	<b>eni s.p.a.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date January 2013	Doc. N°. GEOD_1301_d39	Rev. 0	Sheet 1	Of 24
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	------------	----------

## Interferometria differenziale SAR e Tecnica PS


### Campo di Stoccaggio

### FIUME TRESTE

### Concessione STOGIT

**(Aggiornamento dati Novembre 2012)**

0		G. DELL'ELCE		A. MOSCONI	January 2013
<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 2013	Doc. N°. GEOD_I301_d39	Rev. 0	Sheet 2-2	Of 24
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

# **EXP - SGEG GEOD**

GEODYNAMICS Department

Autore:

Gianluca Dell'Elce

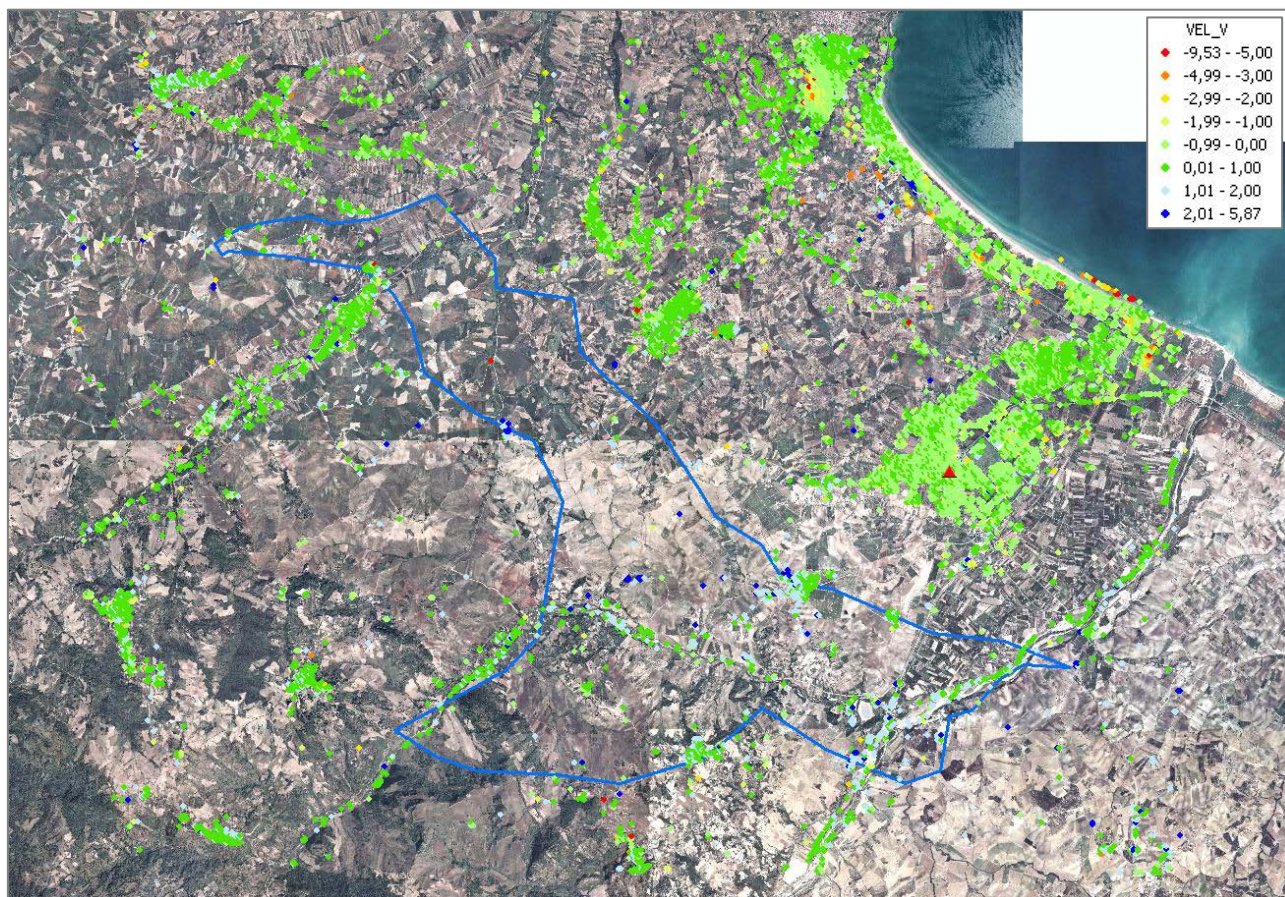
Gennaio 2013

## 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> .....	2-6
<b>2 - ANALISI DEL CAMPO DI FIUME TRESTE</b> .....	<b>2-9</b>
<i>Analisi LOCAL</i> .....	2-10
<i>Analisi delle serie storiche dei punti scomposti</i> .....	2-13
Punto interno al giacimento – <u>001YY</u> .....	2-16
Punto interno al giacimento – <u>00262</u> .....	2-17
Punto interno al giacimento – <u>00433</u> .....	2-18
Punto esterno al giacimento – <u>000US</u> .....	2-19
Punto esterno al giacimento – <u>001UT</u> .....	2-20
Punto esterno al giacimento – <u>004BN</u> .....	2-21
<b>3 - ANALISI DELLE ELABORAZIONI</b> .....	<b>3-23</b>
<i>Analisi LOCAL</i> .....	3-23
<i>Analisi delle serie storiche</i> .....	3-24

## Conclusioni

L'analisi interferometrica dei dati Radarsat attraverso la tecnica dei Permanent Scatterers sul campo di Cupello – San Salvo per il periodo Ottobre 2003 – Novembre 2012 evidenzia una certa stabilità dell'area occupata dal giacimento relativamente ai valori di deformazione superficiali riconosciuti all'esterno di esso.



### Variazioni Altimetriche +/- (mm/anno)

**Trend regionale**

**Non valutabile**

**Interne ai limiti  
di giacimento**

**+ 0.93 mm/y**

### Correlazione tra le serie storiche

**Ampiezza delle curve dei  
punti interni**

**da 3.0 a 5.0 mm**

**Correlazione tra i punti  
interni e le curve di  
stoccaggio**

**DISCRETA**

Si ricorda che i valori SAR qui presentati sono relativi al punto di riferimento utilizzato per l'analisi del dato e al quale viene assegnata una velocità verticale pari a zero. Inoltre, non disponendo di un punto del quale si conosca con esattezza la posizione nel tempo (es. CGPS) non è stato possibile calibrare in maniera assoluta l'intero dataset di velocità che rimane, pertanto, relativo alla posizione del punto di riferimento utilizzato in fase di processing e localizzato presso l'abitato di San Salvo.



## 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.

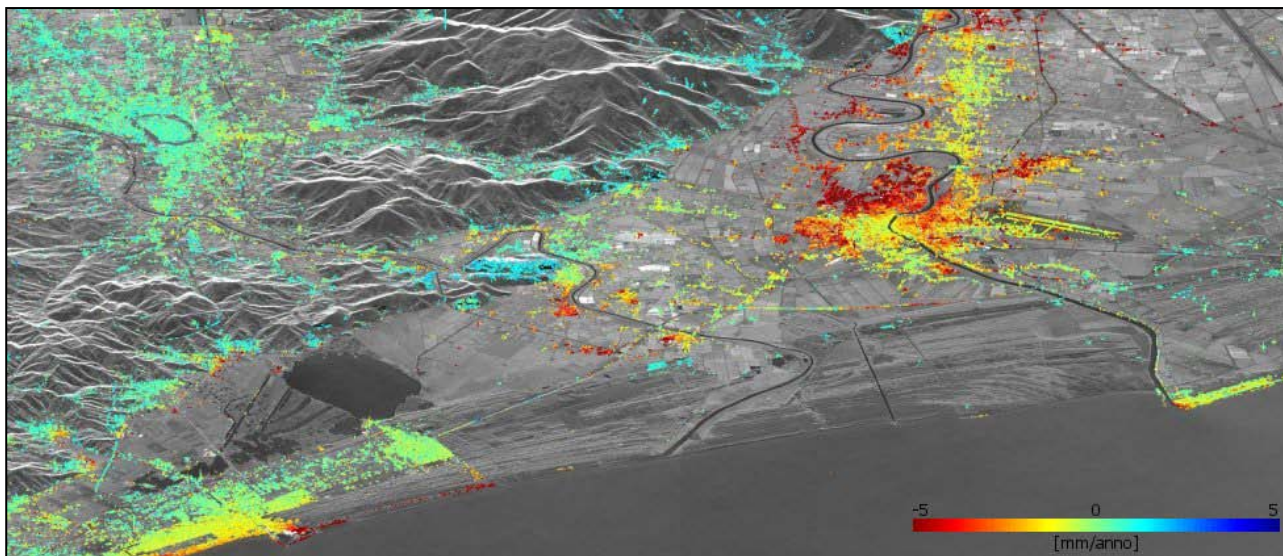



Fig.1 **Esempi di subsidenza nell'area di Pisa.**

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 2013	Doc. N°. GEOD_I301_d39	Rev. 0	Sheet 2-6	Of 24
--	----------------------------	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

## 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 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 2013	Doc. N°. GEOD_I301_d39	Rev. 0	Sheet 2-7	Of 24
--	--	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

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 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 2013	Doc. N°. GEOD_I301_d39	Rev. 0	Sheet 2-8	Of 24
---	--	----------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

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).



