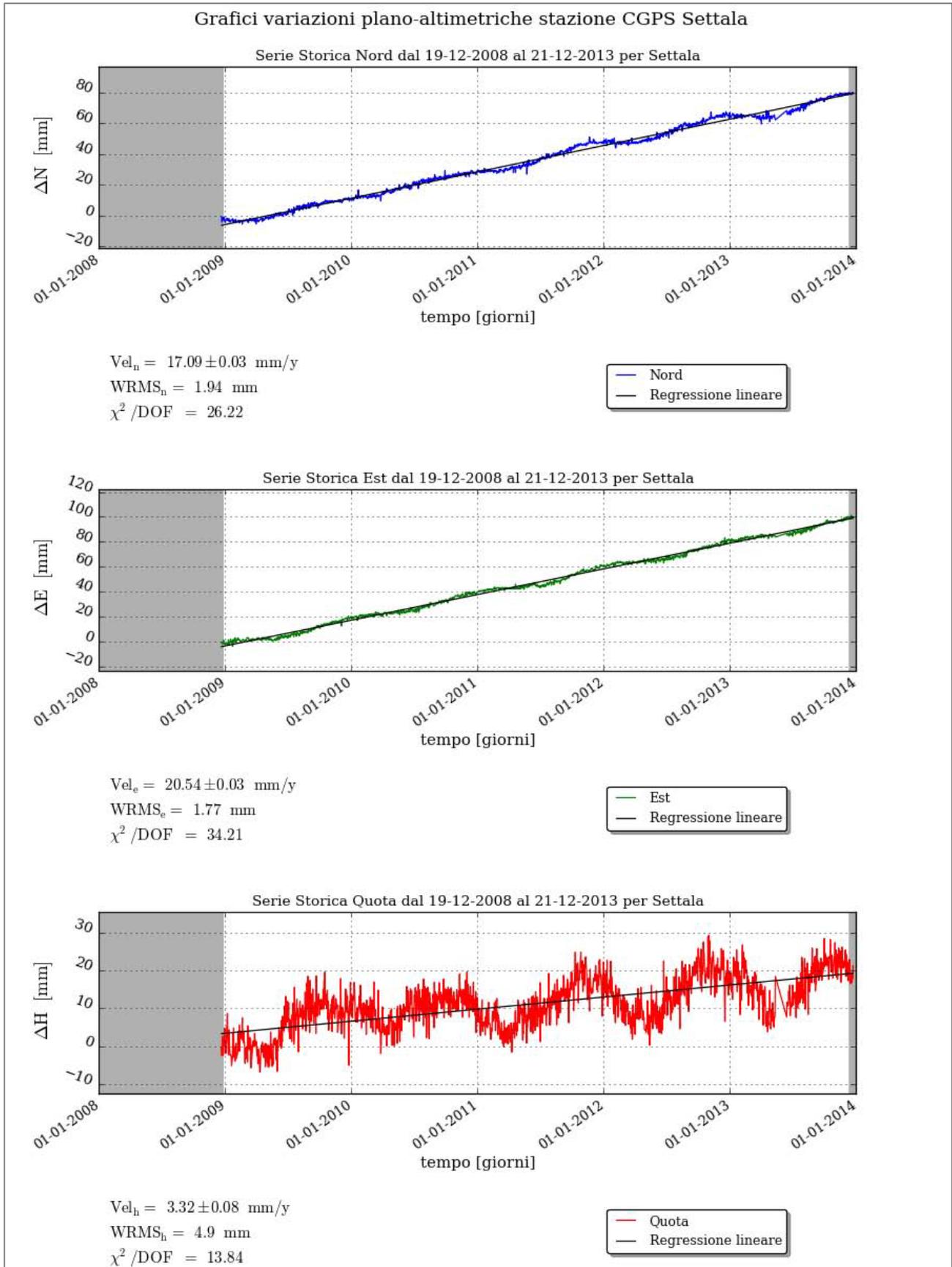


Fig.31 **Grafici delle variazioni piano-altimetriche della stazione CGPS di Settala relative al periodo 12/2008 - 12/2013.**

	<b>eni S.p.A.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date January 2014	Doc. N°. GEOD_I401_d72	Rev. 0	Sheet 3-34	Of 34
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	---------------	----------

Le stazioni furono monumentale all'interno di siti Stogit, adottando tutte le opportune procedure operative per garantire la stabilità dei manufatti e l'affidabilità del sistema; ogni stazione è dotata di una scheda di telemetria che consente la gestione remota della strumentazione, la verifica dello stato operativo e il trasferimento dei dati al centro di controllo.

Tutti i dati elaborati sono successivamente sottoposti al controllo di un ente terzo (attualmente l'Università degli Studi di Bologna, presso il dipartimento di Fisica) per la validazione e certificazione. L'operazione di verifica avviene, per esigenze interne, con un ritardo generalmente di 12/18 mesi e per questa ragione, allo stato attuale non sono ancora disponibili dati certificati, in quanto attualmente sono in fase di certificazione i dati fino al 2012.

Si riportano comunque i valori CGPS (+3.3 mm/anno in quota per il periodo 12/2008-12/2013 Fig. 31), unicamente a titolo informativo, considerando che l'affidabilità delle elaborazioni è stata più volte verificata nel corso degli anni.

## 3 - Analisi delle elaborazioni

### Analisi REGIONAL

L'analisi standard a scala regionale effettuata sull'area di Milano evidenzia valori di velocità verticali quasi uniformemente positivi e mediamente compresi tra -0.5 e +1.5 mm/anno.

Andando ad evidenziare i soli punti situati all'interno del giacimento, risulta esserci un valore medio pari a +1.23 mm/yr, in linea con quanto evidenziato nel report precedente (GEOD\_I302\_d42).

Tale range di valori viene confermato dalla stima delle velocità verticali effettuate mediante il CGPS installato presso il Politecnico di Milano (+0.70 mm/anno) perfettamente in linea con quanto evidenziato dai valori riportati nel report precedente (GEOD\_I302\_d42).

### Analisi LOCAL

L'analisi locale effettuata sull'area occupata dal giacimento di Settala evidenzia valori di velocità verticali medi (+1.11 mm/anno) in linea con quanto evidenziato nella precedente relazione (GEOD\_I302\_d42); tali valori risultano oltremodo in linea con la velocità di deformazione registrata dal CGPS di Milano e con la distribuzione media delle velocità verticali dell'intera area.

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

### Analisi delle serie storiche

L'analisi delle serie storiche è stata effettuata su 6 punti scomposti, tre dei quali sono stati selezionati all'interno dei limiti del giacimento.

I punti interni ai limiti di giacimento presentano elevate periodicità e oscillazioni che si attestano mediamente tra i 5 e i 10 millimetri. Le tre le serie storiche considerate presentano un'elevata correlazione con la curva cumulativa di stoccaggio con shift temporali maggiori di 30 giorni.

I punti scomposti localizzati all'esterno dei limiti di giacimento, invece, non presentano periodicità elevate, ad eccezione del punto 00367 situato a nord del campo la cui serie storica sembra seguire il trend della curva di gas movimentato. Il suddetto punto è lo stesso presentato nella precedente relazione (GEOD\_I302\_d42), il cui nominativo era 00313. Gli altri punti considerati, invece, non sembrano essere correlabili con l'attività del giacimento di stoccaggio.