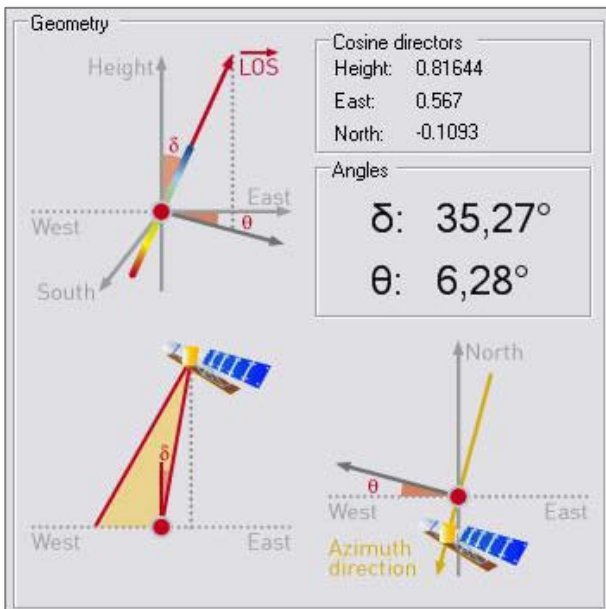
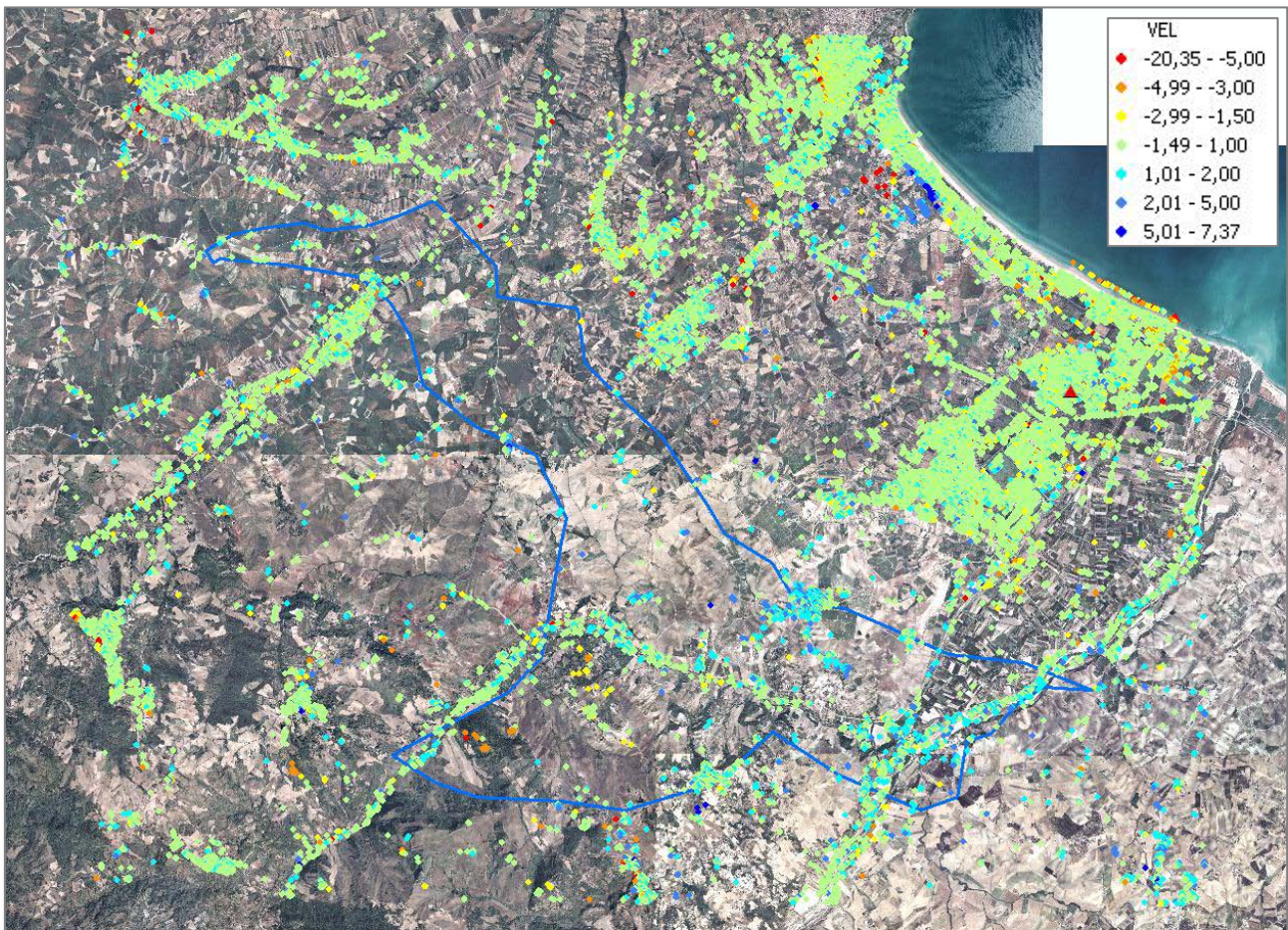
## 2 - ANALISI DEL CAMPO DI FIUME TRESTE



Fig.2 **Ubicazione del giacimento di Fiume Treste, situato tra le province di Pescara e Campobasso.**



## Analisi LOCAL

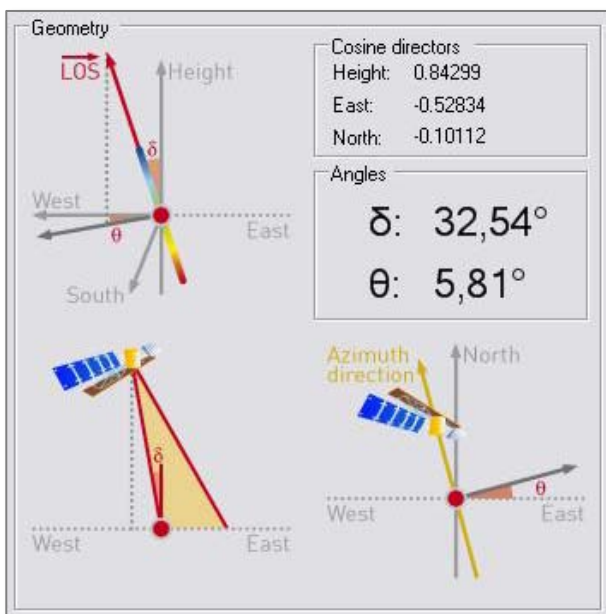
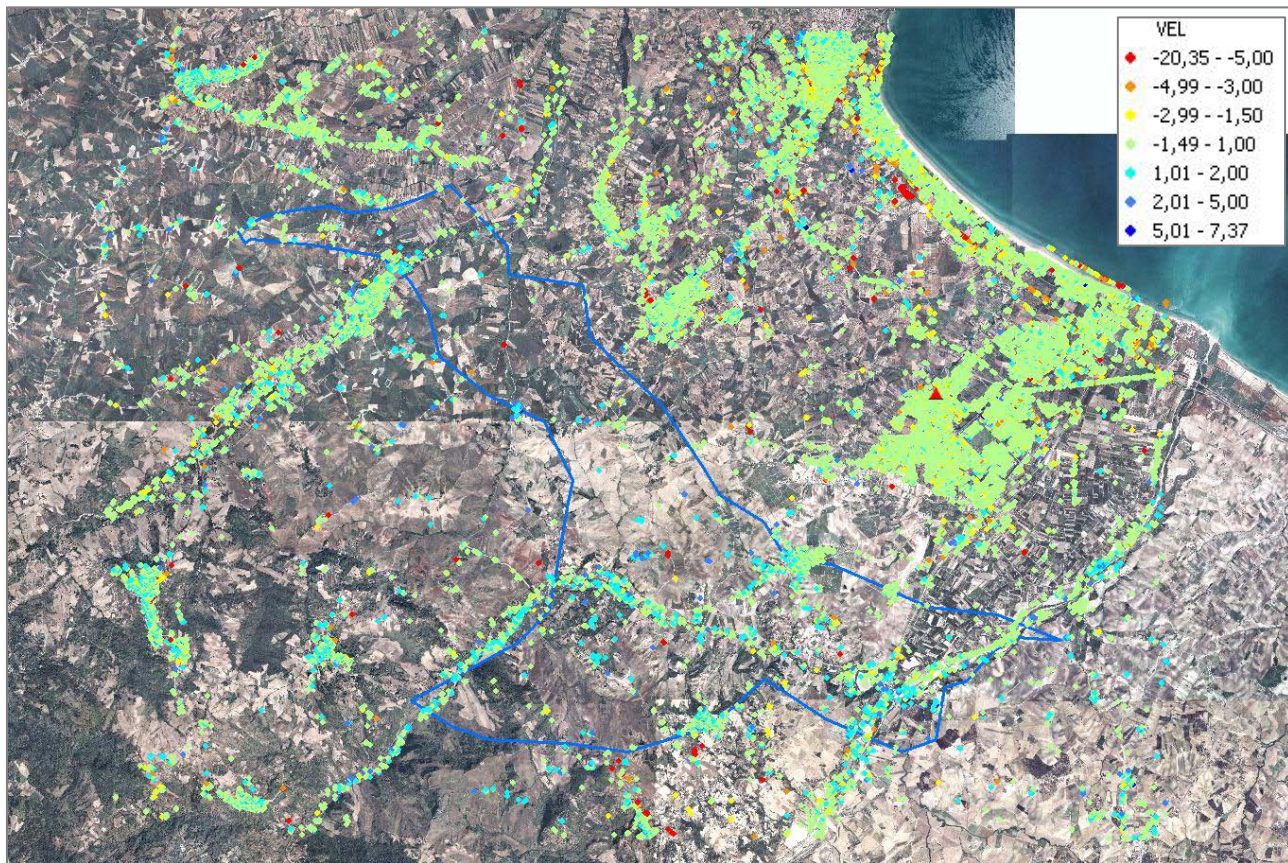


**Generic Information**

Satellite used:	radarsat None	Mode used:	RSAT-S3 None
Analysis Type:	Standard PS Analysis		
Orbit geometry:	Descending	PS number:	38227
Master Image:	20070401	Scenes number:	114
First Image:	20031007	Last Image:	20121124

Fig.3 **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.**





Generic Information			
Satellite used:	radarsat None	Mode used:	RSAT-S3 None
Analysis Type:	Standard PS Analysis		
Orbit geometry:	Ascending	PS number:	37701
Master Image:	20060223	Scenes number:	112
First Image:	20031013	Last Image:	20121130

Fig.4 **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.**



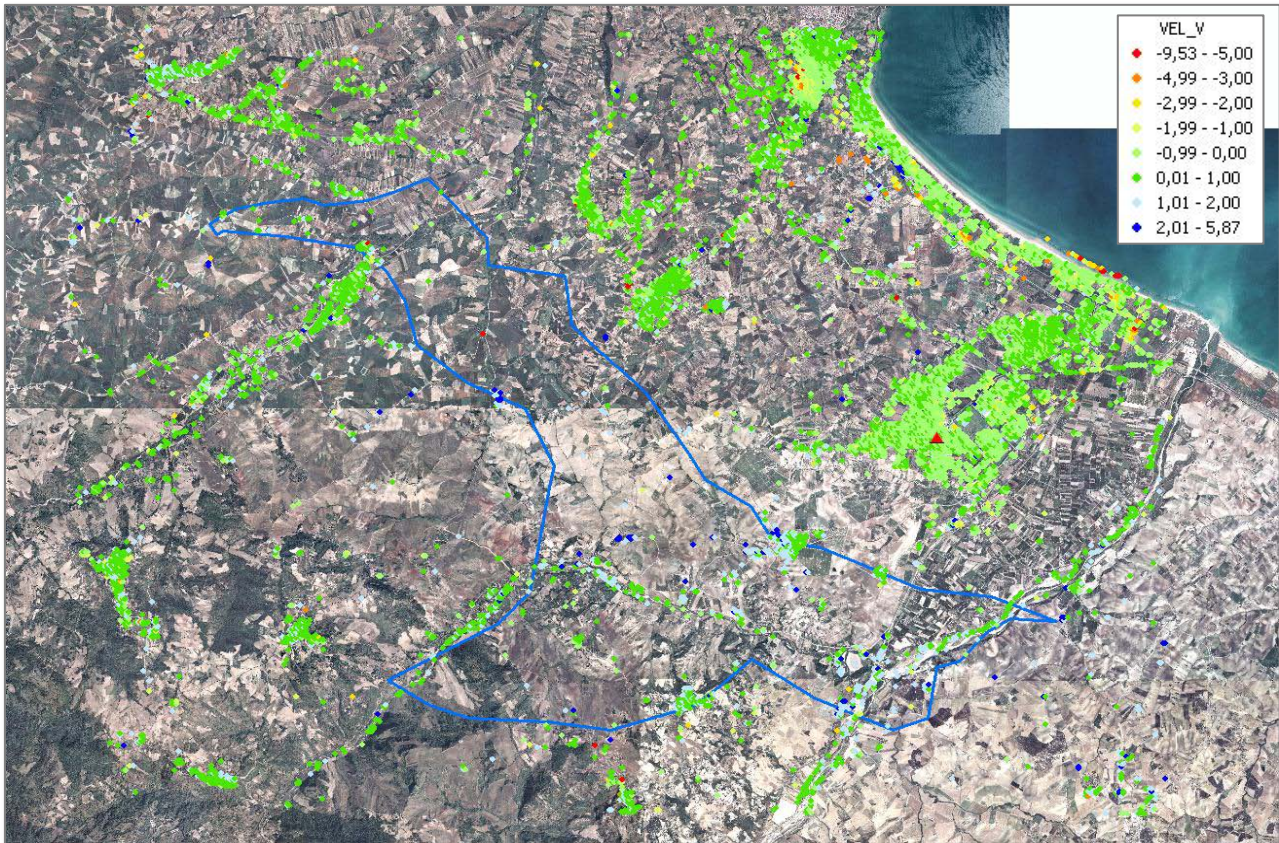


Fig.5 **Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti del rilievo Local. Il triangolo rosso indica la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del moto verticale.**

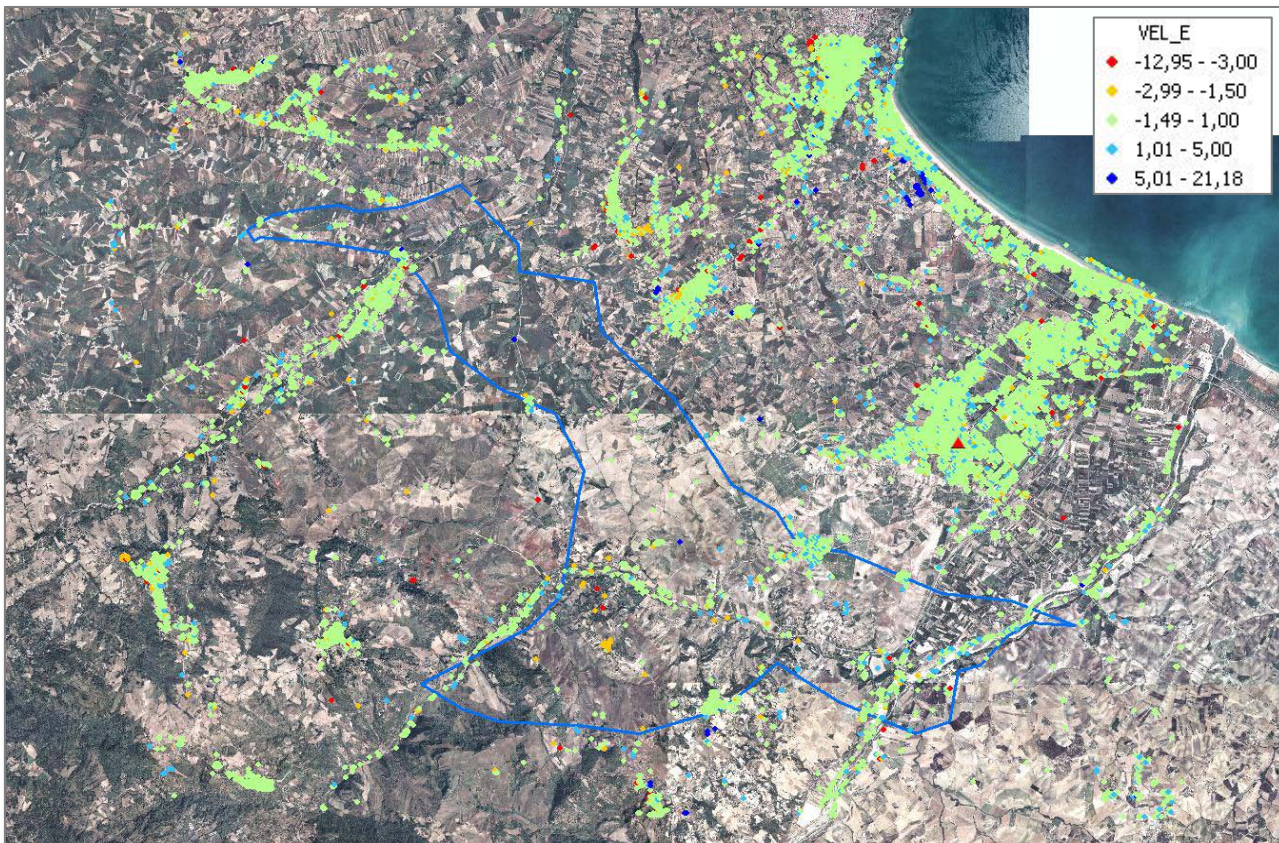


Fig.6 **Velocità di deformazione orizzontale per il periodo Ottobre 2003 – Novembre 2012 presso il campo di stoccaggio di Cupello.**



## 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.

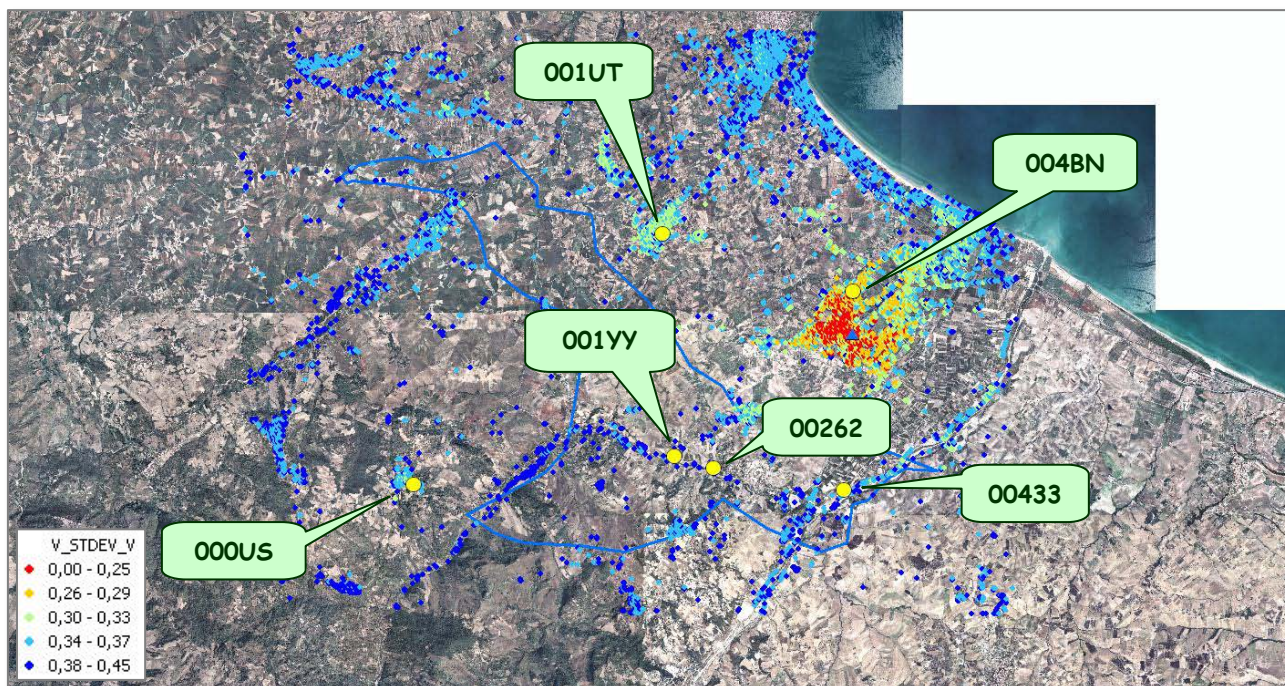


Fig.7 *Rappresentazione grafica della Deviazione Standard della velocità verticale.*



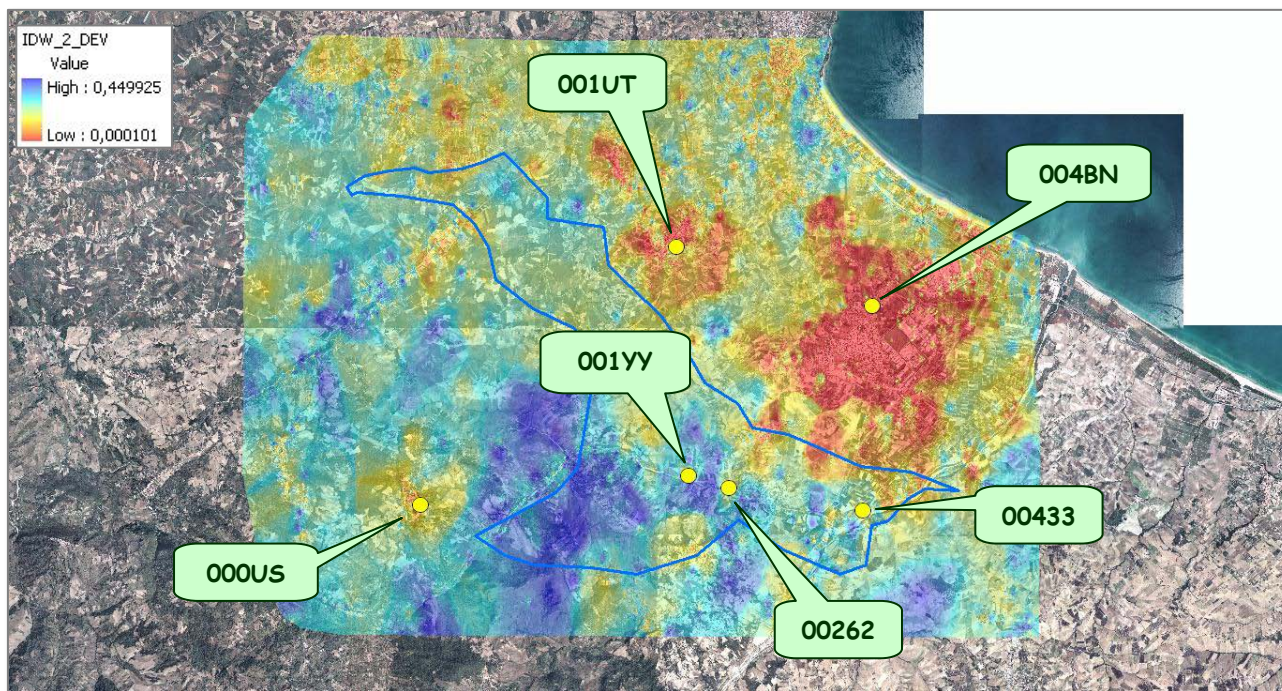


Fig.8 **Interpolazione secondo il metodo di “Inverse Distance Weighted” della deviazione standard delle velocità verticali.**

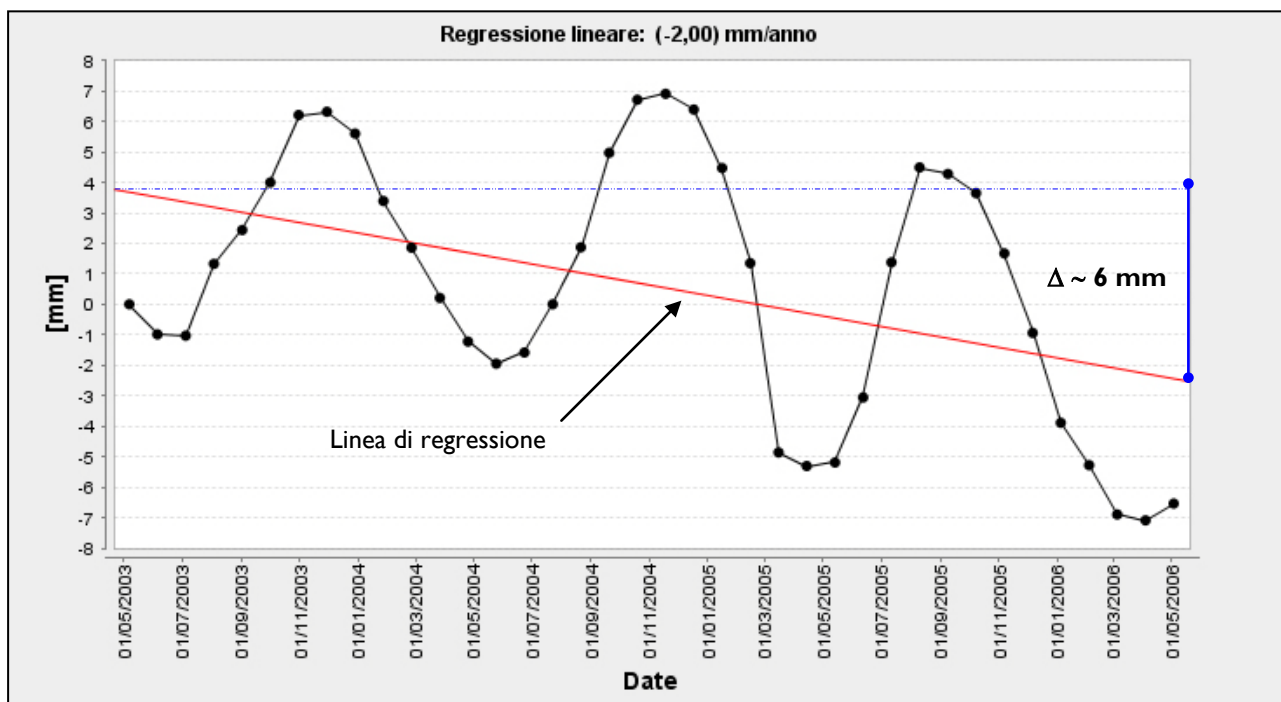


Fig.9 **Esempio di serie storica con valori di subsidenza di circa 2 mm/anno.**

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. 9 e 10).

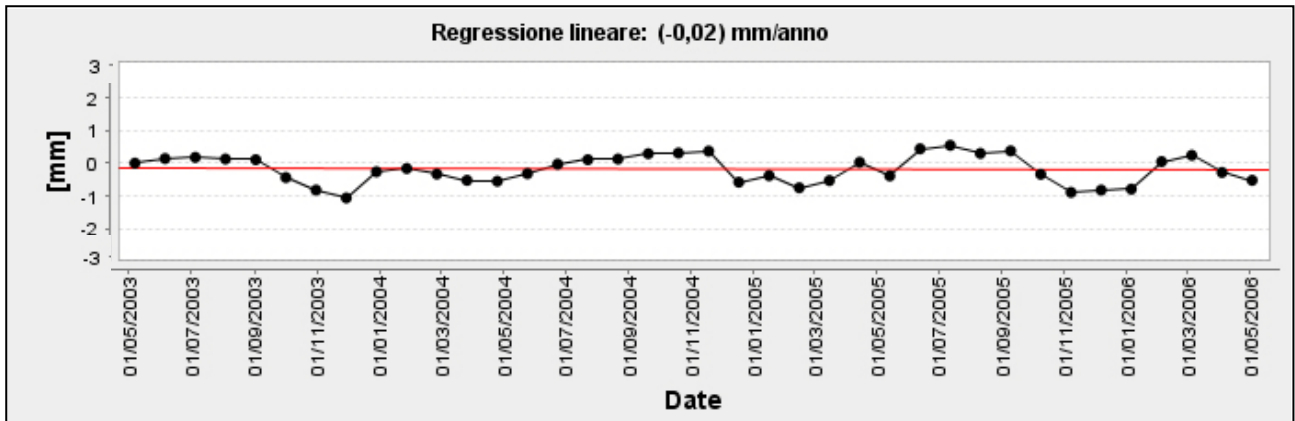


Fig.10 Esempio di serie storica con valori di regressione lineare nulla.

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 sua deviazione standard riferita alla velocità verticale. 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. 7 e 8), 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 Cupello (fig. 11).

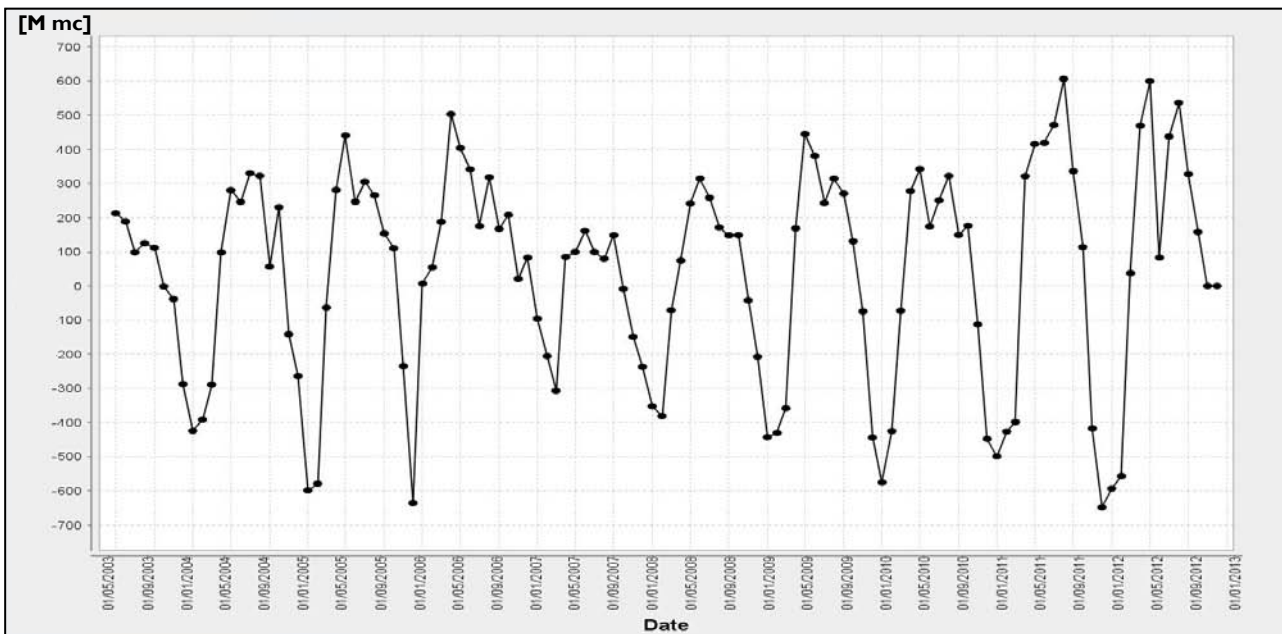


Fig.11 Curva cumulativa di stoccaggio del campo a gas di Cupello (unità di misura in  $m^3 \times 10^6$ ).



**Punto interno al giacimento – 001YY**

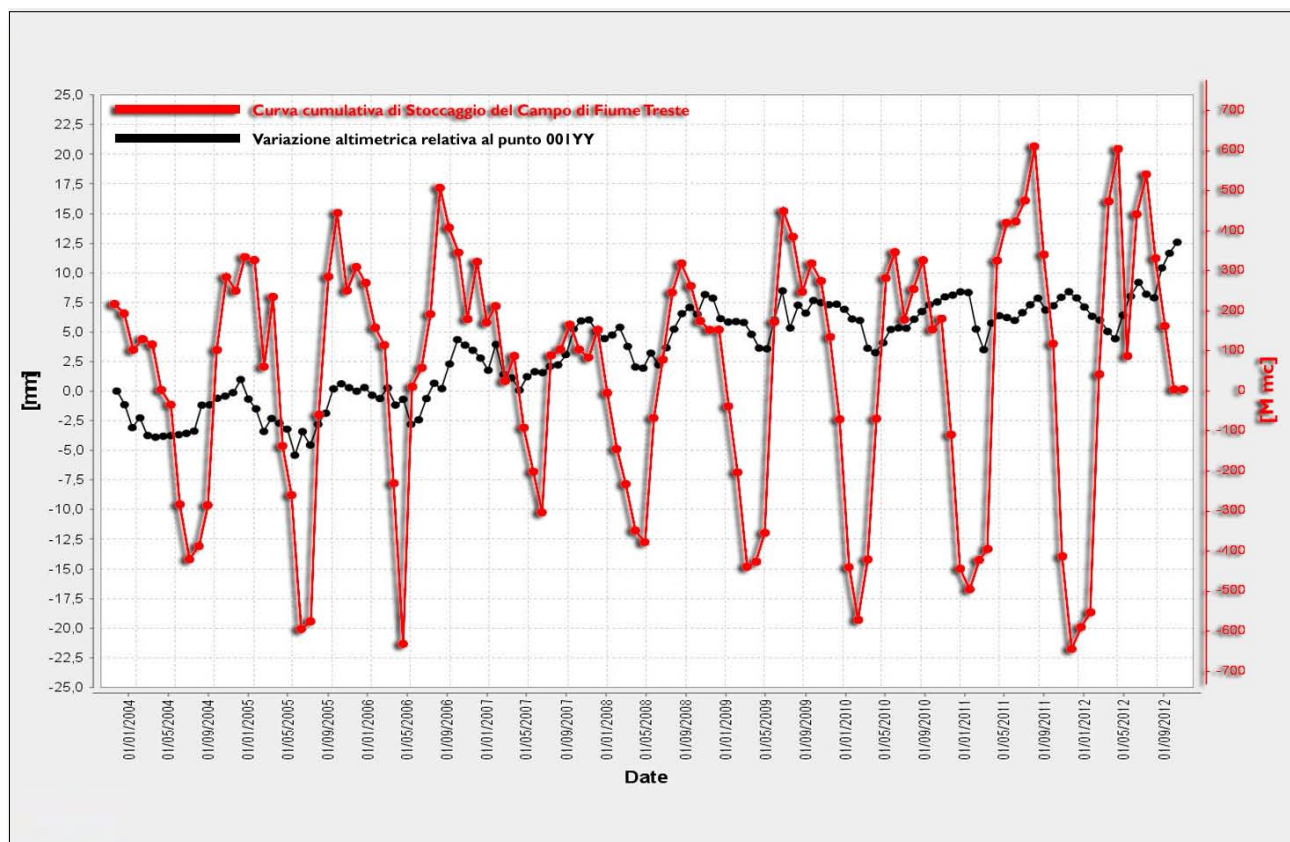


Fig.12 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Cupello-S.Salvo e le variazioni verticali del punto scomposto 001YY.

**Punto interno al giacimento – 00262**

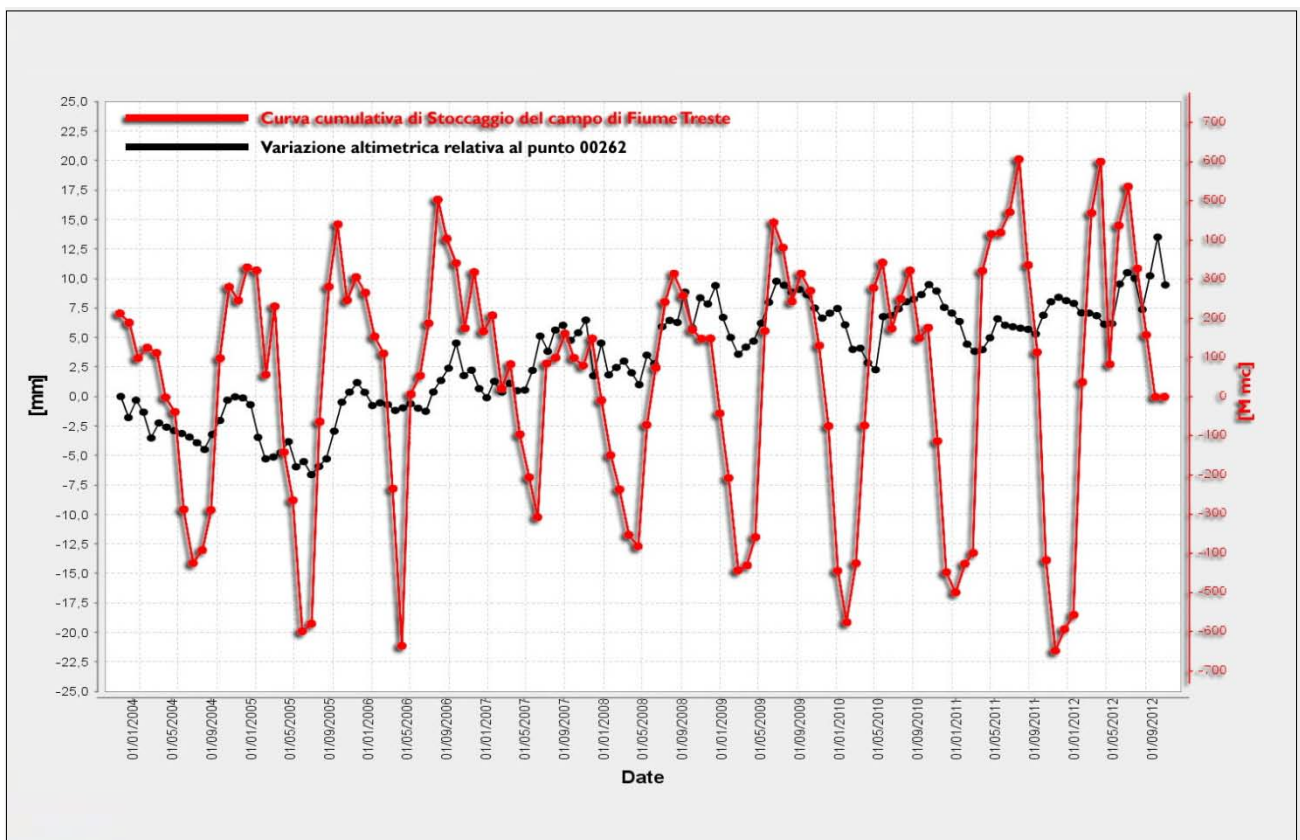


Fig.13 **Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Cupello-S.Salvo e le variazioni verticali del punto scomposto 00262.**



**Punto interno al giacimento – 00433**

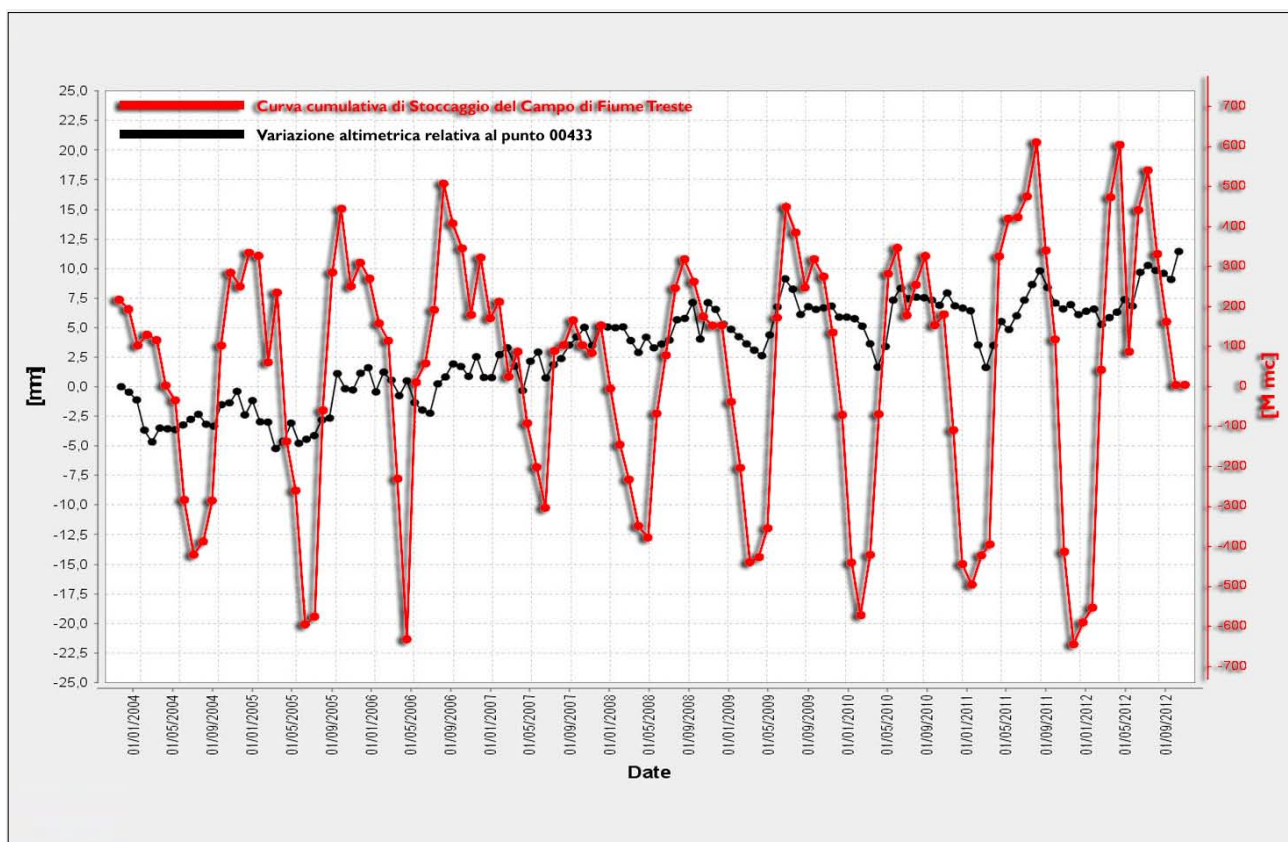


Fig.14 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Cupello-S.Salvo e le variazioni verticali del punto scomposto 00433.



### Punto esterno al giacimento – 000US

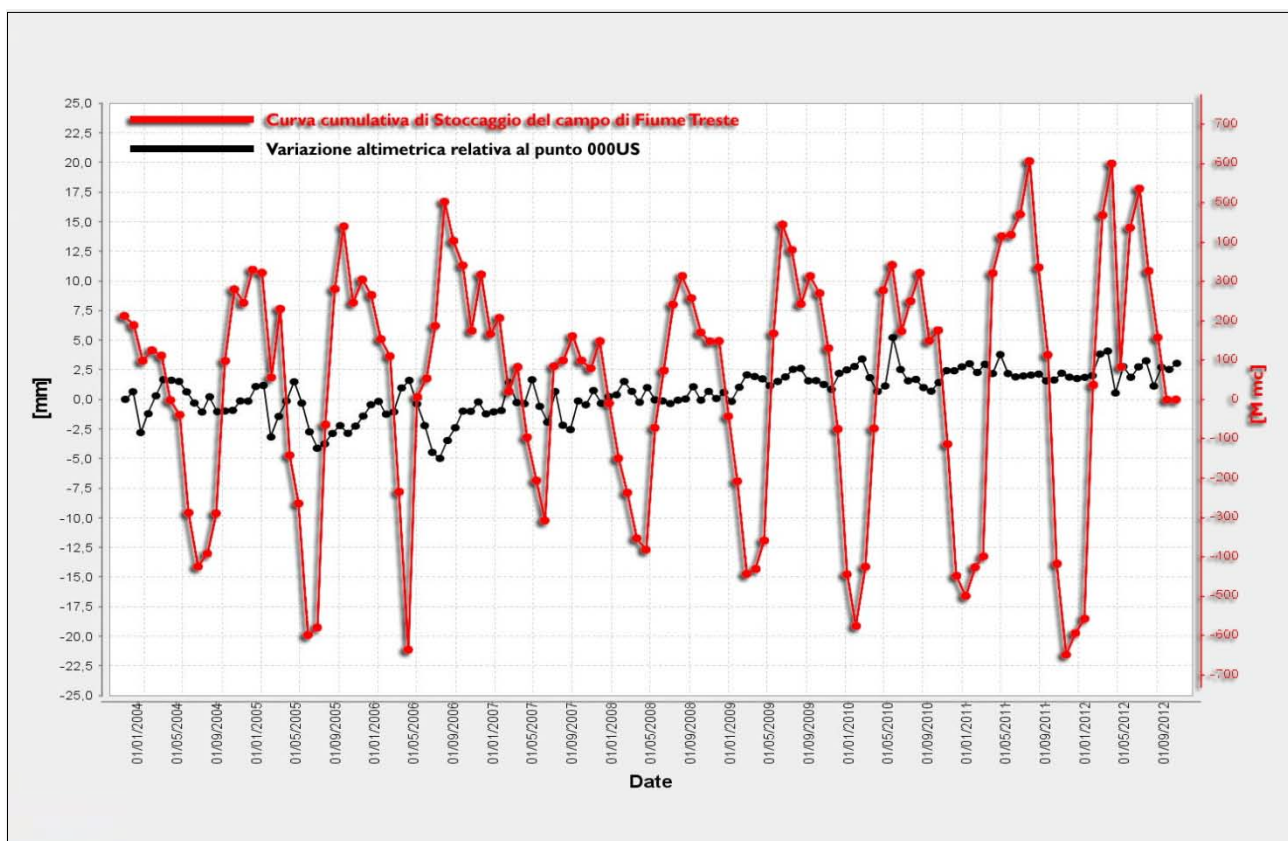
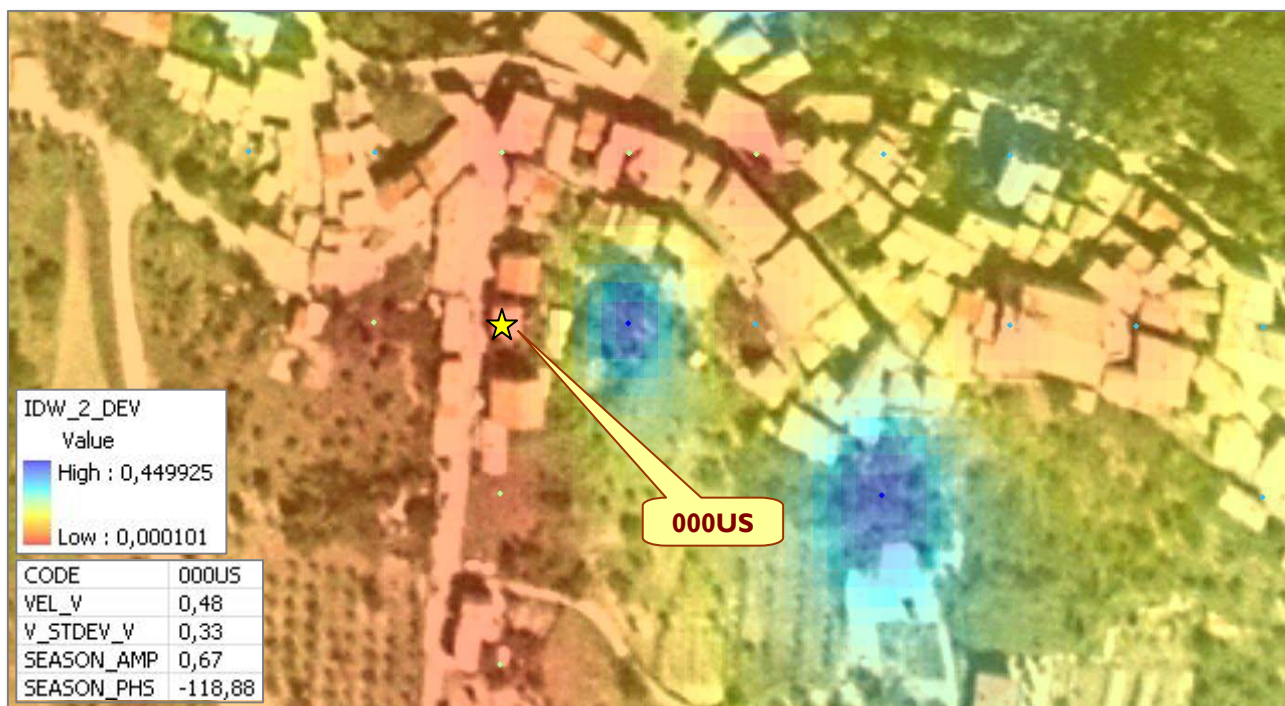


Fig.15 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Cupello-S.Salvo e le variazioni verticali del punto scomposto 000US.

**Punto esterno al giacimento – 001UT**

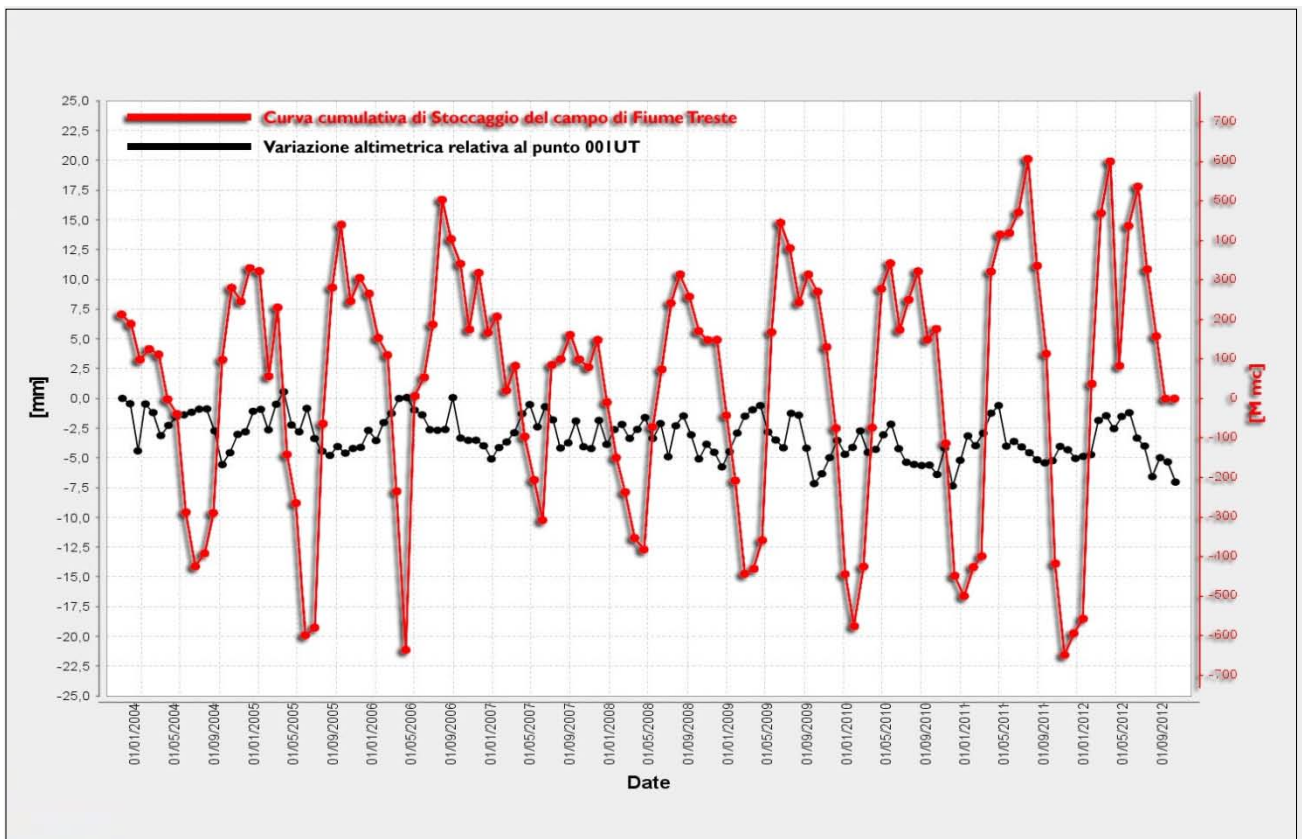
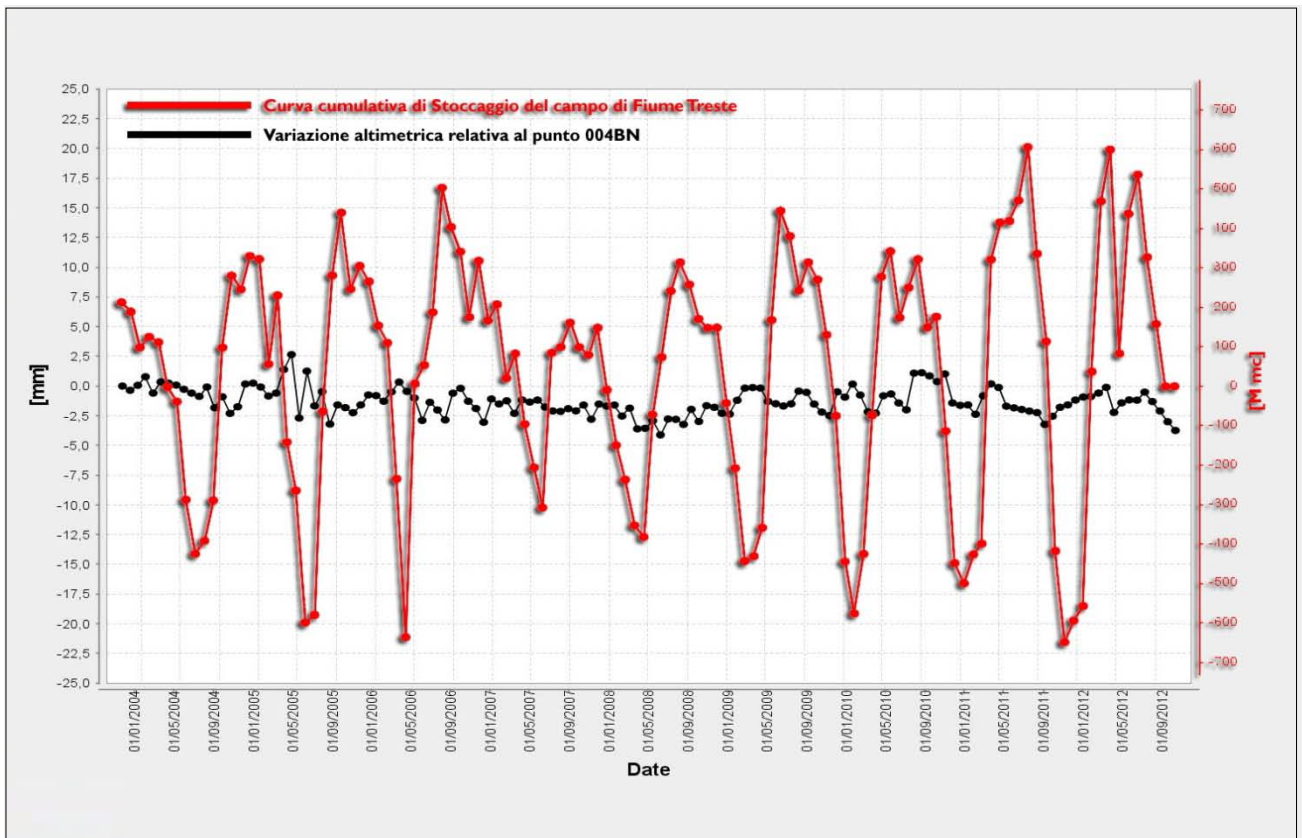


Fig.16 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Cupello-S.Salvo e le variazioni verticali del punto scomposto 001UT.



**Punto esterno al giacimento – 004BN**



**Fig.17 Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Cupello-S.Salvo e le variazioni verticali del punto scomposto 004BN.**

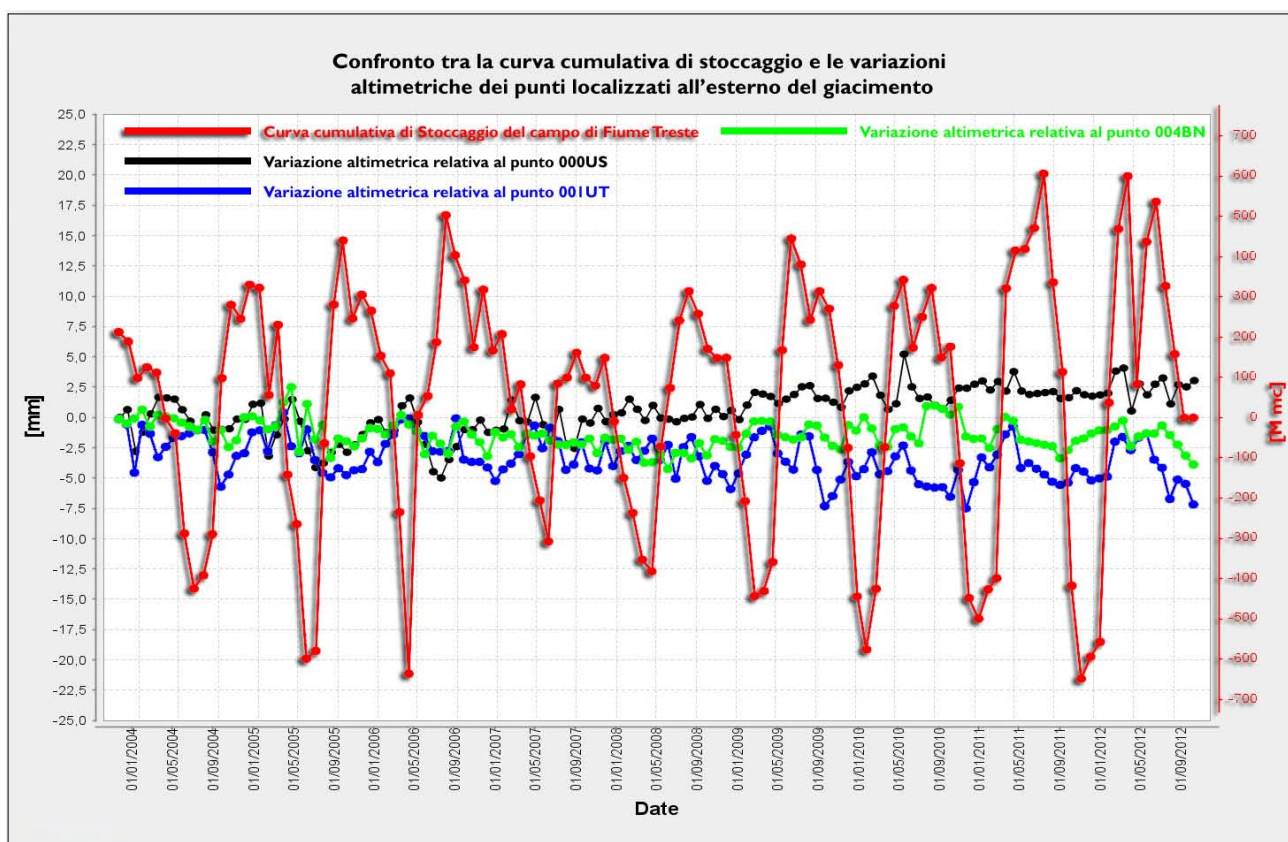
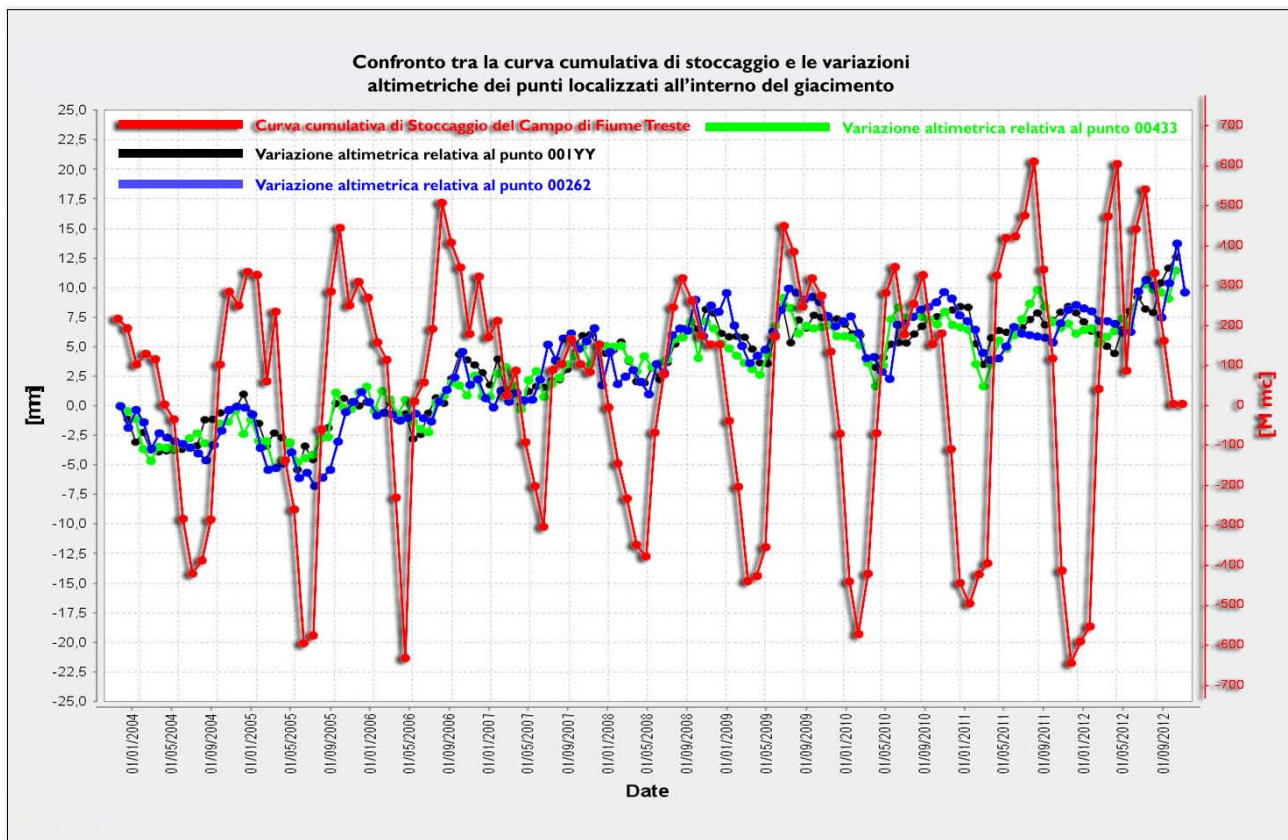


Fig.18 Confronto tra le serie storiche di deformazione verticale dei punti selezionati all'interno ed all'esterno del giacimento e la curva cumulativa di stoccaggio del campo di Fiume Treste.



### 3 - Analisi delle elaborazioni

#### Analisi LOCAL

L'analisi LOCAL effettuata sull'area occupata dal giacimento di stoccaggio di Fiume Treste evidenzia velocità di deformazione verticale pari a +0.93 mm/anno nelle aree interne ai limiti del campo. Tale valore risulta in linea con quello registrato nella precedente relazione (GEOD\_I204\_d26).



Fig.19 **Mappa delle velocità verticali dei punti scomposti, con identificazione delle tre aree soggette ad analisi.**


In più, all'interno del giacimento si possono evidenziare tre micro-zone soggette a deformazione verticale positive (vedi figura 19), i valori medi in questione sono:

1. 2,64 mm/anno
2. 1,48 mm/anno
3. 1,55 mm/anno

Nelle aree esterne al giacimento, i valori medi di deformazione verticale risultano essere praticamente nulli.

I valori di deformazione orizzontale calcolati sull'intero periodo non mostrano anomalie particolari; all'interno del giacimento la media di tali valori si attesta intorno allo zero, in linea con la media dell'intero dataset.



	<b>eni s.p.a.</b> <b>e&amp;p division</b>	Date January 2013	Doc. N°. GEOD_I301_d39	Rev. 0	Sheet 3-24	Of 24
---	--	----------------------	---------------------------	-----------	---------------	----------

## Analisi delle serie storiche

L'analisi delle serie storiche ha preso in considerazione la storia deformativa di sei punti scomposti considerati rappresentativi del trend medio; in particolare, tre dei sei punti sono localizzati all'interno del giacimento mentre i restanti tre al di fuori dei limiti del campo.

Le serie storiche dei tre punti interni al giacimento, punti scelti in prossimità dei punti identificati nella precedente relazione, considerando i valori di deviazione standard più bassi, mostrano una discreta correlazione tra loro e con la curva cumulativa di stoccaggio anche se lo shift temporale tra i volumi movimentati e le curve risulta piuttosto alto.

I punti selezionati all'esterno del giacimento presentano un comportamento che, a tratti, sembra seguire quello dei punti interni. La correlazione tra le serie storiche dei punti interni risulta particolarmente elevata anche se le ampiezze delle oscillazioni non superano mai i 5 millimetri.